

UNIVERSIDAD DE GRANADA
E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
AREA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA



**VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA
EFICACIA DE UN FILTRO GRANULAR
FRENTE A LA EROSIÓN INTERNA DE
BASES COHESIVAS**

TESIS DOCTORAL

Fernando Delgado Ramos

Granada, julio de 2000

TESIS DOCTORAL

**VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA EFICACIA DE UN
FILTRO GRANULAR FRENTE A LA EROSIÓN INTERNA
DE BASES COHESIVAS**

por

Fernando Delgado Ramos
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

presentada en el
Departamento de Ingeniería Civil
de la
Universidad de Granada

Directores de Tesis:

D. Santiago Uriel Romero
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

D. Guillermo Bravo Guillén
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Granada, julio de 2000.

TESIS DOCTORAL

**VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA EFICACIA DE UN
FILTRO GRANULAR FRENTE A LA EROSIÓN INTERNA
DE BASES COHESIVAS**

Por: Fernando Delgado Ramos
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Directores de Tesis:

D. SANTIAGO URIEL ROMERO
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

D. GUILLERMO BRAVO GUILLÉN
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

TRIBUNAL CALIFICADOR

Presidente: **Dr. D. José Antonio Baztán de Granda**

Vocales: **Dr. D. Alfredo Granados Granados**

Dr. D. Antonio Soriano Peña

Dr. D. Manuel Vizcaíno Alcalá

Secretario: **Dr. D. Jaime Riera Rico**

Acuerda otorgarle la calificación de,

SOBRESALIENTE CUM LAUDE

Granada, 25 de Septiembre de 2.000

AGRADECIMIENTOS:

La presente Tesis Doctoral ha sido el fruto de más de cuatro años de trabajo continuado, con cientos de referencias bibliográficas minuciosamente analizadas y más de mil ensayos realizados, incluyendo los de caracterización y los ensayos NEF, lo cual ha precisado de un laborioso y a veces ingrato trabajo de procesado, corrección e interpretación para poder obtener un resultado, ambicioso en sus objetivos, pero necesariamente modesto en sus conclusiones.

Pero todo este trabajo habría sido absolutamente imposible sin la participación de todas aquellas personas que me han ayudado.

Siempre es peligroso citar nombres ante la posibilidad de algún desafortunado olvido, pero pidiendo disculpas de antemano, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a las siguientes personas e instituciones:

En primer lugar he de expresar mi profunda gratitud a mis Directores de Tesis, D. Santiago Uriel y D. Guillermo Bravo, pues no sólo he encontrado en ellos siempre un consejo útil sino que ha sido para mi un orgullo contar en este trabajo con dos de los mejores especialistas del tema.

También quiero recordar en estas líneas al que fuera mi primer Director de Tesis, D. Ángel Uriel, que nos dejó cuando acababa de encender una nueva luz en la Escuela de Caminos de Granada.

También quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y en particular a D. Joaquín Delgado, Ingeniero Jefe y a D. Fernando Girón, Ingeniero Director de la Presa del Portillo; pues me han dotado de los materiales y medios técnicos y humanos precisos para desarrollar mi investigación.

He de agradecer la valiosísima colaboración de D. Francisco Lamas y D. Carlos Maeso, autores de todos los ensayos de caracterización de las muestras y magníficos consejeros,

y al personal de la Presa del Portillo encargado de realizar los ensayos NEF, D. Antonio Tello, D. Jose M^a Heredia y D. Francisco Muros.

El profundo trabajo de investigación bibliográfica habría sido imposible sin la ayuda de D. Angel Mateos, que me ha facilitado el acceso a la magnífica biblioteca del CEDEX.

Ya en el ámbito de la Universidad de Granada, quiero agradecer a todos mis compañeros de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos y del Departamento de Ingeniería Civil, y muy especialmente, a sus respectivos Directores: D. Antonio Menéndez y D. José Chacón; su inestimable apoyo y colaboración. Por supuesto que este agradecimiento ha de hacerse extensivo a mis alumnos de Obras y Aprovechamientos Hidráulicos, en particular los de este último curso, porque ellos suponen un auténtico estímulo en mi carrera docente e investigadora.

También quiero expresar mi gratitud a D. Miguel Ortega, Catedrático de Mineralogía, que ha realizado los ensayos de difracción de rayos-x y a D. Pedro García, Profesor Titular de Estadística, que ha supervisado y colaborado estrechamente en el análisis estadístico de los datos.

He de hacer mención especial a la inestimable ayuda del Prof. Dr. Buhidma Idraratna y del doctorando Marck Locke, de la Universidad de Wollongong, Australia, que ha permitido realizar una interesante colaboración mutua, contrastando resultados de laboratorio con análisis mediante modelos numéricos y que ya ha dado como fruto dos comunicaciones en congresos especializados.

Pero a pesar de la ayuda de tantas personas, este trabajo se debe, por encima de todo, a mi familia, y a ellos va dedicado, pues mi padre ha sido y es mi modelo, por sus conocimientos y claridad de ideas, mientras que mi madre ha sido siempre capaz de sacar de mi lo mejor. Y por último, por ser la persona más importante en mi vida, la que de verdad sabe cuánto trabajo y esfuerzo hay en estas páginas, esta Tesis Doctoral está dedicada a M^a José, mi esposa.

Dedicado a mis padres y a mi esposa

RESUMEN

A pesar del enorme avance que ha alcanzado la técnica presística mundial en las últimas décadas, la erosión interna en presas de materiales sueltos sigue siendo uno de los problemas más importantes de este tipo de construcciones.

Para luchar contra la erosión interna está muy extendido el empleo de filtros granulares que permiten retener las partículas del suelo base al que protegen, a la vez que dejan paso a la filtración de agua de forma que no se desarrollen presiones intersticiales excesivas. Los filtros granulares pueden diseñarse partiendo de criterios empíricos propuestos por otros autores, o mediante la propia experimentación directa, o empleando modelos numéricos para el estudio del fenómeno; e incluso es recomendable emplear varios métodos a la vez. Sea cual fuere el método elegido, es fundamental conocer previamente qué variables tienen influencia en el fenómeno de la erosión interna y el funcionamiento de los filtros granulares.

Si bien la investigación relativa a suelos base no cohesivos se puede considerar muy avanzada sobre esta cuestión, no ocurre lo mismo en el caso de bases cohesivas.

En la presente Tesis Doctoral se estudia qué variables influyen en la eficacia de un filtro granular frente a la erosión interna de bases cohesivas, para lo cual se han ensayado en laboratorio 25 muestras de suelo base procedentes de 7 presas españolas, empleando distintas variantes del ensayo NEF de Sherard y Dunningan (1985), habiéndose realizado un total de 410 ensayos. Se han estudiado, entre otras, variables como la granulometría, la porosidad o la permeabilidad del filtro; la granulometría del suelo base, con y sin dispersante, su humedad de compactación, plasticidad y mineralogía; así como el efecto del empleo de aditivos como el sulfato de aluminio o la modificación de las condiciones de flujo en el ensayo.

El efecto de estas variables se ha estudiado inicialmente de forma cualitativa y a continuación se ha tratado de cuantificar, proponiendo nuevos criterios de diseño.

ABSTRACT

Despite enormous advances in the dam engineering profession worldwide in the last few decades, the internal erosion of embankment dams continues to be one of the most important problems of this type of construction.

To control internal erosion it is common to employ granular filters that permit retention of the particles of base soil to be protected, and at the same time allow the flow of seepage water so as to avoid high internal pore water pressures. Granular filters can be designed based on empirical criteria proposed by other authors, or through proper direct experimentation, or by employing numerical models to study the phenomenon of filtration; and it is recommended to employ various methods at the same time. Regardless of the method chosen, it is fundamentally important to examine which variables have an influence on the internal erosion process and the function of granular filters.

Even though there have been extensive investigations relating to non-cohesive base soils and research can be considered very advanced on this question, the same has not occurred in the case of cohesive base soils.

This Doctoral Thesis studies the variables which influence the efficiency of a granular filter in preventing the internal erosion of cohesive base soils. To do this, laboratory tests on 25 base soils obtained from 7 Spanish dams have been performed, employing distinct variants of the NEF Test proposed by Sherard and Dunnigan (1985), which has resulted in a total of 410 tests. These tests have examined, among others, variables such as the particle size distribution, porosity and permeability of the filter; the particle size distribution of the base soil with and without dispersant, the moisture content during compaction, plasticity and mineralogy; as well as the effect of employing additives like aluminium sulphate or modifying the flow conditions in the test.

The effect of these variables has been studied initially in qualitative form, following this the study has addressed quantification of the variables, proposing new design criteria.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	9
ÍNDICE DE TABLAS.....	13
SIGLAS Y NOTACIÓN EMPLEADA.....	17
1 INTRODUCCIÓN	21
1.1 JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL	21
1.2 CONTENIDO Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	23
2 REVISIÓN DE LOS CONOCIMIENTOS	26
2.1 LA EROSIÓN INTERNA EN PRESAS DE MATERIALES SUELTOS	26
2.1.1 Descripción del fenómeno de la erosión interna	26
2.1.2 Mecanismos de arranque de partículas.....	28
2.1.3 Mecanismos de transporte de partículas.....	31
2.1.4 Otras teorías sobre la erosión y transporte de partículas.....	32
2.1.5 Teorías sobre la fracturación hidráulica.....	42
2.1.6 Algunos ejemplos de presas que han sufrido erosión interna	54
2.2 MEDIDAS DE SEGURIDAD FRENTE A LA EROSIÓN INTERNA	59
2.2.1 Medidas para evitar la fisuración	59
2.2.2 Empleo de Filtros Granulares.....	62
2.2.3 Empleo de Filtros de Geotextiles.....	64
2.3 INTERACCIÓN BASE COHESIVA-FILTRO GRANULAR	73
2.3.1 Modelización mediante ensayos de laboratorio	73
2.3.2 Modelización numérica	91
2.4 INFLUENCIA DEL SUELO BASE	109
2.4.1 Introducción	109
2.4.2 Granulometría.....	110
2.4.3 Humedad – densidad	119
2.4.4 Plasticidad.....	123
2.4.5 Dispersabilidad y/o erosionabilidad	126
2.4.6 Cohesión y ángulo de rozamiento.....	130
2.4.7 Composición y mineralogía.....	131
2.4.8 Empleo de aditivos.....	132
2.5 INFLUENCIA DEL FILTRO	134
2.5.1 Granulometría	134
2.5.2 Densidad – porosidad.....	151
2.5.3 Permeabilidad	152
2.5.4 Espesor del filtro	159
2.6 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE FLUJO.....	160
2.6.1 Dirección del flujo.....	160
2.6.2 Efecto de las condiciones del flujo en la erosión interna	163
2.7 INFLUENCIA DE OTRAS VARIABLES	174
2.7.1 Propiedades fisico-químicas del agua.....	174

2.7.2	<i>Condiciones geométricas</i>	176
2.7.3	<i>Presión de confinamiento</i>	176
2.8	CRITERIOS ACTUALES PARA EL DISEÑO DE FILTROS GRANULARES	177
2.8.1	<i>Introducción</i>	177
2.8.2	<i>Criterios empíricos anteriores a 1980</i>	178
2.8.3	<i>Criterios posteriores a 1980</i>	180
2.9	LIMITACIONES DEL ESTADO ACTUAL DE LA TÉCNICA	198
2.10	CONCLUSIONES (TÍTULO DE LA TESIS DOCTORAL)	201
3	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	209
3.1	INTRODUCCIÓN	209
3.2	OBJETIVO GENERAL	209
3.3	OBJETIVOS PRINCIPALES	210
3.4	OBJETIVOS SECUNDARIOS	211
4	METODOLOGÍA	213
4.1	INTRODUCCIÓN	213
4.2	MÉTODO DE ENSAYO	213
4.2.1	<i>Selección del método de ensayo</i>	213
4.2.2	<i>Variantes del ensayo</i>	215
4.2.3	<i>Parámetros a analizar</i>	235
4.2.4	<i>Criterios de “Éxito” o “Fracaso”</i>	241
4.3	FASES DE LA INVESTIGACIÓN	243
5	PREPARACIÓN Y AJUSTE DEL ENSAYO	249
5.1	INTRODUCCIÓN	249
5.2	OBJETIVOS	250
5.2.1	<i>Respecto a las instalaciones</i>	250
5.2.2	<i>Respecto a la preparación del ensayo</i>	250
5.2.3	<i>Respecto a la ejecución del ensayo</i>	250
5.3	RESULTADOS	251
5.3.1	<i>Instalaciones</i>	251
5.3.2	<i>Preparación del ensayo</i>	251
5.3.3	<i>Ejecución del ensayo</i>	252
5.4	CONCLUSIONES	257
5.4.1	<i>Respecto a las instalaciones</i>	257
5.4.2	<i>Respecto a la preparación del ensayo</i>	258
5.4.3	<i>Respecto a la ejecución del ensayo</i>	261
6	INVESTIGACIÓN DE CHOQUE	263
6.1	INTRODUCCIÓN	263
6.2	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN DE CHOQUE	264
6.2.1	<i>Respecto a las instalaciones</i>	264
6.2.2	<i>Respecto al ensayo de filtros sin erosión (NEF)</i>	264
6.2.3	<i>Respecto al material de Filtro</i>	264
6.2.4	<i>Respecto al material de suelo base</i>	264
6.3	DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS	265
6.3.1	<i>Filtro</i>	265
6.3.2	<i>Suelo Base</i>	269
6.4	MÉTODO OPERATIVO	274
6.5	FILTRO: ESTUDIO ESTADÍSTICO	274
6.5.1	<i>Introducción</i>	274
6.5.2	<i>Objetivos</i>	275
6.5.3	<i>Metodología</i>	275

6.5.4	<i>Antecedentes: Investigación en la Presa de Canales (1.985)</i>	277
6.5.5	<i>Variables relativas al filtro: selección y descripción</i>	282
6.5.6	<i>Correlación entre permeabilidad y granulometría</i>	287
6.5.7	<i>Correlación entre granulometría y porosidad</i>	303
6.5.8	<i>Correlación entre permeabilidad, granulometría y porosidad</i>	315
6.5.9	<i>Combinación de los datos de la Presa de Canales con los de la Presente Investigación</i> 322	
6.5.10	<i>Conclusiones del estudio estadístico</i>	324
6.6	ENSAYOS NEF CON LAS MUESTRAS BP-C2 Y BP-C3.....	327
6.6.1	<i>Muestra BP-C2</i>	327
6.6.2	<i>Muestra BP-C3</i>	332
6.7	CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN DE CHOQUE	356
6.7.1	<i>Respecto a las Instalaciones</i>	356
6.7.2	<i>Respecto al ensayo</i>	356
6.7.3	<i>Respecto al material de Filtro</i>	357
6.7.4	<i>Respecto al material de suelo base</i>	358
7	MODIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE PARTIDA	361
7.1	INTRODUCCIÓN	361
7.2	MODIFICACIÓN DE LOS OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	361
7.2.1	<i>Objetivo General</i>	361
7.2.2	<i>Objetivos Principales</i>	362
7.2.3	<i>Objetivos Secundarios</i>	364
7.3	MODIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	366
7.3.1	<i>Modificación del método de ensayo</i>	366
8	INVESTIGACIÓN DE FONDO	373
8.1	INTRODUCCIÓN	373
8.2	DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS.....	373
8.2.1	<i>Filtro</i>	373
8.2.2	<i>Suelo Base</i>	373
8.3	BASES: ESTUDIO ESTADÍSTICO	379
8.3.1	<i>Introducción</i>	379
8.3.2	<i>Detección de variables interdependientes o correlacionadas</i>	380
8.4	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS NEF “ESTÁNDAR”	387
8.4.1	<i>Introducción</i>	387
8.4.2	<i>Muestras ensayadas</i>	388
8.4.3	<i>Preparación del ensayo: parámetros analizados</i>	390
8.4.4	<i>Ejecución del ensayo: parámetros analizados</i>	402
8.4.5	<i>Selección del “Filtro Límite” por el método “Determinista”</i>	406
8.4.6	<i>Análisis de los resultados de los ensayos NEF “Estándar”</i>	437
8.5	RESULTADOS DE LAS VARIANTES DEL ENSAYO NEF	459
8.5.1	<i>Introducción</i>	459
8.5.2	<i>Variación de la compactación del filtro</i>	459
8.5.3	<i>Variación de la humedad de compactación del suelo base</i>	472
8.5.4	<i>Empleo de aditivos al suelo base</i>	477
8.5.5	<i>Variación de las condiciones de flujo</i>	480
8.5.6	<i>Variación de la duración del ensayo</i>	485
8.5.7	<i>Variación del diámetro del orificio en la pastilla de suelo base</i>	486
8.6	ANÁLISIS GLOBAL DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	488
8.6.1	<i>Introducción</i>	488
8.6.2	<i>Posible erosión selectiva en función de la mineralogía del suelo base</i>	488
8.6.3	<i>Análisis global de los resultados de todas las variantes del ensayo NEF</i>	490
9	CONCLUSIONES DEFINITIVAS	495

9.1	INTRODUCCIÓN	495
9.2	INFLUENCIA DEL SUELO BASE.....	495
9.2.1	<i>Granulometría</i>	495
9.2.2	<i>Humedad-densidad</i>	497
9.2.3	<i>Plasticidad</i>	497
9.2.4	<i>Dispersabilidad y/o erosionabilidad</i>	498
9.2.5	<i>Cohesión y ángulo de rozamiento</i>	498
9.2.6	<i>Composición y mineralogía</i>	498
9.2.7	<i>Empleo de aditivos</i>	498
9.3	INFLUENCIA DEL FILTRO.....	499
9.3.1	<i>Granulometría</i>	499
9.3.2	<i>Densidad-porosidad</i>	499
9.3.3	<i>Permeabilidad</i>	499
9.4	INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE FLUJO	500
9.5	OTRAS CONCLUSIONES	500
10	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	503
11	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	505
12	ANEJOS.....	525
12.1	PROPUESTA DE NORMA PARA LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS NEF.....	525
12.1.1	<i>Preparación del Filtro:</i>	525
12.1.2	<i>Preparación de La Base</i>	526
12.1.3	<i>Terminación de la Probeta de Ensayo</i>	528
12.1.4	<i>Ejecución del Ensayo</i>	528
12.1.5	<i>Propuesta de Hoja de Ensayo :</i>	529
12.2	DETERMINACIÓN DE LA TURBIDEZ POR NEFELOMETRÍA	532
12.2.1	<i>Fundamento</i>	532
12.2.2	<i>Material y aparatos</i>	532
12.2.3	<i>Reactivos</i>	532
12.2.4	<i>Curva de calibrado</i>	533
12.2.5	<i>Valoración de las muestras</i>	533
12.2.6	<i>Comprobación por pesada. (Método de la estufa)</i>	534
12.2.7	<i>Cálculo de los resultados</i>	534
12.2.8	<i>Observaciones</i>	534
12.2.9	<i>Referencias</i>	535
12.3	MÉTODOS ESTADÍSTICOS EMPLEADOS	536
12.3.1	<i>Correlaciones bivariadas</i>	536
12.3.2	<i>Regresión estadística simple y múltiple</i>	536
12.3.3	<i>Regresión Paso a Paso</i>	537
12.3.4	<i>Análisis Factorial</i>	537
13	FOTOGRAFÍAS.....	540

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- <i>Interfase Base-Filtro estable</i>	91
Figura 2- <i>Disposición de las partículas</i>	94
Figura 3 – <i>Modelo de Filtro por capas - Kenney et al. (1985)</i>	95
Figura 4 – <i>Modelo de canal de poros - Indraratna y Vafai (1997)</i>	97
Figura 5 .- <i>Modelo de Red de Poros – Witt (1992)</i>	97
Figura 6 – <i>Red Reticular Cúbica de Poros - Schuler (1996)</i>	98
Figura 7- <i>Método para Determinar la Distribución de los Tamaños de Poros - Schuler (1996)</i>	98
Figura 8 .- <i>Profundidad de Infiltración prevista - Filtro Uniforme</i>	107
Figura 9.- <i>Profundidad de infiltración prevista - Filtro Graduado</i>	107
Figura 10 .- <i>Condición de autoestabilidad de Lubochkov (1968)</i>	141
Figura 11 .- <i>Estabilidad Interna según De Mello (1975)</i>	142
Figura 12 .- <i>Comprobación de la Estabilidad Interna según Sherard</i>	143
Figura 13 .- <i>Equivalencia de la condición de Sherard (Uriel 1979)</i>	144
Figura 14 .- <i>Método de obtención de la “Curva de Forma” (Kenney y Lau 1985)</i> .	145
Figura 15 .- <i>Límite entre suelos estables e inestables (Kenney y Lau 1985)</i>	146
Figura 16 .- <i>Resultados de Vaughan y Soares (1982)</i>	153
Figura 17 .- <i>Ábaco de Wolski, Furstemberg, Mioduszewski y Reczek (1970)</i>	164
Figura 18 .- <i>Ábaco de Ziemis (1968)</i>	165
Figura 19 .- <i>Ley de flujo no lineal para materiales no granulares</i>	170
Figura 20 .- <i>Validez de la Ley de Darçy según Brauns (1991)</i>	171
Figura 21 .- <i>Coefficiente de reducción de la permeabilidad (Brauns 1991)</i>	171
Figura 22.- <i>Diseño del filtro para bases del grupo 4 (Sherard y Dunningan 1985)</i> .	185
Figura 23.- <i>Resumen de los criterios de Sherard y Dunningan (1985)</i>	186
Figura 24.- <i>Diseño de filtros según Lafleur et al (1989)</i>	187
Figura 25.- <i>Clasificación de curvas granulométricas de suelos muy ampliamente graduados, Lafleur et al (1989 y 1992)</i>	188

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.- Ensayo NEF-3: Evolución del caudal y la concentración del agua de salida	254
Gráfico 2.- Base BP-C1: Evolución de la concentración con el tiempo	256
Gráfico 3.- Base BP-C1: Evolución del caudal con el tiempo.....	256
Gráfico 4.- Mineralogía de las fracciones que componen el filtro	266
Gráfico 5.- Granulometrías de algunos filtros ensayados: $D_{100F} = 10\text{mm}$	268
Gráfico 6.- Granulometrías de algunos filtros ensayados: $D_{100F} = 20\text{mm}$	268
Gráfico 7.- Representación de las muestras BP-C2 y BP-C3 en el gráfico de Casagrande.....	273
Gráfico 8.- Gráfico matricial de dispersión: Permeabilidad, D_{15} y Porosidad.....	279
Gráfico 9.- Permeabilidad, Granulometría y Porosidad según tiempo de vibrado ..	285
Gráfico 10.- Relación entre las distintas variables granulométricas del filtro.....	286
Gráfico 11.- Correlación <i>Permeabilidad-Granulometría</i> según el diámetro de comparación – D_x - para cada tiempo de vibrado	288
Gráfico 12.- Correlación <i>Permeabilidad-D_{15}</i> para 0 s de compactación	289
Gráfico 13.- Correlación <i>Permeabilidad-D_{15}</i> para 0 s de compactación y $D_{100}=10\text{mm}$	290
Gráfico 14.- Correlación <i>Permeabilidad-D_{15}</i> para $T_v=15\text{ s}$ y $D_{100}=10\text{ mm}$	294
Gráfico 15.- Correlación <i>Permeabilidad-D_{15}</i> para $T_v=60\text{ s}$ y $D_{100}=10\text{mm}$	298
Gráfico 16.- Correlación <i>Permeabilidad-D_{15}</i> para $T_v=120\text{ s}$ y $D_{100}=10\text{mm}$	300
Gráfico 17.- Correlación <i>Permeabilidad-D_{15}</i> para cualquier tiempo de compactación y $D_{100}=10\text{mm}$	303
Gráfico 18.- Correlación <i>Porosidad-D_{15}</i> según el tiempo de vibrado	304
Gráfico 19.- Correlación <i>Porosidad-D_{15}</i> según el tiempo de vibrado: con $D_{100}=10\text{mm}$	305
Gráfico 20.- Variación de la densidad del filtro según el tiempo de vibrado	312
Gráfico 21.- Validez del modelo $k= f(D_{15}, n)$	321
Gráfico 22.- Relación entre <i>Permeabilidad</i> y D_{15} con todos los datos.....	323
Gráfico 23.- Base BP-C2, NEF- “15 Seg.Vibr.”: Evolución del caudal de salida ..	331
Gráfico 24.- Base BP-C2, NEF- “15 Seg.Vibr.”: Evolución de la concentración de salida	331
Gráfico 25.- Base BP-C3, Ensayos NEF “15seg.vibr.”: Relación caudal-tiempo...	338
Gráfico 26.- Influencia de la compactación: D_{15FL} para cada tiempo de vibrado....	340
Gráfico 27.- Base BP-C3: Influencia de la humedad del suelo base	346
Gráfico 28.- Base BP-C3: Influencia de la presión de ensayo, (gráfica caudal-tiempo)	349
Gráfico 29.- Base BP-C3: Criterio de Éxito/Fracaso.....	352
Gráfico 30.- Gráfico de Plasticidad de las Bases ensayadas.....	376
Gráfico 31.- Mineralogía de las muestras de suelo base.....	377
Gráfico 32.- Mineralogía de la fracción arcilla.....	378
Gráfico 33.- Bases: relaciones entre variables granulométricas	381

Gráfico 34.- Bases: relación entre porcentaje de Arcilla, Humedad Óptima e Índice de Plasticidad.....	384
Gráfico 35.- Bases: relación entre Humedad Óptima y Densidad Máxima	385
Gráfico 36.- Base: relación entre la fracción arcilla y el contenido de mineral de arcilla	386
Gráfico 37.- D ₁₅ de los filtros ensayados: histograma.....	389
Gráfico 38.- Ensayos NEF Estándar: relación porosidad-D _{15F}	392
Gráfico 39.- Ensayos NEF Estándar: relación entre la porosidad y el D _{15F} según el D _{100F}	393
Gráfico 40.- Regresión entre Porosidad-D _{15F} -D _{100F} : histograma de residuos	396
Gráfico 41.- Gráfico matricial de dispersión, D _{15F} -Permeabilidad-Porosidad	397
Gráfico 42.- Suelo base: relación entre la humedad y la compactación.....	399
Gráfico 43.- Ensayos NEF Estándar: relación entre humedad y densidad de las bases	400
Gráfico 44.- Ejecución del ensayo: gráfico matricial de dispersión.....	402
Gráfico 45.- Criterio de Éxito/Fracaso según el orificio de salida y el volumen total	404
Gráfico 46.- Ejecución del ensayo: relación entre el orificio de salida y el residuo seco total.....	405
Gráfico 47.- Ensayos NEF Estándar: Base BBA-C1	407
Gráfico 48.- Ensayos NEF Estándar: Base BCA-C1	408
Gráfico 49.- Ensayos NEF Estándar: Base BCA-C2.....	410
Gráfico 50.- Ensayos NEF Estándar: Base BFA-C1	411
Gráfico 51.- Ensayos NEF Estándar: Base BFA-C2	413
Gráfico 52.- Ensayos NEF Estándar: Base BFA-C2 con material lateral de arena..	414
Gráfico 53.- Ensayos NEF Estándar: Base BFA-C2 con material lateral de plastilina	415
Gráfico 54.- Ensayos NEF Estándar: Base BJV-C1	417
Gráfico 55.- Ensayos NEF Estándar: Base BJV-C2.....	418
Gráfico 56.- Ensayos NEF Estándar: Base BJV-C3.....	419
Gráfico 57.- Ensayos NEF Estándar: Base BJV-C4.....	420
Gráfico 58.- Ensayos NEF Estándar: Base BJV-C5.....	421
Gráfico 59.- Ensayos NEF Estándar: Base BJV-C6.....	422
Gráfico 60.- Ensayos NEF Estándar: Base BJV-C7.....	423
Gráfico 61.- Ensayos NEF Estándar: Base BP-C2.....	424
Gráfico 62.- Ensayos NEF Estándar: Base BP-C2-0,32.....	425
Gráfico 63.- Ensayos NEF Estándar: Base BP-C2-0,63.....	426
Gráfico 64.- Ensayos NEF Estándar: Base BP-C2-1,25.....	427
Gráfico 65.- Ensayos NEF Estándar: Base BP-C3	428
Gráfico 66.- Ensayos NEF Estándar: Base BP-C4	430
Gráfico 67.- Ensayos NEF Estándar: Base BP-C5	431
Gráfico 68.- Ensayos NEF Estándar: Base BSC-C1	432
Gráfico 69.- Ensayos NEF Estándar: Base BSC-C4	433
Gráfico 70.- Ensayos NEF Estándar: Base BSC-C5	434
Gráfico 71.- Ensayos NEF Estándar: Base BZA-C1	435

Gráfico 72.- Ensayos NEF Estándar: relación $D_{15F} - d_{85B}$	438
Gráfico 73.- Ensayos NEF Estándar: correlaciones entre variables granulométricas (I)	439
Gráfico 74.- Ensayos NEF Estándar: correlaciones entre variables granulométricas (II)	440
Gráfico 75.- Ensayos NEF Estándar: relación $D_{15FL} - P_{0.08B}$	443
Gráfico 76.- Ensayos NEF Estándar: relación $D_{15FL} - d_{70B}$	444
Gráfico 77.- Ensayos NEF Estándar: relación $D_{15FL} - d_{85B}$	444
Gráfico 78.- Ensayos NEF Estándar: relación D_{15FL} – con la granulometría del suelo base sin dispersante (I).....	446
Gráfico 79.- Ensayos NEF Estándar: relación D_{15FL} – con la granulometría del suelo base sin dispersante (II)	447
Gráfico 80.- Ensayos NEF Estándar: relación $k_{FL} - d_{85B}$	450
Gráfico 81.- Ensayos NEF Estándar: relación $k_{FL} - d_{70B}$	451
Gráfico 82.- Ensayos NEF Estándar: influencia de la plasticidad.....	452
Gráfico 83.- Ensayos NEF Estándar: relación D_{15FL} – índice de plasticidad	453
Gráfico 84.- Ensayos NEF Estándar: relación D_{15FL} / d_{70B} con límite plástico	454
Gráfico 85.- Ensayos NEF Estándar: relación entre $D_{15FL} / P_{0.08B}$ y la plasticidad ..	456
Gráfico 86.- Ensayos NEF Estándar: influencia del material lateral.....	458
Gráfico 87.- Ensayos NEF “15 Seg. Vibr”: resultados.....	462
Gráfico 88.- Ensayos NEF “2 Min. Vibr”: resultados	465
Gráfico 89.- Influencia de la compactación del filtro.....	466
Gráfico 90.- Relación $D_{15FL} - d_{70B}$ según la compactación del filtro	468
Gráfico 91.- Relación entre la permeabilidad del filtro y el d_{70B} de la base, según la compactación del filtro	469
Gráfico 92.- Propuesta de diseño $k_{FL} - d_{70B}$	471
Gráfico 93.- Relación entre la permeabilidad del filtro y el d_{85B} de la base, según la compactación del filtro	472
Gráfico 94.- Influencia de la humedad del suelo base.....	476
Gráfico 95.- Influencia de la adición de sulfato de aluminio.....	479
Gráfico 96.- Resultado de los ensayos NEF con 2 kg/cm^2 de presión.....	483
Gráfico 97.- Influencia de la presión de agua (I).....	484
Gráfico 98.- Influencia de la presión de agua (II).....	485
Gráfico 99.- Estudio de la posible erosión selectiva en el ensayo NEF	489
Gráfico 100.- Resultados de todas las variantes de los ensayos NEF.....	491
Gráfico 101.- Relación $D_{15FL} - d_{70B}$ para todas las variantes de los ensayos NEF...	492
Gráfico 102.- Relación $D_{15FL} - P_{0.08B}$ para todas las variantes de los ensayos NEF	493
Gráfico 103.- Relación $k_{FL} - d_{70B}$ para todas las variantes de los ensayos NEF	494

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 .- Tamaño de apertura de filtración según Giroud (1996)	139
Tabla 2 .- Criterios de diseño de filtros granulares anteriores a 1980	179
Tabla 3.- Criterio de Indraratna et al (1996)	194
Tabla 4.- Criterio de Fujisawa et al (1997)	196
Tabla 5.- Criterio de no erosión (Foster y Fell 1999)	197
Tabla 6.- Criterio de erosión continua (Foster y Fell 1999)	197
Tabla 7.- Análisis químico del agua empleada en los ensayos NEF	218
Tabla 8.- Variantes del ensayo NEF	234
Tabla 9.- Ajustes de la humedad, espesor y densidad de las muestras	252
Tabla 10.- Resumen de características de las muestras de suelo base	273
Tabla 11.- Ensayos de Permeabilidad de la Presa de Canales (Bravo y Maeso 1985)	278
Tabla 12.- Correlación: Permeabilidad, D_{15} y Porosidad.....	280
Tabla 13.- Regresión no lineal: $k-D_{15F}-n$	281
Tabla 14.- Resultados de los ensayos de permeabilidad de filtros	284
Tabla 15.- Regresión Lineal $k-D_{15}$ para $T_v=0$ s y $D_{100}=10$ mm	291
Tabla 16.- Regresión Lineal $k-D_{15}$ para $T_v=0$ s y $D_{100}=10$ mm: estudio de los residuos tipificados.....	291
Tabla 17.- Estimación Curvilínea $k-D_{15}$ para $T_v=0$ s y $D_{100}=10$ mm: coeficiente R^2	292
Tabla 18.- Regresión Lineal $k-D_{15}$ para $T_v=0$ s y $D_{100}=10$ mm: Sin dato nº16.....	293
Tabla 19.- Regresión Lineal $k-D_{15}$ para $T_v=15$ s y $D_{100}=10$ mm	295
Tabla 20.- Regresión Lineal $k-D_{15}$ para $T_v=15$ s y $D_{100}=10$ mm: Cálculo de los residuos tipificados	296
Tabla 21.- Regresión Lineal $k-D_{15}$ para $T_v=0$ s y $D_{100}=10$ mm: Sin dato nº21	297
Tabla 22.- Regresión Lineal $k-D_{15}$ para $T_v=60$ s y $D_{100}=10$ mm	299
Tabla 23.- Regresión Lineal $k-D_{15}$ para $T_v=120$ s y $D_{100}=10$ mm	301
Tabla 24.- Regresión Lineal $k-D_{15}$ para $T_v=120$ s y $D_{100}=10$ mm: estudio de los residuos tipificados	301
Tabla 25.- Regresión lineal <i>Porosidad</i> - D_{15} para $D_{100}=10$ mm y $T_v= 0$ s.....	306
Tabla 26.- Regresión lineal <i>Porosidad</i> - D_{15} para $D_{100}=10$ mm y $T_v= 0$ s: Estudio de los residuos tipificados	306
Tabla 27.- Regresión lineal <i>Porosidad</i> - D_{15} para $D_{100}=10$ mm y $T_v= 15$ s.....	307
Tabla 28.- Regresión lineal <i>Porosidad</i> - D_{15} para $D_{100}=10$ mm y $T_v= 15$ s: Estudio de los residuos tipificados.....	308
Tabla 29.- Regresión lineal <i>Porosidad</i> - D_{15} para $D_{100}=10$ mm y $T_v= 60$ s.....	309
Tabla 30.- Regresión lineal <i>Porosidad</i> - D_{15} para $D_{100}=10$ mm y $T_v= 120$ s.....	311
Tabla 31.- <i>Porosidad</i> en función del D_{15} y el Tiempo de Vibrado: Regresión lineal	313
Tabla 32.- Regresión lineal:..... $n= f (D_{15F}, \log(T_v))$	

Tabla 33.- Regresión lineal $-n=f(D_{15F}, \log(Tv))$: Correlaciones entre los coeficientes	314
Tabla 34.- Regresión lineal $-n=f(D_{15F}, \log(Tv))$: estudio de los residuos	315
Tabla 35.- Regresión lineal: $k=f(D_{15}, n)$: $D_{100}=10\text{mm}$	316
Tabla 36.- Regresión lineal $k=f(D_{15}, n)$: $D_{100}=10\text{mm}$	317
Tabla 37.- Regresión lineal $k=f(D_{15}, n)$: $D_{100}=10\text{mm}$ - Estudio de los residuos tipificados	317
Tabla 38.- Regresión lineal $k=f(D_{15}, n)$: $D_{100}=10\text{mm}$, Sin datos nº13, nº21	318
Tabla 39.- Regresión lineal $k=f(D_{15}, n)$: $D_{100}=10\text{mm}$. Sin datos nº7, 13, 16, 21	319
Tabla 40.- Modelo de regresión lineal $k=f(D_{15}, n)$: $D_{100}=10\text{mm}$. Sin datos nº7, 13, 16, 21	319
Tabla 41.- Base BP-C2: comparación de los resultados de los ensayos NEF	329
Tabla 42.- Base BP-C3: comparación de los resultados de los ensayos NEF	335
Tabla 43.- Base BP-C3: Influencia de la humedad del suelo base: comparación con los resultados de Vaughan y Soares (1982).....	347
Tabla 44.- Base BP-C3: granulometría por rayo láser.....	355
Tabla 45.- Granulometría de las muestras ensayadas, (Con Dispersante): <i>valores en milímetros</i>	375
Tabla 46.- Granulometría de las muestras ensayadas, (Sin Dispersante).....	375
Tabla 47.- Densidad y Humedad Próctor y Límites de Atterberg de las Bases ensayadas.....	376
Tabla 48.- Mineralogía de las Bases ensayadas	377
Tabla 49.- Otras características de las Bases ensayadas.....	379
Tabla 50.- Bases: correlación entre variables granulométricas	382
Tabla 51.- Bases: correlaciones entre Granulometría, Próctor y Plasticidad	383
Tabla 52.- Bases ensayadas: rango de variación de sus características.....	390
Tabla 53.- Regresión lineal entre Porosidad- D_{15F} - D_{100F}	394
Tabla 54.- Regresión lineal entre Porosidad- D_{15F} - D_{100F} : coeficientes y correlaciones	394
Tabla 55.- Regresión lineal entre Porosidad- D_{15F} - D_{100F} : residuos tipificados	395
Tabla 56.- Regresión lineal entre la humedad y la densidad de las bases	401
Tabla 57.- Regresión lineal entre la humedad y la densidad de las bases: estudio de los residuos	401
Tabla 58.- Ejecución del ensayo: tabla de correlaciones entre parámetros	403
Tabla 59.- Ejecución del ensayo: Estudio de datos anómalos.....	404
Tabla 60.- Ensayos NEF Estándar: correlaciones entre D_{15FL} y las variables granulométricas del suelo base	440
Tabla 61.- Ensayos NEF Estándar: detección de resultados anómalos	441
Tabla 62.- Ensayos NEF Estándar: regresión lineal $D_{15FL} - P_{0.08B}$	442
Tabla 63.- Ensayos NEF Estándar: coeficientes de correlación $D_{15FL} -$ con la granulometría del suelo base sin dispersante.....	447
Tabla 64.- Ensayos NEF Estándar: tamaño máximo de las partículas erosionadas	448
Tabla 65.- Ensayos NEF Estándar: correlaciones entre granulometría del filtro y plasticidad del suelo base	453
Tabla 66.- Ensayos NEF Estándar: influencia de la plasticidad.....	455

Tabla 67.- Regresión lineal entre la permeabilidad del filtro y el d_{70B} para cualquier energía de compactación del filtro.....	470
Tabla 68.- Influencia de la humedad del suelo base.....	474
Tabla 69.- Regresión $D_{15FL} - d_{70B}$ para todas las variantes de los ensayos NEF.....	492

SIGLAS Y NOTACIÓN EMPLEADA

Se han adoptado en general los símbolos aprobados por la Sociedad Internacional de Mecánica del Suelo en su V Congreso (volumen III, páginas 69-70) , la lista de símbolos propuesta por la Sociedad Internacional de Mecánica de las Rocas (1.970) y en su defecto los habituales en las distintas publicaciones sobre filtros y drenes del Comité Internacional de Grandes Presas, (Boletín 95).

En aquellos caso en que no se disponía de un símbolo aceptado, se han adoptado determinados símbolos por decisión propia y aparecen seguidos del comentario “nuevo”.

También aparecen las unidades en que se expresa más frecuentemente cada magnitud en el texto. Se ha empleado el sistema internacional (S.I.), salvo en aquellos casos en que el rango de medida aconseje el empleo de múltiplos o submúltiplos de éste o incluso unidades de otros sistemas de medida.

c	<i>cohesión</i>	(MPa- megapascasles)
C	<i>grado centígrado</i>	
C_c	<i>coeficiente de curvatura</i>	
η	<i>coeficiente de viscosidad</i>	
C_u	<i>coeficiente de uniformidad</i>	
c_v	<i>coeficiente de consolidación</i>	
D	<i>diámetro</i>	(mm)
D_{15FL}	<i>diámetro <u>del material de filtro</u> correspondiente al 15% de la curva granulométrica que se considera <u>“filtro límite”</u></i>	(mm) “NUEVO”
D_c^*	<i>diámetro de constricción de control</i>	(mm)
ρ	<i>densidad</i>	
D_n	<i>diámetro correspondiente al n% de la curva granulométrica</i>	(mm)
d_{nB}	<i>diámetro <u>del material de suelo base</u> correspondiente al n% de la curva granulométrica</i>	(mm) (“NUEVO”)

D_{nF}	diámetro <u>del material de filtro</u> correspondiente al n% de la curva granulométrica (mm) (“NUEVO”)
e	índice de poros
g	gramo masa
i	gradiente hidráulico
I_p	índice de plasticidad (%)
k	coeficiente de permeabilidad (cm/s)
kg	kilogramo masa
μ	micra. coeficiente de rozamiento
Mpa	Megapascal
N	Newton
n	porosidad
O_F	tamaño de la apertura de filtración (mm)
$P_{0.002}$	porcentaje en peso de partículas inferiores al tamiz de 0.002 mm (“NUEVO”)
$P_{0.08}$	porcentaje en peso de partículas inferiores al tamiz de 0.08 mm (“NUEVO”)
q	caudal (cm ³ /s)
R	número de Reynolds
s	segundo
$S.I.$	sistema internacional de unidades
t	tiempo
T_v	tiempo de compactación por vibración (s) (“NUEVO”)
v	velocidad (m/s)
V	volumen
w	humedad (%)
W	peso (g peso ó N)
w_L	límite líquido (%), también en español: LL
w_p	límite plástico (%), también en español: LP
w_s	límite de retracción (%)

δ	<i>tamaño de flóculo</i>	<i>(mm ó micras)</i>
ϕ	<i>ángulo de rozamiento</i>	<i>(grados sexagesimales)</i>
γ	<i>peso específico</i>	<i>(g/cm³ ó N/m³)</i>
γ'	<i>peso específico sumergido</i>	
γ_d	<i>peso específico seco</i>	
γ_w	<i>peso específico del agua</i>	
τ	<i>esfuerzo cortante</i>	<i>(MPa)</i>

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación de la Tesis Doctoral

La técnica presística mundial ha experimentado un espectacular avance durante el siglo XX, y en particular a partir de la mitad de siglo.

Los avances han sido tales que prácticamente se puede afirmar que hoy en día es técnicamente posible construir una presa en casi cualquier tipo de terreno, habiéndose resuelto razonablemente problemas como la cimentación en terrenos kársticos, o fuertemente diaclasados e incluso de muy reducida capacidad portante.

A pesar de que las presas pueden considerarse, hoy por hoy, de las construcciones más seguras, por su bajísimo índice de rotura, sigue habiendo algunos aspectos que no han quedado completamente resueltos. En el caso concreto de las presas de materiales sueltos destacan los siguientes problemas: la evacuación de avenidas extraordinarias y la protección frente a la erosión interna; de forma que éstos son las causas más frecuentes de fallo en este tipo de presas.

Para luchar frente a la erosión interna, actualmente las presas de materiales sueltos suelen estar dotadas de filtros granulares o de geotextiles en las interfases entre los suelos de grano fino y los de grano grueso, diseñados con tal margen de seguridad que son muy pocos los casos de fallos recientes por esta causa.

En el caso concreto de los filtros granulares, la investigación desarrollada en todo el mundo ha conseguido grandes avances, aunque aun quedan algunas cuestiones que no han sido resueltas de forma completamente satisfactoria, unas veces porque los distintos autores que las han estudiado no han llegado a un acuerdo general y otras veces porque no han sido ni siquiera estudiadas hasta el momento o aun no es posible ofrecer resultados aceptables.

Así por ejemplo, se puede asegurar que el fenómeno de la erosión interna en suelos no cohesivos está bastante bien estudiado, habiéndose presentado incluso modelos numéricos suficientemente ajustados, sin embargo no ocurre así en el caso de los suelos cohesivos, ya que su comportamiento es mucho más complejo.

Precisamente, la idea de iniciar la presente investigación surgió cuando el autor de la misma trabajó en la Asistencia Técnica a la Dirección de Obra de la Presa del Portillo, (río Castril, Granada), de materiales sueltos con núcleo de arcilla vertical y filtros granulares.

Al realizar las comprobaciones de los filtros se observó que los criterios que habían sido empleados en su diseño, aunque sancionados por la práctica, eran excesivamente simplistas puesto que no consideraban la influencia de otras variables que no fueran la granulometría del filtro y del suelo base. Por ejemplo, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares de la obra fijaba la compactación del filtro por razones meramente resistentes y la permeabilidad por cuestiones de drenaje, sin tener en cuenta la posible influencia de estas variables en la capacidad del filtro para retener partículas erosionadas.

Aun con la certeza de que los filtros de la Presa del Portillo habían sido correctamente diseñados, cumpliendo con creces las condiciones más exigentes, se consideró interesante profundizar en el tema.

Con anterioridad se habían realizado experimentaciones en laboratorio en presas cercanas como las de Canales, Benínar y Guadalquivir habiéndose obtenido resultados muy interesantes por lo que se consideró que podía ser viable realizar una investigación más profunda sobre la cuestión, centrándose específicamente en los suelos base cohesivos, por ser muy abundantes en las presas españolas y sin embargo estar poco estudiados.

Se pretendía responder a algunos interrogantes como ¿son válidos los criterios de diseño actuales?, ¿qué margen de seguridad ofrecen?, ¿existen otras variables aparte de las ya conocidas que tengan una influencia significativa?.

La importancia del fenómeno de la erosión interna y el diseño de los filtros granulares, así como la posibilidad de realizar aportaciones originales a la ciencia y la técnica justificaron la realización de la presente Tesis Doctoral.

1.2 Contenido y alcance de la investigación

En el **presente capítulo** se realiza una breve introducción para justificar el interés por iniciar la presente investigación y se describe de forma concisa el contenido de cada uno de los capítulos de la Tesis Doctoral.

En el **capítulo 2** se realiza una revisión de los conocimientos actuales sobre el tema de la erosión interna y en particular, sobre el empleo de filtros granulares para bases cohesivas, intentando estudiar por separado el efecto de cada una de las variables que influyen en el fenómeno y comparar los resultados y recomendaciones de distintos investigadores. Finalizada esta revisión de conocimientos, se analizan las limitaciones del estado actual de la técnica lo que permite definir con precisión el objeto fundamental de la investigación y el consiguiente enunciado del título de la Tesis Doctoral.

A continuación, en el **capítulo 3**, se trata de exponer, de forma clara y concisa, los objetivos de la presente investigación, jerarquizándolos en objetivos general, principales y secundarios.

En el **capítulo 4** se explica la metodología seguida en toda la investigación, especificando el método de ensayo elegido, así como sus variantes; y las muestras ensayadas. También se explican razonadamente los parámetros y variables estudiados así como la estructuración en fases de la investigación.

Explicada la metodología se pasa a una primera fase de la investigación que se describe en el **capítulo 5**: la Preparación y el Ajuste del Ensayo, como fase previa para poner en orden todo el material necesario, así como verificar el comportamiento de la instalación y las normas para la realización de los ensayos.

A continuación se inicia la *Investigación de Choque*, descrita en el **capítulo 4**, en la cual se pretende ir abriendo camino a la *Investigación de Fondo*, de manera que, con un reducido número de bases ensayadas, se puedan seleccionar aquellas variables que precisan de un estudio más extenso o descartar aquellas que no hayan ofrecido información de interés.

Finalizada la *Investigación de Choque*, en el **capítulo 7** se plantea la necesidad o no de modificar las condiciones de partida, tanto en lo que se refiere a los objetivos como a la metodología.

Gracias a los resultados de la *Investigación de Choque* y una vez actualizadas las condiciones de partida, se puede pasar a la siguiente fase; la *Investigación de Fondo*, descrita en el **capítulo 7**. En esta fase se desarrolla por completo la experimentación, alcanzando todas las muestras disponibles y todas las variables estudiadas

Las conclusiones más interesantes obtenidas en la investigación se recogen en el **capítulo 9** y a continuación, en el **capítulo 10**, se plantean las posibles líneas futuras de investigación.

Por último, en el apartado de **Referencias y Bibliografía** se exponen no sólo las referencias bibliográficas contenidas en la presente Tesis Doctoral, sino también una amplia selección de trabajos publicados sobre el tema para quien desee profundizar en estas cuestiones.

Finaliza la Tesis Doctoral con algunos **anejos** en los que se adjunta información de interés pero que por su amplitud no ha sido introducida en el cuerpo del texto para facilitar una lectura más fluida en la medida de lo posible.

2 REVISIÓN DE LOS CONOCIMIENTOS

2.1 La erosión interna en presas de materiales sueltos

2.1.1 Descripción del fenómeno de la erosión interna

La estabilidad de una presa de materiales sueltos se refiere no sólo a su conjunto, sino a cada una de las partes y/o materiales que la forman. Esta estabilidad tiene tres exigencias distintas:

- *Estabilidad estática:* la presa debe mantener su estructura en condiciones de servicio frente a las distintas acciones estáticas como peso propio, empuje hidrostático, subpresión, etc.
- *Estabilidad dinámica:* la posibilidad de que la presa se vea sometida durante su vida útil a un movimiento sísmico obliga a diseñarla para que mantenga su seguridad dentro de unos niveles aceptables aun en esta situación.
- *Estabilidad interna:* supone que los materiales que componen la presa, precisamente por ser “suelos”, no deben migrar arrastrados por el flujo de agua de forma que puedan dar lugar a un fenómeno de colapso o incluso una fuga de agua tan importante que, aparte de su peligrosidad, pueda suponer una merma de funcionalidad de la presa.

Históricamente se le ha prestado mayor atención al primer apartado, ya que inicialmente no se consideraba la posibilidad de que apareciese una erosión interna, sin embargo, desde principios del siglo XX, se conoce perfectamente que cuando entra en carga una presa de materiales sueltos, la presión hidrostática da lugar a la formación de un gradiente hidráulico y al establecimiento de una filtración generalizada.

Bravo (1995) señala como posibles vías de filtración las siguientes:

- Las laderas o el fondo del embalse, con salida aguas abajo de la presa. Su posibilidad habrá de afrontarse en los estudios geológicos y geotécnicos de la cerrada y del vaso y sus soluciones están al margen de lo que se considera en esta investigación: tratamientos del terreno, pozos de descarga, empleo de filtros si es necesario, etc.
- Las laderas o el fondo del embalse, con salida bajo el espaldón permeable de aguas abajo de la presa: si existe posible problema de arrastre de partículas, habría que considerar la conveniencia de colocar, durante la construcción, filtros adecuados bajo la escollera. Así se hizo, por ejemplo, en la Presa de Canales con unas laderas de arenisca, que en principio no presentaban ningún problema. Después se presentaron filtraciones y arrastres de los finos de algunas zonas de la arenisca con salida a los túneles, que se cerraron adecuadamente.
- El núcleo de la presa, con salida a través del contacto con la cimentación, si ésta presenta fracturas o diaclasas abiertas o que puedan abrirse. Hay que tratar el apoyo del núcleo de forma adecuada.
- El núcleo de la presa con salida a los filtros de aguas abajo, que deben ser adecuados y suficientes.
- A través de los contactos del núcleo con obras de fábrica u otro tipo de estructuras.

Si la presa está correctamente diseñada y el gradiente hidráulico no es excesivo, esta filtración no supone en principio ningún problema, ya que la fuerza de erosión no es capaz de arrastrar a las partículas de suelo y además, aun en el caso de que esto fuera posible, estas partículas no deberían encontrar una vía de escape.

La migración de partículas no puede evitarse evidentemente de una forma absoluta. Siempre habrá que tolerar una mínima cuantía de movimiento de partículas. Pero

este movimiento, por pequeño que sea, si no termina pronto en una condición de equilibrio, acabará produciendo la erosión interna de la presa con daños graves que pueden llegar a su rotura.

Aun hoy en día, a pesar de que se ha avanzado mucho en el conocimiento sobre el fenómeno de la erosión interna, este tema sigue siendo marginal en lo que respecta a los esfuerzos que se suelen realizar en la fase de diseño y construcción de una presa de materiales sueltos. Sin embargo, la probabilidad anual de fallo debido a la erosión interna en una gran presa moderna durante su período de funcionamiento es de 10^{-5} aproximadamente, ligeramente inferior que la probabilidad de fallo por sobrevertido y 10 veces superior a la probabilidad de fallo de la estabilidad estática, Fry et al. (1.997).

A continuación se va a hacer un breve repaso al actual conocimiento sobre la erosión interna, empezando por estudiar qué mecanismos permiten producir el “arranque” de una determinada partícula de suelo, venciendo las fuerzas que se oponen a ese desplazamiento y los posibles mecanismos de transporte de dicha partícula.

2.1.2 Mecanismos de arranque de partículas

Al paso del agua a través de la presa o del cimientado, se producen unas fuerzas de acción y reacción: por un lado, las partículas de suelo se oponen al paso de agua dando lugar a una pérdida de energía y a su vez ésta actúa sobre las partículas intentando moverlas. En el caso de que las fuerzas desestabilizadoras no sean suficientes, el resultado es que se mantiene la estabilidad interna y tan sólo se produce una pérdida de carga en el flujo.

Pero si son las fuerzas desestabilizadoras las que superan a las resistentes, (peso, cohesión, rozamiento interno y bloqueo entre partículas), la partícula es arrastrada.

En este caso, las partículas más finas, por su menor peso y una disminución de la cohesión y el rozamiento al estar saturadas, son más fácilmente arrastrables y además

encuentran un camino más fácil entre los poros o huecos dejados entre las partículas más gruesas. Esto puede ocasionar una fuga localizada con pérdida de finos que puede llegar a ser progresiva.

Fry et al. (1.997) establece 6 posibles modos por los cuales una partícula o grupo de ellas puede ser arrancado y desestabilizado:

Si sobre las paredes o lecho de un canal el esfuerzo cortante debido al flujo de agua supera un cierto valor que Shields (1936) denomina *tensión crítica*, las partículas son arrastradas. La tensión tangencial es proporcional a la densidad y al cuadrado de la *velocidad crítica* o *velocidad de fricción* del fluido. Por su parte, el valor de la *tensión crítica*¹ es proporcional al diámetro de la partícula, en el caso de suelos no cohesivos, pero aumenta considerablemente en el caso de los suelos cohesivos

Cuando se supera la velocidad crítica de arrastre, el agua es capaz de arrancar partículas del suelo, pero en el caso de suelos cohesivos, no lo hará como partículas elementales sino en forma de grumos, debido a la atracción entre las partículas que forman cada grumo.

Una vez arrancada una partícula, su transporte es muy similar si se trata de suelo cohesivo o no cohesivo.

Fry et al. (1.997) describen otro modo de arranque de partículas que denomina *erosión regresiva* y tiene lugar en aquellos casos en que la línea de saturación corta a la superficie libre de la presa o la ladera. En dicha superficie libre hay una cuña de material que está sometido a la subpresión y a las fuerzas hidrodinámicas. Si el gradiente hidráulico y la velocidad de flujo son suficientemente altas, se puede producir el desprendimiento de una partícula y el fenómeno puede propagarse hacia aguas arriba.

¹ Los términos de *velocidad* y *tensión críticas* se definen más detalladamente en el apartado “Otras teorías sobre la erosión y transporte de partículas”

Si el suelo es homogéneo, esto continúa hasta el embalse produciéndose lo que se conoce por *sifonamiento*. En el caso de que el suelo sea heterogéneo, la progresión se puede detener donde se reduzca el gradiente hidráulico, pero una subida del embalse puede reactivar la erosión regresiva.

Existe otro modo de erosión interna que puede aparecer en el caso de fisuras o diaclasas rellenas de un material generalmente de grano fino. En el primer momento que reciben la carga hidráulica, el flujo puede verse dificultado por la baja permeabilidad, pero el aumento del nivel del embalse y la consiguiente subida de presión pueden producir que el esfuerzo cortante alrededor del volumen del suelo quede descompensado produciéndose lo que Fry denomina en francés “*le débouillage*” y que puede ser traducido al español como *reventón*. Producido este reventón el agua puede fluir libremente.

También es posible producir el arranque de partículas por *boyancia*, que se produce cuando estas partículas de suelo se encuentran en un medio completamente saturado y la presión de agua anula la tensión efectiva.

Existe también un proceso físico – químico de arranque de partículas que consiste en la *disolución*, por la cual es posible que parte de los constituyentes del suelo desaparezcan bajo fuerzas químicas o térmicas. Precisamente, durante la construcción del núcleo de arcillas de la Presa del Portillo (Granada, España), en la época invernal se tuvo que suspender en ocasiones el extendido de arcilla cuando las bajas temperaturas amenazaban con la posibilidad de congelar el agua contenida en el suelo, ya que esto imposibilita una correcta compactación y además, cuando se produjese la descongelación de estos pequeños cristales de hielo, se quedarían sus huecos y la arcilla podría ser fácilmente erosionable.

Por último, Fry et al. (1.997) describe el proceso denominado *defloculación* según el cual, bajo ciertas acciones físico-químicas se puede producir una rotura de los flóculos del suelo disgregándose en partículas de inferior tamaño y por tanto más fácilmente erosionables. Esto es lo que ocurre con las arcillas dispersivas y de ahí el

gran cuidado que hay que tener cuando aparece este material en la construcción de una presa.

2.1.3 Mecanismos de transporte de partículas

En función de la naturaleza del transporte de partículas se pueden distinguir dos tipos de erosión interna en presas de materiales sueltos:

- *Sifonamiento*²
- *Sufusión*³

2.1.3.1 Sifonamiento

En este caso el transporte se realiza de forma concentrada a través de un conducto por lo que las velocidades suelen ser muy altas y pueden aparecer fenómenos de transporte de sedimentos por saltación y arrastre de carga de fondo. Esto da lugar a que cuando aparece el sifonamiento, si no se para inmediatamente, frecuentemente se produzca la rotura de la presa.

El sifonamiento puede tener lugar cuando exista una serie de poros conectados entre sí hasta el paramento de aguas arriba de forma que al llenarse el embalse es inevitable que se produzca una filtración destructiva.

Pero para que aparezca el sifonamiento no es imprescindible que exista previamente este conducto, basta que la filtración encuentre un cierto número de puntos débiles, como pueden ser zonas heterogéneas, zonas de contacto con obras de fábrica, puntos donde la fracturación hidráulica es inminente o incluso capas permeables en el cimiento que no han sido detectadas; para que el gradiente hidráulico a través de esas zonas sea mucho mayor que el esperado, pudiendo producirse los mecanismos

² Traducción del término inglés "*piping*" que está generalmente aceptada por los presistas españoles, aunque a veces se emplea directamente el término foráneo.

³ Adaptación del término inglés "*suffusion*" que a su vez deriva del latín "*sub*" (bajo) y "*fundere*" (verter). En español se empieza a usar "*sufusión*", (Vallarino 1.998)

de arranque antes mencionados. Si no hay alguna restricción que impida ese fenómeno, la erosión progresa rápidamente formando un pasaje continuo.

2.1.3.2 Sufusión

En este caso el transporte de partículas se produce entre los poros del medio. Por esa razón las velocidades son menores y predomina el transporte por suspensión. Por otra parte, al ser más lenta, es también progresiva y se puede actuar antes de que se tienda al fallo de la presa.

La sufusión puede aparecer en la interfase de dos medios que no sean autoestables por lo que el flujo arrastra a las partículas más finas entre los huecos dejados por las más gruesas. Por lo tanto se produce una erosión selectiva, que puede tener lugar en el interior de un mismo medio poroso, denominándose sufusión interna, o en el contacto entre dos medios diferentes, entonces denominada sufusión externa o de contacto.

El término *sufusión* es equivalente a una inestabilidad interna o autosifonamiento de la base, tal y como más adelante se denomina.

2.1.4 Otras teorías sobre la erosión y transporte de partículas

2.1.4.1 Introducción

En los apartados anteriores se ha estudiado el fenómeno de la erosión interna desde el enfoque que se puede denominar “geotécnico” ó “presístico”, en el que se le presta atención fundamentalmente a los factores que pueden dar lugar a la aparición de situaciones de inestabilidad como fisuración, presiones intersticiales descompensadas, etc. dando por sentado que a partir de un cierto gradiente hidráulico y por ende de una determinada velocidad de flujo, las partículas más finas del suelo pueden ponerse en movimiento iniciándose la erosión.

Casi todos los investigadores se sitúan en la hipótesis de suponer unas condiciones hidrodinámicas severas y confiar el éxito de la protección a condicionantes de tipo geométrico, Sherard et al (1.984b). Precisamente Vaughan (1.995), en sus conferencias en el Imperial College de Londres, critica el excesivo gradiente hidráulico empleado por Sherard y por su parte, Maranha Das Neves (1989) emplea en sus ensayos gradientes mucho más reducidos.

Ante ese desacuerdo, resulta interesante prestar atención precisamente a aquellos mecanismos que pueden llegar a arrancar una partícula del suelo al que pertenece y ponerla en movimiento, así como los mecanismos de transporte y estudiarlos desde un punto de vista “hidrodinámico”.

2.1.4.2 Teorías sobre la erosión y el transporte en cauces naturales

Existen bastantes estudios sobre erosión y transporte de sedimentos en cauces naturales, (Tragsa et al., 1.998), en los cuales se suele distinguir entre suelos cohesivos y no cohesivos, sin embargo no es posible la extrapolación directa de sus resultados al estudio de la erosión interna en presas de materiales sueltos por distintas razones:

- La erosión interna se produce casi exclusivamente en régimen forzado y no en régimen de lámina libre.
- El fenómeno antes comentado del sifonamiento sí supone la existencia de un conducto que podría ser asimilable a un régimen en presión, sin embargo, el fenómeno de la sufusión consiste en una “filtración” más que una “escorrentía” y por lo tanto es completamente diferente.
- La pendiente geométrica de los cauces naturales es una variable fundamental en el proceso, sin embargo en la erosión interna es imposible fijar su valor.

A pesar de estas limitaciones, sigue resultando interesante hacer un repaso a las teorías sobre erosión y transporte de sedimentos en cauces naturales porque al menos permite destacar las variables que influyen en el proceso⁴.

La hidráulica clásica distingue entre **flujo monofásico**, compuesto únicamente por la fase líquida y flujo bifásico, al cual se le añade la fase sólida correspondiente a los sedimentos. También es posible considerar **flujo trifásico**, al que se le añade el aire, pero éste tiene poca importancia en los fenómenos de erosión interna.

Respecto al **flujo monofásico**, se suelen establecer las hipótesis de contorno rígido, fluido newtoniano, ausencia de emulsión o arrastre de aire, y acción gravitatoria.

Para determinar las características del flujo se emplean las ecuaciones de la conservación de la energía, la de continuidad y la de equilibrio dinámico. En esta última ecuación es importante evaluar la pérdida de energía debida al rozamiento con el lecho que puede calcularse con la conocida fórmula de Manning-Strickler.

En el contacto del fluido con el lecho, la tensión tangencial se emplea en vencer el rozamiento y en el empuje hidrostático sobre las partículas móviles, mientras que en el interior del fluido provoca los movimientos de las partículas entre sí. Si la viscosidad es suficiente para soportar a la tensión tangencial, el flujo es laminar, en caso contrario es necesario un efecto de turbulencia para compensar ese exceso. El carácter laminar o turbulento del flujo tiene mucha importancia en los mecanismos de erosión y transporte.

En cuanto a la fase sólida, (las partículas erosionadas), hay que distinguir entre **suelos cohesivos** y **suelos no cohesivos** o granulares.

En el caso de los **suelos cohesivos**, las partículas están unidas entre sí por la fuerza de la cohesión y al ser generalmente muy finas, su peso es casi despreciable. Si una

⁴ En el apartado dedicado a “modelización matemática” se comentará el actual estado de una técnica muy reciente que trata de simular conjuntamente todo el proceso de erosión-transporte-intercepción específicamente aplicado a la erosión interna en presas de materiales sueltos

partícula elemental es desprendida, desaparece el efecto de la cohesión, pero frecuentemente lo que se consigue arrastrar es un agregado de pequeñas partículas o grumo. Este agregado se comporta externamente como una partícula no cohesiva. Por ello hay que considerar la adhesión entre partículas, la resistencia a esfuerzo cortante, la composición granulométrica, la mineralogía y la plasticidad.

El estudio de los **suelos no cohesivos** es mucho más sencillo y en este caso las características más importantes son el peso específico de las partículas, su forma y distribución granulométrica, el ángulo de rozamiento interno y la densidad del conjunto.

Para que la fuerza tractiva del flujo de agua sea capaz de iniciar el arrastre de sedimentos es preciso que se superen unas determinadas condiciones que se suelen denominar *críticas*. Son muchos los autores que han establecido distintos criterios para definir este estado.

Unos criterios se basan en la **velocidad de flujo**, así por ejemplo, Quesnel (1.963) establece un método teórico basado en el equilibrio de fuerzas que concluye con que la *velocidad crítica*⁵ depende del volumen de la partícula, su sección máxima y el coeficiente de rozamiento de las partículas entre sí. Schafernak (Tragsa et al. 1998) determinó empíricamente que la velocidad crítica de arrastre tiene un valor que oscila entre 0.45 m/s para arena fina sin coloides y aguas claras, hasta 1.98 m/s para guijarros gruesos sin coloides y aguas con arena y detritus. Para el caso de arcilla compacta muy coloidal, que sería semejante al caso de las presas de materiales sueltos con núcleo de este material, la velocidad crítica oscila entre 0.91 m/s y 1.51 m/s, según el contenido de sólidos del agua.

Otros criterios se basan en la **tensión de arrastre** ejercida por el agua sobre el fondo del lecho, que depende del peso específico del agua, la carga hidráulica y la pendiente. El valor de la *tensión crítica de arrastre*, para suelos no cohesivos, depende del ángulo de rozamiento interno de las partículas, la granulometría, la

forma y el volumen. Para este tipo de suelos, Shields (1936), Lane y Carlson (1953) (Referenciado en Tragsa et al. 1998) y Miller (1977) han obtenido fórmulas que expresan la tensión crítica de arrastre en función del peso específico y el diámetro de la partícula.

Para el caso de los suelos cohesivos, el modelo de Dunn tiene en cuenta el esfuerzo cortante admisible del material y la plasticidad.

Una vez que ha sido arrancada una partícula, se puede transportar en *suspensión* o por *acarreo*, no habiendo una brusca discontinuidad entre estos dos procesos, ya que una partícula puede comenzar su transporte por acarreo y elevarse en la masa fluida, siendo entonces transportada en suspensión y el proceso se puede repetir dependiendo de la turbulencia de la corriente y su distribución.

Quesnel (1963), considera que las partículas inferiores a 1 micra son transportadas en suspensión incluso con régimen laminar, mientras que un régimen de gran turbulencia es capaz de llevar en suspensión partículas del tamaño grava, (hasta 30 mm).

Por tanto, en el caso de la erosión interna con sifonamiento a través de suelos cohesivos, el mecanismo de transporte predominante es la suspensión.

Entre los métodos que tratan de evaluar el transporte por suspensión se pueden distinguir los que se basan en la **velocidad de la corriente**, los que se basan en la **turbulencia** y los basados en las **teorías de la difusión-dispersión**.

El primero en estudiar el transporte basado en la **velocidad** fue Dupuit, que estableció la teoría de que la fuerza ascensional que mantiene a la partícula es debida a la diferencia entre la magnitud de las velocidades de los filetes líquidos adyacentes a ésta.

⁵ velocidad por debajo de la cual no hay erosión

Por otro parte, Jasmund (1918, Ref. en Tragsa et al 1998), establece que la suspensión es debida a la turbulencia producida por la presencia de vórtices originados por la rugosidad del lecho.

Por último, en la actualidad se considera más adecuado emplear las teorías basadas en la **difusión-dispersión** que tienen en cuenta la concentración de materiales, la velocidad del fluido y un coeficiente de dispersión.

Es importante insistir de nuevo en que estas teorías son sólo válidas para cauces naturales en régimen de lámina libre, pero se puede concluir que en el caso específico de la erosión interna, sin bien es de esperar que la formulación matemática tenga expresiones diferentes, los principios básicos y la identificación de las variables más influyentes sí pueden ser extrapolables en primera aproximación.

2.1.4.3 Erosión interna en suelos cohesivos

El caso específico de la erosión interna de suelos cohesivos es mucho más complejo que el comentado anteriormente para cauces naturales y suelos no cohesivos y de ahí que el conocimiento actual sobre esta cuestión siga siendo un campo abierto a nuevas aportaciones.

En 1955, Davidenkoff estableció un modelo para la determinación de las fuerzas que actúan en la interfase entre el suelo base⁶ y el filtro granular. Este investigador simuló el filtro mediante partículas esféricas de igual diámetro dispuestas en un estado suelto, sin compactación.

El agua procedente de la filtración a través del suelo base trata de arrastrar partículas de la fracción más fina de éste e introducirlas en el filtro. Estas partículas son movilizadas si las fuerzas debidas a la filtración superan la resistencia a tracción del suelo base en la interfase. Considerando que la resistencia a tracción es constante y

⁶ En la presente investigación se emplea el término “*suelo base*” para designar al suelo, generalmente de grano fino, susceptible de erosión y por tanto que necesita la protección de un filtro. Se emplea esta

que su dirección coincide con la de las fuerzas de filtración, el coeficiente de seguridad frente a la erosión se define como:

$$\eta = \frac{S \cdot c_0}{(G \cdot \cos \alpha + F_s)} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde:

S = área de acción, c_0 = resistencia a tracción, G = peso sumergido de la partícula de suelo base ($G = V \gamma'$), F_s = resultante de las fuerzas de filtración ($F_s = V \gamma_w i$), $\cos \alpha$ = inclinación del filtro

Puesto que el área crítica es semiesférica, su diámetro corresponde con el diámetro del poro, (D_p). El coeficiente de seguridad frente a la erosión se expresa como:

$$\eta = \frac{6 \cdot c_0}{D_p \cdot (\gamma_w \cdot i_a + \gamma' \cdot \cos \alpha)} \quad \text{Ecuación 2}$$

Por lo tanto, el coeficiente de seguridad frente a la erosión depende de la resistencia a tracción, el tamaño del poro del filtro y las fuerzas de filtración. El peso del suelo colabora a favor o en contra de la erosión dependiendo de la dirección del flujo.

Rehfeld (1967) amplió el modelo de Davidenkoff que había sido inicialmente presentado en 1955, sustituyendo las partículas semiesféricas por esferas completas de forma que ya sí se tiene en cuenta el bloqueo entre las partículas finas del suelo base y el filtro. Rehfeld mantuvo intactas todas las ecuaciones de Davidenkoff, pero al llegar a la expresión del coeficiente de seguridad frente a la erosión, éste queda dividido por 4.

En otra aproximación al fenómeno, Zaslavsky y Kassiff (1965) introducen una expresión para la resistencia a tracción del suelo derivada del estado tensional

terminología general porque es aplicable a cualquier tipo de suelo, (arena, limo, arcilla, etc.), independientemente de su naturaleza o granulometría.

tridimensional, (las expresiones anteriores se obtuvieron para un estado bidimensional):

$$\sigma_t = \frac{c'}{\tan \phi'} \quad \text{Ecuación 3}$$

Zaslavsky y Kassiff (1965) consideran que debido a la energía de compactación, el suelo ya tiene alguna cohesión para tensiones bajas, lo cual se ha verificado mediante el ensayo triaxial. Sin embargo, estos investigadores han observado que el tamaño del poro del filtro no tiene ninguna influencia en el comportamiento frente a la erosión del suelo cohesivo y que éste no falla completamente, sino más bien en forma de agregados de partículas de arcilla.

Wolski (1965) ha estudiado los problemas de erosión de una arcilla limosa introduciendo Pb_3O_4 como trazador, de forma que se puede detectar el comportamiento deformacional del suelo mediante rayos x. Respecto al proceso de erosión en arcillas limosas obtiene las siguientes conclusiones: (i) en la primera fase del proceso filtración – erosión se forman cavidades en el suelo base sobre los poros del filtro que se pueden mantener estables por efecto arco y por cohesión, (ii) la segunda fase está caracterizada por la pérdida de suelo base dentro del filtro, apareciendo zonas alteradas que pueden iniciar el sifonamiento.

De los estudios anteriores se puede concluir que para erosionar suelos cohesivos en contacto con filtros granulares se necesitan gradientes hidráulicos muy altos y que los factores gobernantes del mecanismo de erosión son la resistencia a tracción o la cohesión del suelo base, el tamaño de los poros del filtro y la fuerza de filtración.

Müllner (1992) ha estudiado la resistencia a la erosión de suelos cohesivos indicando las variables que tienen influencia en este proceso como son: las variables geométricas (granulometría del suelo base y la granulometría, porosidad, formas de los granos, homogeneidad y espesor del filtro) y las variables hidráulicas (presión, cohesión y ángulo de rozamiento del suelo base, densidad de las partículas, fuerzas

resistentes, tamaño de los poros del filtro, etc.). Este investigador ha estudiado el mecanismo de erosión de suelos cohesivos tanto mediante un modelo de elementos finitos como por ensayos directos de laboratorio.

Müllner (1992) define el coeficiente de seguridad contra la erosión de la siguiente forma:

$$\eta_E = \frac{3.4 \cdot c'}{D_p \cdot i_m \cdot \gamma_w} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde: η_E = coeficiente de seguridad frente a la erosión, c' = cohesión efectiva, D_p = tamaño del poro, i_m = gradiente hidráulico medio, γ_w = peso específico del agua.

Sin embargo, realizando un ensayo de erosión en laboratorio, el coeficiente de seguridad obtenido es diferente (un 20% menor que el obtenido por elementos finitos):

$$\eta_E = \frac{3.4 \pm 0.4 \cdot c'}{D_p \cdot i_a \cdot \gamma_w} \quad \text{Ecuación 5}$$

siendo: $c' = c_0 \tan \phi'$.

Como se puede ver, la erosión de suelos cohesivos es efectivamente diferente de la de los suelos granulares ya que los primeros presentan mayor resistencia a la erosión debida a su cohesión.

Este detalle es importante resaltarlo porque la mayoría de las investigaciones realizadas hasta la fecha se refieren a suelos no cohesivos.

Si se considera a continuación una sola partícula de suelo base arrastrada por el flujo de agua hacia la interfase base-filtro, al llegar a ella se encuentra con una estructura de filtro formada por partículas de distintos tamaños y poros que dan lugar a sinuosos caminos de filtración definidos por lo que se denomina tamaño de constricción de control (Kenney 1985).

Si la partícula fuese esférica, siempre que el diámetro de ésta sea inferior al del poro, será capaz de atravesarlo penetrando en el filtro hasta encontrarse con una constricción que la atrape, de no ser así, la partícula logra escapar y por lo tanto el filtro no es efectivo ya que se puede producir una ruina del núcleo por erosión progresiva.

En principio el fenómeno es puramente geométrico, pero parece lógico pensar que la velocidad del flujo tenga cierta influencia, así pues, si la partícula se acerca lentamente, dado el pequeño tamaño es posible que exista una cierta atracción con las partículas del filtro que inicialmente puede llegar a retenerla aunque su diámetro sea menor que el del poro. En cambio, si la velocidad es elevada se vencen estas fuerzas de atracción y la partícula es capaz de atravesar este poro.

Pero el fenómeno puede ser aun más complejo, se ha considerado que la partícula es esférica, pero las arcillas pueden tener forma laminar enrollada sobre si misma, por lo que dependiendo de la orientación de ésta y de la velocidad, el resultado puede ser diferente.

Si ahora se considera no sólo una partícula aislada, sino un número elevado de ellas, incluso teniendo individualmente un tamaño inferior al poro, al coincidir a la vez en la entrada del mismo, pueden bloquearse unas contra otras dando lugar a lo que a veces se denomina efecto “silo”, de forma que quede taponada la entrada del poro. Este fenómeno se asemeja bastante a lo que puede ocurrir en una evacuación de un edificio en caso de incendio: aunque las personas, una a una, quepan perfectamente por la puerta de salida, si se abalanzan todas a la vez, es fácil que queden atrapadas sin poder salir.

De nuevo se complica el fenómeno si se tiene en cuenta que en los suelos cohesivos, al ser arrancadas las partículas de suelo base en forma de grumos, cuando estos llegan a un poro de menor tamaño que el grumo, pueden ocurrir dos cosas:

- que el grumo quede atrapado y por lo tanto el poro se tapona

- que la velocidad con que el grumo llega al poro sea capaz de disgregar al grumo en partículas de menor tamaño que efectivamente sean capaces de atravesar el poro.

Este segundo proceso permite poner en duda la afirmación de Sherard (1984 y 1985) de que no hay diferencia entre arcillas dispersivas y no dispersivas ya que todas son erosionadas; porque según la naturaleza de la base, esta erosión dará lugar a partículas elementales o grumos de distinto tamaño, que difieren sensiblemente de la granulometría calculada por los métodos estándares de sedimentación, y que por lo tanto tienen un comportamiento muy diferente frente al filtro.

Aunque efectivamente, para gradientes hidráulicos muy elevados, es posible que las diferencias entre arcillas dispersivas y no dispersivas sean mínimas.

2.1.5 Teorías sobre la fracturación hidráulica

2.1.5.1 *Introducción*

Aunque la fisuración de presas de materiales sueltos había causado problemas desde los primeros días de la construcción de presas, antes de 1950 se disponía de muy poca información publicada sobre este asunto. En ese momento había algunos trabajos importantes sobre la fisuración de núcleos y pantallas de hormigón pero no se mencionaba la posibilidad de fisuración de un núcleo de tierras. Esta situación cambió rápidamente desde 1965 y en 1970 era ya bien conocido que se desarrollaban fisuras en las zonas impermeables de muchas presas y que no se necesitaban asientos muy grandes para que se produjeran fisuras. Desde entonces, las tendencias en el diseño de presas de materiales sueltos se han visto influenciadas por el esfuerzo de los proyectistas para minimizar el riesgo de fisuración potencial.

Arthur Casagrande tuvo una gran influencia al llamar la atención sobre el riesgo potencial de fisuración debida a asientos diferenciales. En 1950, Casagrande describió accidentes próximos a la rotura en dos presas de altura moderada. Una de

ellas era una presa homogénea de arcilla de unos 80 pies de altura. Se produjo una gran filtración concentrada a través de esta presa en su primer llenado. Aunque no se habían observado fisuras, Casagrande supuso que la filtración estaba ocurriendo a través de fisuras debidas a asientos diferenciales:

“Yo habría considerado esta presa perfectamente segura, si alguien me lo hubiera preguntado antes de la aparición de la filtración. Estoy seriamente preocupado por este caso que demuestra que la arcilla compactada a su humedad óptima no posee necesariamente la capacidad de seguir pequeños asientos diferenciales sin fisurarse.”

Desde esta época, se prestó más atención a la fisuración y se han escrito muchos artículos sobre la fisuración de otras presas por investigadores y presistas. Sin embargo, hay que empezar diciendo que se trataba de una creencia generalizada que para que existiera una filtración profunda debería ir acompañada de una fisuración del núcleo. Ha habido un número de casos bien estudiados, en los cuales las presas han fallado o han sido dañadas por filtraciones concentradas, sin causa aparente. En algunas de estas experiencias, como la ya citada de Casagrande, los investigadores han concluido que las fisuras por asientos diferenciales eran la causa probable, aun cuando no se veía ninguna fisura en superficie. En estos ejemplos no se pudo determinar si la fisuración se había producido antes del llenado del embalse o después.

En un número de casos reales descritos en otros informes, aparecía bruscamente una filtración concentrada en el talud aguas abajo de una presa después de llenarse el embalse (quizá varias horas o varios días después), indicando que no existía ninguna fisura antes de llenarse el embalse. Esta es una de las mayores pruebas, que se argüían, para poder concluir que, en ciertas condiciones, la presión del embalse actuando sobre el paramento de aguas arriba de una presa puede originar la apertura de grietas cerradas o la formación de algunas nuevas.

Probablemente, el primer reconocimiento y prueba substancial de que se podían abrir grietas en los núcleos de presas por la presión de los fluidos de inyección fue en 1965, analizando lo sucedido en la presa de Djatiluhur. Después se ha demostrado que este hecho ha ocurrido en numerosas presas.

En opinión del propio Sherard existían sólo tres casos en los cuales los investigadores habían concluido que las fugas concentradas se habían desarrollado probablemente en grietas abiertas por la presión del agua del embalse. Estas eran la presa de Balderhead, la de Hyttejuvet y una serie de pequeñas presas en Oklahoma y Mississippi.

La posibilidad de que podían formarse grietas en depósitos de suelo por la presión del fluido intersticial había sido comprendida y aplicada durante más de quince años por los especialistas en inyección, especialmente en Europa. Se empleaban, a veces, presiones relativamente muy altas. Algunos pozos de exploración de prueba realizados en los suelos inyectados han demostrado que en muchos casos las presiones de inyección eran lo suficientemente altas para abrir grietas en el suelo alrededor de los agujeros de inyección formando delgadas láminas de lechada endurecida.

2.1.5.2 La fracturación hidráulica

En un artículo publicado en 1973 por Sherard, el autor opinaba que se había demostrado, más allá de toda duda razonable, que se habían producido fugas concentradas en presas de materiales sueltos, a través de grietas que no estaban abiertas antes de subir el nivel del embalse.

"Esta conclusión está soportada hoy a la vez por el considerable número de experiencias que son difícilmente explicables de otra manera y por consideraciones teóricas.

En los pasados estudios sobre fisuración sólo se han considerado dos extremos: (1) se desarrollan grietas abiertas a través del núcleo y (2) el núcleo permanece sin fisurar. Debe existir también una condición intermedia en la cual la fisuración es inminente. Cuando el relleno se deforma por asientos diferenciales, la tensión principal menor, en la zona de fisuración potencial, decrece y puede aproximarse a cero, puesto que la tensión principal mayor es menor que la resistencia inconfínada del suelo. Cuando la tensión principal menor se hace cero (o negativa, si el suelo puede soportar alguna tracción) llega un momento en que es inminente la formación de una fisura, y que esta se producirá si ocurre una deformación algo mayor. Aunque la grieta inicial puede ser muy estrecha, quizá aún invisible, el agua del embalse puede penetrar por ella. Como resultado de ello, la tensión que actúa en el plano de la fisura, cambia bruscamente de cero a una tensión total de compresión que podría aproximarse a la carga del embalse, si la fisura no atraviesa el núcleo. El resultado es un incremento de la anchura de la fisura. El agua puede penetrar por una fisura existente que ha sido previamente cerrada o puede formarse alguna nueva. El término "fracturación hidráulica" puede emplearse para cubrir ambas situaciones.

Desde un punto de vista práctico, se puede provocar una fisura sobre un plano dado, si la tensión efectiva que actúa sobre ese plano baja a cero; esto es, si la tensión total sobre el plano es igual o menor que la presión del embalse (suponiendo que el suelo no pueda soportar tracciones). Por tanto, la fracturación hidráulica puede existir aunque la tensión principal menor total sea una compresión.

La fracturación hidráulica puede ocurrir, incluso, en un relleno teóricamente homogéneo, pero la probabilidad de su ocurrencia es mucho mayor si el material no es homogéneo respecto de su deformabilidad y permeabilidad. La falta de uniformidad en la permeabilidad aumenta la probabilidad de que tensiones totales menores bajas puedan ocurrir localmente.

Las fugas concentradas a través de una presa producidas por fracturación hidráulica pueden ocurrir siempre que la tensión total principal menor a una cierta cota del núcleo sea suficientemente baja con respecto a la presión del agua del embalse a la misma cota. Las condiciones de tensiones internas necesarias para la fracturación hidráulica pueden estar presentes en el primer llenado del embalse o pueden desarrollarse más tarde como consecuencia de asientos diferenciales continuados.

Una de las conclusiones deducidas de los estudios de fisuras abiertas, aparecidas en la coronación de presas es que tales grietas aparecen a menudo de repente (en unas pocas horas o menos), con una anchura de un centímetro o más. El repentino crecimiento de la fisura probablemente esté ocasionado por una brusca redistribución de las tensiones del relleno cerca de la fisura. Es probable que fisuras que no han sido vistas y que aparecen después cuando se llena el embalse, puedan a veces abrirse bruscamente. Este hecho puede explicar las filtraciones concentradas relativamente grandes ocurridas bajo gradientes muy bajos a través de fisuras presuntas pero no vistas."

Del propio texto de Sherard podía interpretarse, y a ello respondía la práctica habitual, que se comparaba la tensión total de "antes" de llenar el embalse, con la presión intersticial de "después" de un cierto llenado, sin tener en cuenta que las tensiones totales reales variarán también con la subida del agua del embalse. Por otra parte, es evidente que la aparición de filtraciones concentradas se ligaba inexcusablemente a la existencia de fisuras en el núcleo.

Muchos autores han colaborado a la idea de que era posible esta forma de "fracturación hidráulica" del núcleo, aunque según opina Bravo (1995), sin darse cuenta de que estaban repitiendo el mismo razonamiento, ya entonces abandonado en las presas de fábrica, de Maurice Levy. La idea matriz era que cuando el relleno

se deforma por asientos diferenciales, la tensión principal menor, en la zona de fisuración potencial, decrece y puede aproximarse a cero.

Los fenómenos difícilmente explicables, que se han observado en presas existentes y que requieren una explicación, que no se deducían de la teoría clásica, consisten en una de las situaciones siguientes, Bravo (1995):

- Filtraciones concentradas, que aparecen pronto, durante el primer llenado del embalse, a través de presas homogéneas, bien construidas, pero sin drenajes internos y que a menudo conducen a la rotura de la presa.
- Filtraciones acompañadas de erosión, a través del núcleo central de presas construidas con filtros inadecuados, que suelen coincidir con una subida rápida de nivel en uno de los primeros embalses.
- Medida de presiones piezométricas de magnitud casi igual a la del embalse en la zona del núcleo próxima a su paramento de aguas abajo. Las perforaciones que se han hecho para confirmar estas medidas han comprobado su existencia, haciendo sospechar la presencia de fisuras más o menos horizontales en conexión con el embalse. Estas presas (Manicougan 3, por ejemplo) permanecían seguras gracias al eficaz funcionamiento de sus filtros.
- Descubrimiento de capas húmedas dentro del núcleo de algunas presas (Yard's Creek, por ejemplo) con contenido de agua mayor y una densidad menor que la de colocación, lo que no podía justificarse por otros mecanismos.

Según Sherard (1973), existían evidencias suficientes para poder establecer que se producían filtraciones concentradas a través de los materiales impermeables de las presas de materiales sueltos, por fracturación hidráulica, aún en presas, bien proyectadas y construidas que no han sufrido asientos ni movimientos extraordinarios.

Más recientemente, al comprobar la posibilidad de fracturación hidráulica en la parte más alta, y más estrecha por tanto, del núcleo del proyecto de la presa de Canales, se insistió en tener en cuenta la variación de presiones totales, y el Ingeniero de Caminos D. Santiago Uriel, del entonces Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, adoptó para el estudio tres posturas que se describen a continuación (Bravo 1995):

1º.- La postura "pesimista" supone que la presión total en el núcleo, a cualquier nivel y sobre planos horizontales, que exista al terminar la obra debe ser superior a la presión hidrostática del agua impuesta por el embalse. Está del lado de la seguridad, ya que la presión total final es mayor, puesto que el empuje del agua sobre el paramento aguas arriba del núcleo, comprime no solamente el plano del contacto, sino también incrementa el tensor de tensiones, es decir las compresiones en cualquier dirección.

2º.- La postura "optimista" señala que el incremento de la presión total debido al embalse es hidrostático en las proximidades del contacto, e igual a la carga de agua. Por lo tanto, para que no se produzca la fracturación es suficiente que la presión total al terminar la obra sea positiva, es decir, que el núcleo no quede "colgado" en su totalidad de los espaldones.

3º.- La postura "intermedia", tiene en cuenta que al producirse el embalse el espaldón de aguas arriba entra en "flotación" y al criterio optimista hay que añadir una decompresión igual a la disminución del empuje del espaldón, que pasa de una densidad seca, a otra sumergida.

Estas posturas se tradujeron en tensiones efectivas teniendo en cuenta unas tensiones totales iniciales deducidas por el método de Nonveiller, y se terminó escogiendo una anchura mínima del núcleo de acuerdo con la postura "intermedia".

Posteriormente, Uriel (1993a) matiza su anterior postura, incluyendo entre las hipótesis intermedias, que la presión del agua sobre el núcleo induzca en planos perpendiculares a su superficie, una presión igual a la del reposo.

Con todo ello resumía su postura en los términos siguientes:

“La postura del proyectista, ante la diversidad de criterios sobre el tema, tiene que ser necesariamente conservadora, habida cuenta de la importancia de esta eventual anomalía. La experiencia y la casuística es escasa. Durante la construcción y explotación, los dispositivos de auscultación que midan tensiones y deformaciones, pueden ser determinantes de las subsiguientes actuaciones y de un mejor conocimiento sobre la posibilidad de aparición de la fracturación hidráulica.

Si se tiene en cuenta que la fracturación sobre planos verticales, normales al paramento del núcleo, exige una disimetría del estado del terreno en sentido horizontal, que es poco probable, salvo irregularidades no habituales, sería recomendable, en opinión del autor de la presente comunicación, unas condiciones de diseño tales como:

- a) Un coeficiente de seguridad superior a 2 sobre planos horizontales para hipótesis intermedias como las expuestas... ..., es decir, exigir una presión σ , doble de la de equilibrio.*
- b) Coeficiente de seguridad superior a la unidad, para hipótesis pesimistas sobre planos horizontales o intermedias sobre planos verticales”.*

Esta concepción de la fracturación hidráulica, supone según Bravo (1995) que la introducción de unas determinadas presiones intersticiales en un sistema cuyas tensiones totales menores sean pequeñas, puede conducir a la fisuración por la aparición de tracciones, como tensiones efectivas, por la simple aplicación de la fórmula de Terzaghi. Si se representa este estado tensional, por ejemplo en la acostumbrada forma del círculo de Mohr, esto supone que el desplazamiento del

sistema tridimensional de tres círculos hacia la izquierda, hace aparecer bruscamente las tracciones. Antes de que eso suceda, en condiciones normales alguno de los círculos rozará la curva intrínseca y se producirá una adaptación de tensiones al plastificarse el suelo. De hecho es posible imaginar tal corrimiento hacia la izquierda para tener rotura por tracción pero sólo en condiciones muy especiales.

Es difícil reproducir esa "fracturación hidráulica" en laboratorio, sin que se trate de una auténtica rotura por tracción total, como la que se produce en los sondeos, con el "cracking".

Por otra parte, al aplicar el conjunto de presiones hidráulicas del embalse a un núcleo ya saturado para esa carga de agua, no debería suceder nada, puesto que todas las presiones hidráulicas del embalse serían iguales a las intersticiales en cada uno de los puntos del paramento del núcleo. Dejando aparte los posibles asientos por inundación de la escollera (el llamado, con poca fortuna, colapso), no habría motivo para introducir nuevas acciones en un sistema ya en equilibrio. Por ello, Bravo (1995) considera que los efectos observados y atribuidos a la fracturación hidráulica, deben achacarse más a la falta de saturación del núcleo al subir el embalse, que a la propia presión hidráulica.

Actualmente se ha afinado mucho más el concepto de "fracturación hidráulica". Soriano (1997) establece que la resistencia a la fracturación hidráulica, cuando actúa la presión neutra $-u$, puede establecerse de esta forma:

$$RHF = \sigma_3 + \beta_0 u + t \quad \text{Ecuación 6}$$

donde σ_3 es la tensión principal menor, β_0 un coeficiente que varía con la orientación del contacto y t es la resistencia a tracción de la base. Se admite, por tanto, que el aumento de la presión neutra provoca a su vez un aumento de la resistencia a la fracturación hidráulica.

Por otra parte, Uriel (1999) explica que la rotura progresiva en presas de materiales sueltos zonadas, en particular, en el contacto del núcleo impermeable con los filtros, puede favorecer también la aparición de fracturación hidráulica.

Más concretamente, Uriel (1999) señala que en este tipo de contactos, el asiento del núcleo durante la construcción puede ser mayor que el de los espaldones, como consecuencia de la diferencia de deformabilidad. Este corrimiento induce zonas plastificadas de espesor variable en las que la resistencia puede ser la residual y además puede tener también influjo sobre las presiones intersticiales que existen en el núcleo en un régimen transitorio o permanente.

La plastificación de la arcilla induce su remoldeo que favorece la orientación de las partículas arcillosas con una importante disminución de la permeabilidad en dirección normal al contacto. Por ello la pérdida de carga en la filtración a través del núcleo se concentra en las zonas plastificadas, por lo que la presión en las cercanías puede ser poco diferente de la total del embalse.

Alonso (1997) explica la divergencia entre las fracturaciones horizontales encontradas por Sherard y las, en principio lógicamente menores, compresiones horizontales. Como señala en su informe, la fracturación hidráulica o separación no puede observarse fácilmente en la práctica, pues muy a menudo no existe una observación directa del fenómeno. Su evidencia indirecta proviene de la observación de las filtraciones localizadas o de la erosión.

Los ensayos sobre fracturación hidráulica suelen utilizar un procedimiento muy análogo al "cracking" que se produce en los sondeos al aumentar la presión de inyección. En el caso del "cracking" se dan simultáneamente dos fenómenos la disminución de las presiones totales, por un efecto, que se puede llamar circunferencial, y la subida de las presiones intersticiales. Pero no es fácil concebir un ensayo, visible, donde, en una superficie plana, se produzca "fracturación hidráulica". De hecho, según Bravo (1999), en muchos ensayos de filtración sobre

bases cohesivas, se dan las condiciones de la fracturación sin que ésta se produzca nunca.

En cualquier caso, la fracturación hidráulica implica una fracturación en una superficie normal a las tensiones principales menores, que debería iniciarse en un punto para irse extendiendo más tarde por ella.

Ante estos interrogantes, Bravo (1999), introduce un nuevo concepto de lo que puede ser la "fracturación hidráulica", generalizando la intuición de Sherard sobre heterogeneidad:

En un núcleo extendido y compactado por capas, los elementos inferiores de las capas estarán, normalmente, de media, menos compactados que los de la parte superior de las tongadas; a su vez, dentro de cada capa de la tongada existe una heterogeneidad en la calidad del material, su contenido de agua, su compactación, su grado de saturación y su permeabilidad. En principio, tal como se colocan hoy día, estos materiales estarán algo por debajo de la saturación.

Cuando comienza a subir el nivel del embalse y el agua empieza a mojar nuevos elementos, penetrará más rápidamente por los elementos más permeables por lo que algunos de ellos empezarán a saturarse antes. La presión del embalse se transmite con mucha mayor facilidad por los elementos saturados que por los que no lo están y esta presión intersticial mayor, actuando sobre las vías preferenciales de filtración, disminuirá la compacidad de los elementos a presión y tenderá a hacer menos permeables y quizá a saturar en parte también a los elementos aún no saturados.

El mecanismo es muy complejo, el agua debe empezar a saturar el material del núcleo a través de una especie de "dedos" que a su vez, van descompactando el núcleo en su interior y comprimiendo el resto. En la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona parece que han detectado también esta forma de comportamiento.

Mientras la punta de los "dedos" no llega al paramento de aguas abajo del núcleo, no se establece realmente un caudal de filtración: habrá una ligera circulación de agua suficiente para ir empapando nuevos elementos, pero no se puede hablar realmente de una velocidad capaz de producir una pérdida de carga; por otra parte la presión del embalse se transmitirá más fácilmente por los elementos saturados. El resultado es que la presión del embalse puede penetrar por este mecanismo hasta cerca del paramento de aguas abajo.

Una vez que los "dedos" vayan llegando al paramento de aguas abajo, se irán estableciendo vías reales de filtración y se llegará a la distribución de presiones más o menos triangular. Si existe aguas abajo un filtro adecuado y el material del núcleo es autoestable, la filtración continuará en el estado reducido en que nació sin aumentar por no haber lugar a arrastre ni migración de partículas. En caso contrario, puede llegarse a la ruina de la obra.

Si el mecanismo es tal como se ha supuesto explicaría, según Bravo (1999), todo lo siguiente:

1. Que la "fracturación hidráulica", así concebida, se produzca durante los primeros llenados; y que dentro de ellos, pueda depender de la velocidad de subida del nivel del embalse, el que llegue o no a producirse.
2. Que no se produzca ya, una vez saturado el núcleo.
3. Que se encuentren en los sondeos algunas zonas húmedas y decomprimidas.
4. Que puedan encontrarse presiones próximas a las del embalse cerca del paramento de aguas abajo del núcleo, en las vías preferenciales de filtración.
5. Que, si las vías preferenciales de filtración alcanzan el paramento de aguas abajo del núcleo y allí no encuentran un filtro adecuado, puedan producir la rotura por sifonamiento hacia los espaldones.

6. Que si estas vías encuentran un filtro adecuado, que impida la migración de partículas, se acabe reconstruyendo el diagrama triangular de presiones, manteniéndose la presa en seguridad.

Esta nueva concepción de la "fracturación hidráulica" no exigiría, de suyo, ninguna nueva compresión mínima, si se puede prever que el llenado del embalse se haga en condiciones normales. Evidentemente, cualquier aumento de la compresión del núcleo puede redundar en una mayor seguridad.

2.1.6 Algunos ejemplos de presas que han sufrido erosión interna

La construcción de presas en el mundo se remonta muy atrás en la historia. En el antiguo Egipto, Menés construyó una presa para desviar el Nilo en Menfis hace ahora unos 6.000 años, (Vallarino 1998). Por supuesto que en la antigüedad la técnica presística se basaba casi exclusivamente en criterios empíricos, ya que no se disponía de conocimientos científicos suficientes como para poder aplicar leyes de validez general.

Entre los siglos XVII y XIX se produce una auténtica revolución del conocimiento con las aportaciones científicas y matemáticas suficientes que permiten, ya en el siglo XX, disponer de unas herramientas de cálculo de gran potencia. Sin embargo, en muchas ocasiones la excesiva extrapolación o ciertas lagunas en el conocimiento, han dado lugar a errores en el proyecto, construcción y/o explotación de presas que en algunos casos han provocado el fracaso de la obra e incluso su destrucción, causando daños muy importantes.

El Comité Internacional de Grandes Presas ha realizado un estudio estadístico sobre las roturas de presas de las que se dispone de información, (ICOLD, Bol99, 1996). Es de destacar que este estudio concluye señalando que el porcentaje de roturas de grandes presas ha decrecido en el curso de las cuatro últimas décadas, habiéndose destruido un 0.5 % de las presas construidas desde 1951.

Sin embargo es interesante resaltar que la mayoría de las roturas tiene lugar en un período de tiempo cercano a la finalización de la construcción, fundamentalmente durante el primer año de puesta en servicio.

En lo que se refiere a las presas de materiales sueltos, la causa más común de rotura es el rebosamiento por coronación, (31% como causa principal y 18% como causa secundaria), pero la erosión interna es también una de las causas más frecuentes, produciéndose la rotura por erosión interna a través del cuerpo de presa en un 15% de los casos, como causa principal y un 13% como causa secundaria; mientras que la erosión interna a través del cimientado tiene una frecuencia del 12% y 5%, respectivamente.

Estos datos ponen claramente de manifiesto el interés de estudiar el fenómeno de la erosión interna. Precisamente para un mejor entendimiento de este fenómeno, es interesante hacer un breve repaso a los problemas que se han presentado en presas de todo el mundo por esta causa⁷.

El país que ofrece más referencias de daños en presas por erosión interna es **Estados Unidos**, lo que es debido por una parte al elevado número de presas allí existentes, (6.375 presas de más de 15 metros de altura en 1996) y por otra, a la disponibilidad de este tipo de información. Así por ejemplo, en 1909 se produjo el fallo de la presa de Ashley, que si bien era una presa bóveda, sufrió erosión interna a través del cimientado. Posteriormente fallaron las presas de Fred Burr (1948), Wister (1949) y la de Stockton Creek (1950). Sobre esta última Sherard (1986) concluyó que la única causa posible de la filtración localizada que tuvo lugar fue la aparición de asientos diferenciales, aunque nunca se pudo observar ninguna grieta.

⁷ Para no ser reiterativos, a continuación se adjuntan las referencias de donde se han obtenido estos datos:

Simposio sobre geotecnia de presas de materiales sueltos. (Zaragoza, 1993)
Barrages & Reservoirs, nº6. (1997). Internal erosion. Typology, detection, repair.
ICOLD (1994). Embankment dams. Granular filters and drains. Bol.95
ICOLD (1996). Rotura de presas. Análisis estadístico. Bol.99.
Sherard Memorial Volumen (1998). Embankment dams. Sherard contributions.

El propio Sherard habla del fallo de las presas de Oklahoma y Mississippi entre 1957 y 1970, que a pesar de estar bien proyectadas y construidas, también sufrieron una filtración localizada inmediatamente después de un embalsado rápido.

Igualmente sufrieron erosión interna las presas de Yard's Creek (1963), Fontelle (1964), Churchil (1972), Teton (1976) y Navajo (1987); pero los fallos más recientes corresponden a las presas de Mud Mountain y los diques de la presa de Beaver.

La presa de Mud Mountain tenía 120 m de altura y se terminó de construir en 1941, con núcleo impermeable y espaldones de escollera. En 1980 se comprobó que las zonas de transición no eran adecuadas y no protegían al núcleo de la erosión regresiva y por ello se había producido filtraciones a través del núcleo con migración de finos. En 1989 se realizaron los trabajos de reparación.

En cuanto a la presa de Beaver, en Arkansas, es de gravedad de hormigón, pero tiene varios diques de cierre cimentados sobre terrenos kársticos. En 1966 se finalizó la construcción y en el primer llenado se observaron filtraciones de hasta 50 l/s que se redujeron a 32 l/s después de realizar nuevos trabajos de inyección. Pero en 1984 aparecieron nuevas filtraciones, esta vez con arrastre de finos, por ello se decidió bajar el embalse y realizar una pantalla impermeable en el cimiento.

Fuera ya de los Estados Unidos, pero todavía dentro del continente americano, están las presas de Battle River, Manaicougan y Hinds Lake; todas están en **Canadá**, que sufrieron distintos episodios de erosión interna. La primera de ellas, Battle River era una presa de tierras de sólo 14 metros de altura que entró en servicio en 1956, produciéndose la rotura en ese mismo año. La presa de Manaicougan falló en 1975 a causa de unas fugas concentradas que se atribuyeron a la fracturación hidráulica a pesar de que el núcleo era de limos arenosos no cohesivos, mientras que la presa de Hinds Lake se terminó en 1982 y sufrió erosión interna dos años más tarde.

Antes de terminar este repaso a las presas americanas, hay que apuntar la rotura de las presas **brasileñas** de Ema (1940) y Pampulha (1954) y la presa **mejicana** de La Laguna, que sufrió erosión interna a través del cimiento en 1969.

En cuanto al continente asiático, a pesar del elevado número de presas que hay construidas en **China**, (1.855), prácticamente no se dispone de datos sobre posibles fallos en ellas. Más importante todavía es la **India**, con 2.481 presas de más de 15 m de altura, que le hace ser el primer país de Asia en número de presas y segundo del mundo. De este país si se tienen más datos, como por ejemplo la presa de Kedar Nala, de tierras, con 20 m de altura; que sufrió erosión interna a través del cuerpo de presa en el mismo año en que se puso en explotación (1964). Tres años más tarde, en 1967, falló la presa de Nanak Sagar, por la misma causa; y en 1976 se produjo la rotura de la presa de Manivali, de características similares.

Aparte de algunos casos presentados en presas australianas y africanas, resulta interesante detenerse un poco más en Europa.

Precisamente los primeros datos sobre erosión interna a través del cuerpo de presa corresponden a la presa de tierras de Bilberry (**Gran Bretaña**), con 20 metros de altura y 90 m de longitud de coronación, que fue construida en 1945 y falló en 1952. En este mismo país se ha presentado erosión interna en la presa de Balderhead (1968), de 48 m de altura, que al embalsar por primera vez, aumentó significativamente la filtración, con arrastre de finos y aparecieron deslizamientos de tierra. Posteriormente se pudo comprobar que se había producido erosión en el núcleo impermeable y que éste presentaba signos de segregación.

También en **Yugoslavia** se presentó el problema de la erosión interna, en 1960, la presa de Ovcar Benja, del tipo bóveda, sufrió erosión a través del cimiento un año después de su entrada en servicio.

En **Suecia** tuvo lugar en 1943 el fallo de la presa de Selsfors, por causas similares a la anterior y en 1983 se vio también afectada por la erosión interna la presa de East

Suorva (Norstedt y Nilsson 1997), apareciendo un pozo de erosión en el paramento de aguas arriba. Al ser consultado Sherard sobre este fenómeno, concluyó que era debido a la peculiar susceptibilidad de los núcleos de morrena glacial, ya que al contener tanto elementos finos como gruesos sin los suficientes tamaños intermedios, al aparecer una filtración es muy probable el arrastre de las partículas más finas.

Sólo tres años más tarde, en 1987, falló la presa de Stenkullafors, por causas muy similares. Esta presa, finalizada en 1983, tenía un núcleo impermeable de morrena glacial ampliamente graduada que fue compactada del lado seco. Al embalsar se detectó una fuga localizada, encontrándose que en el núcleo se alternaban capas secas con capas muy húmedas y reblandecidas.

Después de un detenido estudio se concluyó que la morrena era internamente inestable y al compactarse por el lado seco pudo ser más susceptible de colapsar al saturarse con la subida del embalse. Por otra parte, el filtro construido era demasiado grueso y permitió una erosión excesiva del núcleo.

En cuanto a las presas **francesas**, es destacable el trabajo realizado por Fry et al. (1997) en el que se exponen numerosos casos de patologías relacionadas con la erosión interna, así como las reparaciones que se han realizado. Describe, entre otras, el fallo de las presas de Lavaud-Gelade (1944), Beaune (1961), Vallabregues (1970), Lafage (1980), Budget (1981), Gourdon (1983), Saint Aignan (1984), Vieux-Pré (1985), La Prade (1987), Sapins (1988), Saint-Egreve (1990), Saint Pardoux (1991) y los pequeños diques de Camargue (1994).

Por último queda comentar la experiencia sobre erosión interna en presas **españolas**, destacando el caso de la presa de Taibilla y la de Martín Gonzalo.

La presa de Taibilla está situada en la provincia de Albacete. Se trata de una presa de materiales sueltos con núcleo impermeable inclinado y espaldones de escollera, con una altura máxima de 40 m y 293 m de longitud de coronación.

Comenzó su puesta en carga en 1973, apareciendo pequeñas filtraciones que fueron aumentando al subir el nivel de embalse, hasta que en junio de 1975 se produjo un aumento brusco de la filtración llegando a los 90 l/s, aunque no se apreciaba elementos sólidos. Tras bajar el nivel de embalse se observó en el paramento de aguas arriba un cráter vertical que hubo de sanear y rellenar de arcilla para impermeabilizarlo. Se concluyó que los filtros diseñados eran correctos, pero la erosión se debió producir por la base de la presa y no a través de éstos por lo que necesariamente debería existir alguna cavidad donde se habría depositado el material erosionado. Parece ser que la causa principal fue la disolución de los yesos del cimiento.

En cuanto a la presa de Martín Gonzalo (1987), se trata de un caso diferente ya que es una presa de materiales sueltos con pantalla impermeabilizadora que falló al comenzar el llenado, dando lugar a una filtración bajo el pié de presa de hasta 1 m³/s. Aparte del mal comportamiento de la pantalla, es de destacar que estaba apoyada sobre una transición granular y un dren que se comprobó que no cumplía ni los criterios de autoestabilidad ni los de arrastre.

De todas estas experiencias de fallos se han extraído conclusiones muy interesantes que han permitido avanzar en el control de la erosión interna, de forma que la mayoría de las presas modernas disponen de filtros granulares o geotextiles que han dado magníficos resultados incluso en condiciones muy desfavorables.

2.2 Medidas de seguridad frente a la erosión interna

2.2.1 Medidas para evitar la fisuración

Al conocer la posibilidad de que la fisuración del núcleo impermeable de una presa de materiales sueltos heterogénea o el propio cuerpo de presa en una homogénea, de lugar a la aparición de una filtración localizada que pueda originar erosión interna, tradicionalmente se ha prestado mucha atención a tomar medidas para tratar de

reducir la fisurabilidad de estos materiales ya que, antes del empleo de los filtros granulares, ésta era la única forma de luchar contra la erosión interna.

Después de la investigación tan profunda que se ha desarrollado sobre los filtros granulares, se ha llegado en ocasiones a afirmar que con un filtro bien diseñado la erosión interna quedará completamente controlada por lo que no es preciso prestar demasiada atención al peligro de fisuración.

Evidentemente esta otra postura tampoco es razonable, ya que con un fenómeno tan peligroso como la erosión interna todas las medidas de seguridad son precisas.

Por tanto parece razonable adoptar durante el diseño, construcción y explotación de una presa las medidas pertinentes para reducir el riesgo de fisuración y por supuesto, diseñar y construir unos filtros adecuados que ofrezcan una seguridad adicional a modo de “doble barrera de protección”.

Fundamentalmente hay dos tipos de fisuras que pueden aparecer en una presa de materiales sueltos: las fisuras longitudinales y las transversales.

A efectos del riesgo de erosión interna las fisuras más peligrosas son las transversales ya que pueden poner en contacto el agua del embalse con el espaldón o paramento de aguas debajo de la presa.

Estas fisuras transversales son debidas a la deformación de la presa en dirección longitudinal por el peso propio o por la compresibilidad de la cimentación producidas por algunas de las siguientes causas Uriel (1981):

- La deformación instantánea o diferida de la cimentación en el centro del cauce si su espesor es grande o es muy compresible
- El colapso o asiento de la cimentación como consecuencia del embalse
- La diferencia de asientos diferidos entre estribos y centro de la presa, debido al peso propio del terraplén, cuando las laderas son escarpadas

- Fuertes cambios de altura o pendiente de las laderas
- Existencia en las cercanías de la coronación de fuertes irregularidades en el perfil del estribo, que pueden provocar despegues entre presa y terreno

Entre los factores que influyen en la fisuración de presas destacan el tipo de suelo, la resistencia y deformabilidad en rotura por tracción, las propiedades reológicas de los materiales, la colapsabilidad del terraplén compactado, la velocidad de construcción de la presa y embalsado, la altura de la presa, la magnitud de los efectos sísmicos y la existencia de lluvias intensas y prolongadas.

El propio Uriel (1993b) señala las principales medidas contra el riesgo de fisuración:

- Regularizar, en la medida de lo posible, los estribos, evitando las irregularidades locales; enlazando suavemente los cambios de pendiente y eliminando zonas en desplome.
- Construir la presa o embalsar por etapas o lentamente, de manera que las deformaciones diferidas sean lo más pequeñas posibles.
- Exigir una mejor compactación y densificación de los espaldones.
- Prever una curvatura del eje de la presa hacia aguas arriba para incrementar la compresión en planos transversales al producirse el embalse.
- Proyectar el núcleo impermeable más grueso en aquellas zonas susceptibles de agrietamiento, especialmente en los estribos.
- Facilitar el corrimiento entre espaldones y laderas, cuando éstas tenga fuertes pendientes.
- Aumentar la humedad de compactación del núcleo en la parte alta de la presa, para que la deformabilidad sea mayor y se adapte mejor a las deformaciones

impuestas por los estribos, sin abusar de esta medida para evitar fisuración por retracción.

- Emplear un suelo más plástico y más deformable en la parte alta de la obra.
- Reducir el riesgo de fracturación hidráulica.
- Combatir la disimetría de las laderas.
- Realizar precargas sobre las zonas eventualmente traccionadas.
- Aumentar del resguardo de la presa.
- Reforzar con geomallas las zonas traccionadas.

A todas estas medidas se le puede añadir la de disponer de un adecuado sistema de auscultación de la presa que a través de las lecturas de deformaciones y presiones permita detectar situaciones de alto riesgo de fisuración y actuar en consecuencia mediante la bajada del embalse y/o algún tratamiento de refuerzo.

Todas las medidas señaladas no son excesivamente costosas en la mayoría de los casos y por lo tanto es muy recomendable su seguimiento, aunque como ya se ha comentado anteriormente, hay que prestar también especial atención al diseño de los filtros.

2.2.2 Empleo de Filtros Granulares

En la actualidad y desde hace ya muchos años, las presas en las que sea posible la aparición de erosión interna se proyectan con filtros adecuados, ya sean granulares o de geotextiles, no sólo en el contacto del núcleo impermeable con los espaldones o los drenes, sino incluso en el propio contacto con el cimiento.

Giroud (1996) refleja perfectamente la necesidad de que el filtro cumpla dos condiciones inicialmente contradictorias, por un lado debe tener unos poros lo suficientemente grandes como para que la permeabilidad sea tal que no dificulte en

exceso el filtrado de agua, pero por otro lado, los poros han de ser lo suficientemente estrechos como para impedir un escape peligroso de partículas del suelo base.

Giroud (1996) explica este dilema de una forma muy clara:

“ Un filtro debe retener al suelo y permitir el paso del agua. Estos dos requerimientos son contradictorios cuando son formulados de forma estricta. Si se pretendiese que todas las partículas del suelo fuesen retenidas, se necesitaría una pantalla impermeable, en cuyo caso el agua no podría filtrar. Por otro lado, si se quisiera permitir el flujo de agua de forma absolutamente libre, los poros del filtro serían tan grandes que prácticamente ninguna partícula del suelo sería retenida.

Por consiguiente, los dos criterios no deben ser formulados de una manera tan estricta... un buen filtro necesita poros lo suficientemente grandes para permitir que el agua fluya, (lo que puede dar lugar a la pérdida de una pequeña cantidad de partículas del suelo base), pero también debe tener poros lo suficientemente pequeños de forma que el esqueleto de partículas, que le da estabilidad a la estructura del suelo base, no se altere como resultado de la pérdida de algunas partículas finas. Para evaluar esos dos requerimientos razonables, se debe desarrollar una teoría de filtración. Formular una teoría completa es difícil por dos razones, la complejidad del fenómeno y el enorme número de parámetros que influyen en el:

- *Condiciones geométricas, (forma de la superficie de suelo, localización del fluido y dirección del flujo...) y mecánicas (gravedad, tensiones)*
- *Propiedades del fluido (composición, densidad, viscosidad), de las partículas del suelo base (forma, dimensiones, distribución, densidad, naturaleza química, propiedades mecánicas,*

permeabilidad) y del filtro (distribución de poros, permeabilidad, propiedades mecánicas)

*Hasta el momento estamos bastante lejos de tener una teoría completa que se ajuste a los fenómenos y parámetros mencionados. Usamos una simplificación para filtros granulares o geotextiles que consiste en considerar dos criterios establecidos separadamente realizando algunas simplificaciones: el **criterio de permeabilidad** y el **de filtración**⁸...”*

Por lo tanto, son muy complejas las variables que influyen en la erosión de un suelo base y su percolación y/o interceptación en la red de poros del filtro.

En los próximos apartados se realiza un amplio repaso de los resultados y recomendaciones de los distintos investigadores a la hora de diseñar el filtro, por lo que en este apartado se considera suficiente, a modo de introducción, el breve resumen realizado de la doble función que tiene el filtro.

2.2.3 Empleo de Filtros de Geotextiles

2.2.3.1 Introducción

Aunque la presente investigación se centra fundamentalmente en los filtros granulares para bases cohesivas, es interesante mencionar someramente algunas cuestiones sobre el empleo de geotextiles como filtro, técnica que cada vez está teniendo mayor aceptación entre los proyectistas de presas e interés en los investigadores.

Kabasy (1993) y Bravo (1995) hacen un excelente resumen sobre las características y aplicaciones de los geotextiles:

⁸ El criterio de filtración se suele conocer como “criterio de retención”

Los geotextiles son textiles fabricados con fibras sintéticas con aplicación en Ingeniería. Normalmente están hechos de poliéster, polipropileno, nylon, polietileno o de una combinación de estas sustancias. Aunque el control de su calidad de fabricación suele ser bueno, debe hacerse notar que las propiedades de los distintos tipos de geotextiles varían bastante.

2.2.3.2 Elementos constitutivos de un geotextil.

La naturaleza de los elementos que constituyen un geotextil determina un cierto número de sus propiedades. Pueden ser:

- **Fibras**, de longitud reducida (20 a 80 mm.) para diámetros de 15 a 40 micras.
- **Filamentos**, de longitud indefinida y diámetro de 20 a 40 micras.
- **Fibrillas**, elementos de apariencia fibrosa que proceden de una operación de fibrilación de una película de polímero, en general polipropileno; su sección es sensiblemente rectangular, con dimensiones normalmente mayores que las de las fibras y su longitud de 10 a 100 mm.
- **Bandeletas**, que son bandas continuas, estrechas (2-3 mm.), de pequeño grosor en relación con su anchura, obtenidas por corte de películas o por hilado directo de un material textil.
- **Hilo monofilamento**, o crin, en general de diámetro mayor, 2 o 3 mm.
- **Hilo multifilamento**, obtenido por la unión, por torsión débil, de filamentos continuos.
- **Hilados de fibras**, constituidos por la unión de fibras por torsión.

2.2.3.3 Tipos de manufactura.

Los procesos de fabricación de estos geotextiles han dado lugar a una amplia variedad de tipos, con propiedades muy distintas. Es necesario tener cuidado con la selección pues algunos pueden ser incluso biodegradables en las condiciones de obra.

- **Geotextiles tejidos**, en general, con hilos monofilamento o multifilamento de poliamida o poliéster o con bandeletas de polipropileno. Por su misma construcción es heterogéneo, anisótropo y poco deformable.
- **Geotextiles no tejidos**, obtenidos en su mayoría por hilado directo. La unión de los filamentos en el interior del producto se obtiene por agujeteado o por termosoldado. Su distribución de poros es parecida a la de los suelos naturales. Los obtenidos por hilado directo y agujeteado son productos bastante gruesos, muy permeables, suaves, más o menos compresibles, que permiten una cierta movilidad de las fibras durante la aplicación de una tensión, de donde se deducen módulos bajos y una gran deformación a la rotura. Los obtenidos por hilado directo y termosoldado son más delgados y menos permeables y compresibles que los agujeteados. Sus módulos son más elevados y su propensión al desgarre también. Los agujeteados, fabricados con fibras o fibrillas, tienen las características de todos los agujeteados, pero sus propiedades mecánicas son siempre inferiores a las de los obtenidos por hilado directo. Otro tipo de productos son aquellos geotextiles cuyas uniones se consiguen con aditivos químicos tales como resinas y epoxis. Son parecidos a los termosoldados.
- **Geotextiles compuestos**, formados por la asociación de geotextiles simples, para mejorar las características globales del producto consiguiendo algunas, que ningún geotextil simple tiene. Por ejemplo, reforzando mecánicamente un geotextil agujeteado con hilos o con un tejido.

2.2.3.4 Permeabilidad de los geotextiles.

Los geotextiles son, en general, permeables al agua y, si son de suficiente espesor, pueden conducirla además en su propia superficie.

El mecanismo de flujo en geotextiles gruesos es análogo al de los suelos, pudiéndose seguir utilizando el concepto de permeabilidad. En geotextiles delgados y en los que tienen grandes aperturas el mecanismo de flujo es distinto, pero suele utilizarse también la conductividad hidráulica (permeabilidad) con este tipo de geotextiles.

Para expresar la permeabilidad de los geotextiles suele utilizarse la Ley de Darçy; sin embargo, cuando el agua fluye a través del geotextil, el flujo es turbulento o intermedio entre laminar y turbulento, con lo que esta ley no es totalmente representativa. Además, cuando se trata de determinar el valor de la permeabilidad, se obtienen resultados muy dispersos por la gran variación del gradiente, debido a los cambios del relativamente pequeño espesor del geotextil.

El Laboratorio de Hidráulica de Delft propugna el empleo de la Ley de Darçy, modificada del siguiente modo:

$$Q = K_f^n . A . i \quad \text{Ecuación 7}$$

donde Q es el caudal; Kf el coeficiente de permeabilidad en régimen de turbulencia; A el área del geotextil; i el gradiente a través del geotextil y n un coeficiente que indica el grado de turbulencia, cuyo valor es 1 para régimen laminar y 2 para régimen turbulento. No obstante es habitual el uso de la Ley de Darçy.

En el caso de los materiales no tejidos existen varias formulaciones que expresan el valor de la permeabilidad. Una de ellas tiene la siguiente forma:

$$k = 0,00212 d_t^{\frac{1}{2}}$$

$$d_t = \frac{2,3!.(1-n)}{d_f^2}$$

$$n = 1 - \frac{m}{d \cdot t} \quad \text{Ecuación 8}$$

donde k es el coeficiente de permeabilidad; dt la densidad de fibras del geotextil; n su porosidad; df el diámetro de sus fibras; m la masa por unidad de superficie del textil; d la densidad del material y t el espesor del textil.

En cualquier caso, se observa que la permeabilidad del geotextil depende de la porosidad, la cual, a su vez, varía con la presión que actúa en la realidad sobre el geotextil.

Para la medida directa de la permeabilidad en geotextiles se han ideado numerosos ensayos, que pueden verse con algún detalle en el artículo de Pérez Rodríguez (1986).

Algunos de estos ensayos son los de:

- Instituto Franzius de Hannover.
- A.S.T.M. altura constante.
- A.S.T.M. descenso de la altura piezométrica.
- Laboratorio de Hidráulica de Delft.
- Instituto Federal de Hidráulica.

2.2.3.5 Durabilidad de los geotextiles.

En Francia se han realizado numerosos ensayos sobre este aspecto que, en resumen, han dado la valoración siguiente, Bravo (1995):

- La pérdida de características de un geotextil enterrado puede alcanzar hasta el 30%.
- Las modificaciones fisicoquímicas pueden ser especialmente importantes, si se exponen mucho tiempo (más de 15 días) a la intemperie.

- La colmatación puede ser importante (más del 50%), pero suele ser irregular y permite la filtración.
- La durabilidad de un geotextil debe ser superior a 100 años. En presas habría que tener en cuenta que la fisuración se producirá en los primeros años.

De todas formas esta valoración es muy general y se precisa en cada caso obtener una información completa de las características del material a emplear y de su resistencia al envejecimiento en las condiciones de su uso, incluyendo el debido a la actividad biológica del suelo sobre el geotextil.

En el caso de textiles de poliéster se acepta usualmente que pueden soportar la acción del sol durante un par de semanas y hay muchos casos en que es difícil conseguirlo en obra. El polipropileno que no ha sido estabilizado respecto de los rayos ultravioleta puede quedar muy deteriorado en pocas semanas y debe evitarse cualquier exposición a ellos. Los polímeros han de estar estabilizados seriamente y no solo de nombre y es preciso tener en cuenta que en algunos países de origen (Reino Unido, Holanda, Alemania) la intensidad total de radiación no sobrepasa los 70 kilolangleys por año, mientras que en España puede alcanzar los 120 kilolangleys.

Una consideración más detallada merece el comportamiento de los geotextiles frente al terreno en relación con la filtración, que debe proseguir a lo largo del tiempo de la siguiente forma:

- a) Tras un período inicial de inestabilidad, que ocurre durante la formación del filtro, la permeabilidad del sistema debe permanecer constante y no ser inferior a la del suelo a filtrar.
- b) Tras ese período inicial en el que se produce algún lavado del suelo, no deben producirse nuevas pérdidas de material.

Este movimiento de las partículas del suelo hacia el geotextil puede producir bloqueo y contaminación, con consecuencias negativas sobre el comportamiento del sistema.

El **bloqueo** consiste en un taponamiento parcial o total de los poros del geotextil, con una reducción de su permeabilidad, desarrollándose el proceso en un pequeño espacio de tiempo. Para que se produzca el bloqueo es necesaria una cierta relación entre el tamaño de los poros del geotextil y la granulometría de las partículas del suelo. Investigaciones del Laboratorio de Hidráulica de Delft han puesto de manifiesto que suelos uniformes con tamaños de partículas una o varias veces mayores que D_{f95} , pueden reducir notablemente la permeabilidad. Asimismo se ha comprobado que el bloqueo es más frecuente en geotextiles con una estructura regular. Menor uniformidad del suelo y una estructura más irregular del geotextil reducen las posibilidades de bloqueo.

A estos efectos los suelos más peligrosos son los de alto contenido en arena fina (más del 50% y pequeño contenido de arcilla (menos del 20%).

Si el gradiente hidráulico en el geotextil es menor o igual que el del suelo no ocurre bloqueo; el U.S. Army Corps of Engineers acepta, sin embargo, un valor hasta tres veces mayor en el geotextil que en el suelo.

La **colmatación** consiste en que las partículas finas del suelo quedan atrapadas en el geotextil, reduciéndose su permeabilidad, desarrollándose el proceso en un tiempo que puede durar desde unos cuantos días hasta varios meses. Se suelen colmatar más los poros más finos, los mayores suelen quedar libres.

Este fenómeno se suele producir con partícula de arena fina a limos medios; es menor con materiales más plásticos.

Heerten (1982 y 1986), describe una investigación llevada a cabo sobre 16 tipos de geotextiles no tejidos, agujeteados; se aprecia una disminución sensible de la permeabilidad, que en algún caso llega a dos órdenes de magnitud, con un valor medio de un orden. Al final la permeabilidad de estos geotextiles colmatados es aún de 5 a 12 veces la del suelo. La porosidad remanente garantiza una permeabilidad

suficiente a largo plazo. Estos resultados ponen de manifiesto las ventajosas propiedades de filtración de los geotextiles no tejidos, agujeteados.

2.2.3.6 Aplicaciones de los geotextiles en presas.

El Grupo Francés de Trabajo del Comité de Grandes Presas ha localizado hasta catorce aplicaciones distintas de los geotextiles en presas de materiales sueltos:

- a) Colocado sobre el espaldón de aguas arriba, sirve de filtro entre las tierras del espaldón y la protección de escollera, losas, etc.
- b) Protegiendo un colector en un dren situado aguas abajo el geotextil puede reemplazar la capa de transición.
- c) Como filtro colocado alrededor de una zanja drenante, excavada en un espaldón poco permeable.
- d) Colocado alrededor de un dren horizontal reemplaza la capa de transición tradicional.
- e) Subiéndolo con el espaldón en un plano más o menos vertical, sirve de filtro entre el núcleo y la escollera o dren chimenea.
- f) De manera más general, el geotextil puede servir de separación entre dos zonas cualesquiera de la presa,
- g) Usado como dren en el plano del geotextil. Se han construido así dos pequeñas presas con buen comportamiento global.
- h) Asociado a láminas de impermeabilización, tanto debajo como encima (Presa de Ospedale).
- i) En algunos diques construidos como vertederos, puede jugar un papel de armadura, contención o drenaje.

- j) En el talud de aguas abajo para soporte de la vegetación.
- k) Separando la cimentación del cuerpo de presa.
- l) Como armadura entre cimentación y espaldones en caso de cimentaciones poco resistentes. Está formado entonces de hilos aislados y debe presentar características mecánicas elevadas. Estos materiales existen ya en el mercado (geomallas).
- m) Para el tratamiento de cimentaciones y apoyos, bien como drenaje, bien como consolidación o de ambas formas.
- n) Como reparación de urgencia, constituye un método de intervención rápida del que debe disponer un constructor ubicado en un contexto difícil de corrimientos o de suelos sensibles a la erosión interna.

Los geotextiles son aun unos materiales relativamente nuevos, con una limitada historia de su comportamiento, comparada con la de los materiales tradicionales de construcción de presas. Aunque ofrecen un potencial para un diseño económico y seguro, en las grandes presas la seguridad debe prevalecer sobre todo. En general, según Bravo (1995), los productos geosintéticos solo pueden emplearse donde no resulten críticos en el comportamiento a largo plazo de la presa, y donde puedan ser reparados o repuestos, si es necesario.

En la actualidad gozan cada vez de más aceptación como refleja el hecho de que en el congreso de Geofilters'92, la mayoría de las comunicaciones se referían a filtros granulares, mientras que en el congreso de Geofilters'96, la mayoría versaban sobre temas relativos a los geotextiles y en el reciente congreso de Geofilters'2000, prácticamente la totalidad de las ponencias se referían a los geotextiles.

2.3 Interacción base cohesiva-filtro granular

2.3.1 Modelización mediante ensayos de laboratorio

El estudio de la erosión interna en suelos cohesivos y su protección mediante filtros granulares ha sido ampliamente estudiado mediante la simulación del fenómeno en ensayos de laboratorio.

La complejidad del fenómeno de la erosión interna hace que estos ensayos de laboratorio tengan numerosas limitaciones, entre las que cabe destacar la dificultad de representar fielmente las condiciones reales, así como el permitir observar y tomar medidas para tratar de, en primer lugar, conocer los mecanismos de arrastre, transporte e interceptación de las partículas del suelo base y en segundo lugar, diseñar o comprobar la eficacia del filtro granular.

La situación actual es tal que prácticamente cada investigador diseña un nuevo método de ensayo para cumplir sus propios objetivos, por lo que luego resulta muy difícil poder comparar los resultados de distintos investigadores ya que las condiciones de cada uno de los ensayos pueden modificar significativamente sus conclusiones.

Sería deseable que existiese un ensayo normalizado para el diseño de filtros, pero si bien es cierto que el ensayo NEF (Ensayo de filtros sin erosión) de Sherard y Dunningan (1985) es el que más amplia difusión ha obtenido a nivel mundial, aun hoy no se puede hablar de normalización, he incluso algunos investigadores rechazan de plano la validez de dicho ensayo, (Vaughan 1995, no publicado).

Ante esta situación que se puede llamar de “indefinición” puede ser interesante realizar un repaso de los métodos de ensayo más importantes que se han desarrollado, exponiéndolos en forma de fichas sencillas que permitan una rápida comparación de las hipótesis, condiciones de ensayo, materiales empleados, etc.

Esto ha supuesto una tarea muy laboriosa pero posiblemente productiva ya que permitirá a quien se enfrente a la necesidad de realizar experimentación en laboratorio , obtener en un rápido repaso información suficiente sobre los ensayos ya desarrollados así como la información bibliográfica precisa para ampliar este conocimiento.

A continuación se exponen, por tanto, una serie de fichas sencillas acompañadas de una gráfica de la probeta de ensayo e instalaciones. Como se verá, se ha tratado de reducir el tamaño de la ficha a un solo folio, para mayor simplicidad, lo que ha supuesto que en algunas gráficas no se puedan leer todos los detalles, pero el objetivo de estas gráficas no es otro que el de permitir una fácil interpretación de los datos y un reconocimiento visual, en ningún caso se pretende servir de base para la reproducción de dichos ensayos, para lo que es preciso observar las especificaciones concretas de cada investigador contenidas en la bibliografía facilitada.

En algunos casos no ha sido posible elaborar la ficha, bien porque la información disponible no lo ha permitido o bien porque el ensayo, por su singularidad, es difícil de clasificar y por tanto se ha procedido a su descripción.

REFERENCIA

SHERARD J., DUNNINGAN L., TALBOT J. (1984) "Filters for Silt and Clays". ASCE Journal of Geotechnical Engineering. Vol.110

TIPO DE ENSAYO

"Slot Test" (Ensayo con ranura)

FILTRO

Procedencia: arenas naturales

Granulometría: varias, D_{15} 0.3-3 mm

Compactación: por vibración con sobrecarga de 10 kg y filtro saturado

Espesor: 100 mm

Otros: Material lateral de arena o arcilla de modelar

SUELO BASE

Procedencia: 15 bases naturales de USA, tres de ellas dispersivas

Granulometría: varias, tamaños limos y arcillas

Espesor: 16.25 mm

Compactación: 95% densidad máxima próctor

Humedad/Concentración: humedad óptima

Aditivos: no procede

Otros: no procede

CONDICIONES DEL ENSAYO

Orificio: ranura de 1.25 mm x 0.156 mm

Presión/Gradiente Hidráulico: 4 kg/cm²

Otras: no procede

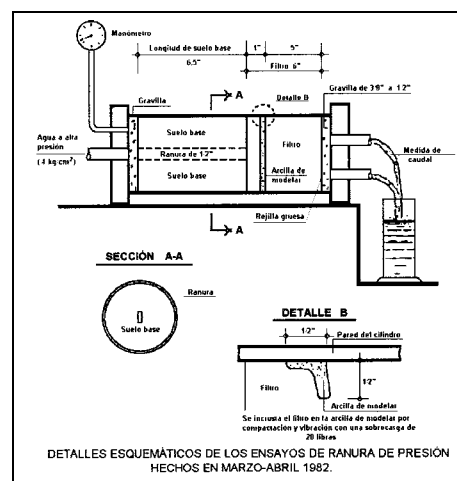
PARÁMETROS DE CONTROL

caudal, turbidez, inspección visual de la ranura

CRITERIO ÉXITO/FRACASO

En los ensayos que tenían éxito, durante los 30 o 60 primeros segundos el agua salía muy sucia pero a los cinco minutos se quedaba limpia y a los veinte minutos se detenía el flujo de agua. En cambio en los que fracasaban se mantenía el flujo inicial durante varios minutos al cabo de los cuales se abría la muestra y se veía que se había hecho mayor la ranura.

FIGURA



OBSERVACIONES

Estos ensayos se hicieron con agua del suministro público, que contenía unos 10.000 miliequivalentes por litro de sales. Se hicieron algunos ensayos con agua destilada y parece que había alguna diferencia, de forma que con agua destilada el D_{15} del filtro debe ser aproximadamente una décima de mm menor.

REFERENCIA

SHERARD J., DUNNINGAN L., TALBOT J. (1984) "Filters for Silt and Clays". ASCE Journal of Geotechnical Engineering. Vol.110

TIPO DE ENSAYO

"Slurry Test" (Ensayo con papilla)

FILTRO

Procedencia: arenas naturales

Granulometría: varias, D_{15} 0.3-3 mm

Compactación: por vibración con sobrecarga de 10 kg y filtro saturado (80-90% de densidad relativa)

Espesor: 100 mm

Otros: Material lateral de arena o arcilla de modelar

SUELO BASE

Procedencia: bases naturales de USA, algunas de ellas dispersivas

Granulometría: varias, tamaños limos y arcillas

Espesor: entre 50 y 75 mm

Compactación: no procede

Humedad/Concentración: 2.5 veces el límite líquido

Aditivos: sin dispersante

Otros: no procede

CONDICIONES DEL ENSAYO

Orificio: no procede

Presión/Gradiente Hidráulico: 4 kg/cm²

Otras: no procede

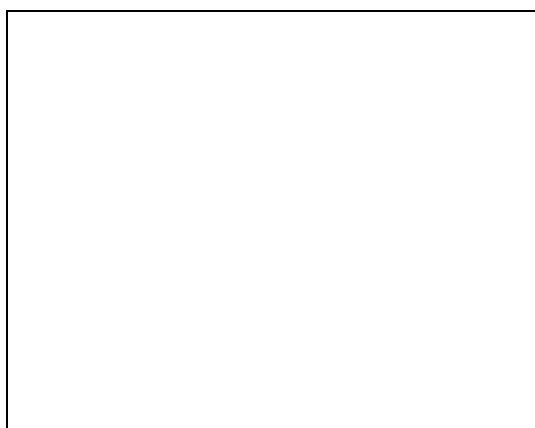
PARÁMETROS DE CONTROL

caudal, turbidez, inspección visual

CRITERIO ÉXITO/FRACASO

En los ensayos con **éxito** la papilla asienta rápidamente unos milímetros y entonces deja de moverse, sale una pequeña cantidad de agua turbia pero el flujo se detiene y el ensayo se mantiene en equilibrio. En los ensayos que **fracasan** toda la papilla de suelo base se escapa y la superficie del filtro queda limpia.

FIGURA



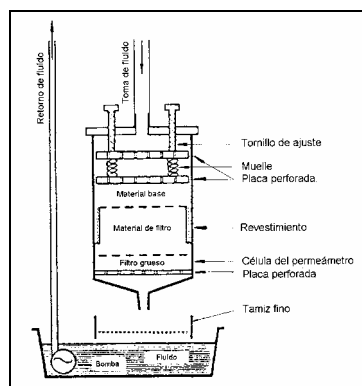
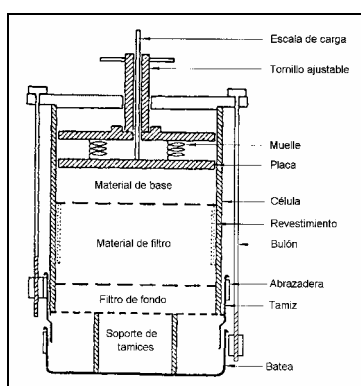
OBSERVACIONES

Estos ensayos se hicieron con agua del suministro público, que contenía unos 10.000 miliequivalentes por litro de sales. Se hicieron algunos ensayos con agua destilada y parece que había alguna diferencia, de forma que con agua destilada el D_{15} del filtro debe ser aproximadamente una décima de mm menor.

REFERENCIA:

KENNEY T.C. (1989) “Results of Segregation Tests using 1-metre and 300 mm. Diameter Rotary-Drum Apparatus”. Dept. of Civil Engineering, University of Toronto. Publication 89-07, ISBN 0-7727-7550-8. 1989

Para determinar si un material es internamente inestable: Se fabrica una probeta compactada de ensayo y se le aplican fuerzas de filtración y vibratorias para conseguir que las partículas sueltas se muevan hacia la base de la probeta. Para asegurar que estas probetas son homo-géneas se hacen de la siguiente forma: Se coloca una capa gruesa de drenaje en el fondo de la célula de ensayo. Se añade el material preparado en 10 a 20 veces con idéntica granulometría. Se compacta la probeta con varilla para evitar la formación de capas. Se hace la probeta de suficiente longitud, para que pueda desarrollarse una región central uniforme sin la influencia de los extremos. Se aplica después un gradiente hidráulico a la probeta y se vibra el aparato suavemente para conseguir el mayor transporte posible de partículas a través del material. Cada ensayo se mantiene al menos durante 10 horas hasta que no se observa movimiento de partículas. Después del ensayo se saca el material de la probeta en seis porciones sucesivas y se determina la curva granulométrica de cada una de ellas. Se determina la pérdida (o ganancia) de partículas en cada porción comparándolas con la granulometría primitiva. Si hay alguna pérdida apreciable de material en la región central, se considera el material inestable internamente.



REFERENCIA

SHERARD J., DUNNIGAN L. (1985) “Filters and Leakage Control in Embankment Dams” Proceedings, Symposium on Seepage and Leakage from Dams and Impoundments, R.L. Volpe and W.E. Kelly eds., ASCE 1985, pp 1-30.

TIPO DE ENSAYO

“No Erosion Filter Test” (Ensayo de filtros sin erosión): NEF

FILTRO

Procedencia: varias

Granulometría: varias

Compactación: por vibración con sobrecarga de 10 kg

Espesor: 100 mm

Otros: material lateral de arena o arcilla de modelar

SUELO BASE

Procedencia: bases naturales

Granulometría: varias

Espesor: 25 mm para suelos finos y 100 mm para suelos gruesos

Compactación: no especificado

Humedad/Concentración: humedad óptima

Aditivos: no procede

Otros: no procede

CONDICIONES DEL ENSAYO

Orificio: 1 mm para bases finas y 5-10 mm para bases gruesas

Presión/Gradiente Hidráulico: 4 kg/cm²

Otras: no procede

PARÁMETROS DE CONTROL

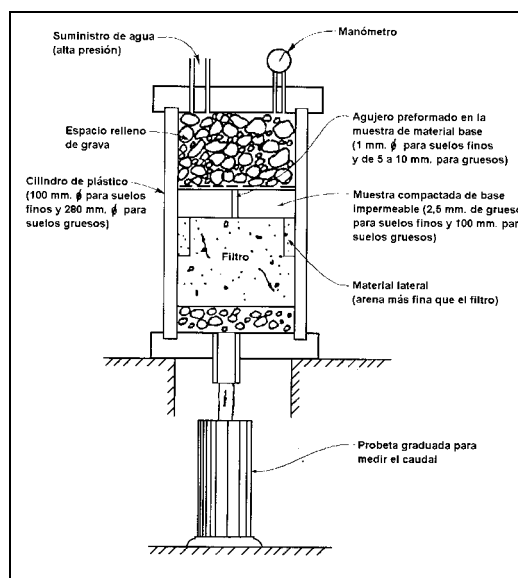
caudal, turbidez, inspección visual del orificio

CRITERIO ÉXITO/FRACASO

Filtro efectivo: si el filtro es capaz de retener las partículas del suelo base de forma que al final del ensayo el orificio no presenta signos de erosión.

Filtro no efectivo: si al final del ensayo el orificio ha aumentado de tamaño por efecto de la erosión o incluso han aparecido orificios nuevos.

FIGURA



OBSERVACIONES

El tamaño límite definido por este ensayo (D_{15FL}) es conservador, pero razonable, que puede ser usado directamente en el proyecto, en la mayor parte de los suelos de grano fino. Incluye un coeficiente de seguridad, pues los filtros de ese tamaño funcionan sin ninguna erosión en las severas condiciones del laboratorio, mientras que filtros más gruesos se sellan con muy poca erosión. El tamaño D_{15} es sólo del 20 al 40% de los tamaños definidos en los ensayos de 1982 para este tipo de suelos.

REFERENCIA

KHOR C.H., WOO H.K. (1989) “Investigation of crushed rock filters for dam embankment” Journal of Geotechnical Engineering, vol. 115, No.3, marzo 1989

TIPO DE ENSAYO

No Erosion Filter Test

FILTRO

Procedencia: varias

Granulometría: no especificado

Compactación: por vibración durante 1 minuto con 8 kg de sobrecarga

Espesor: 80 mm

Otros: no procede

SUELO BASE

Procedencia: suelo residual tropical de presas malayas

Granulometría: naturales

Espesor: 25 mm

Compactación: 95% próctor normal

Humedad/Concentración: hum. óptima

Aditivos: no procede

Otros: no procede

CONDICIONES DEL ENSAYO

Orificio: 1.5mm diámetro

Presión/Gradiente Hidráulico: 4 kg/cm²

Otras: no procede

PARÁMETROS DE CONTROL

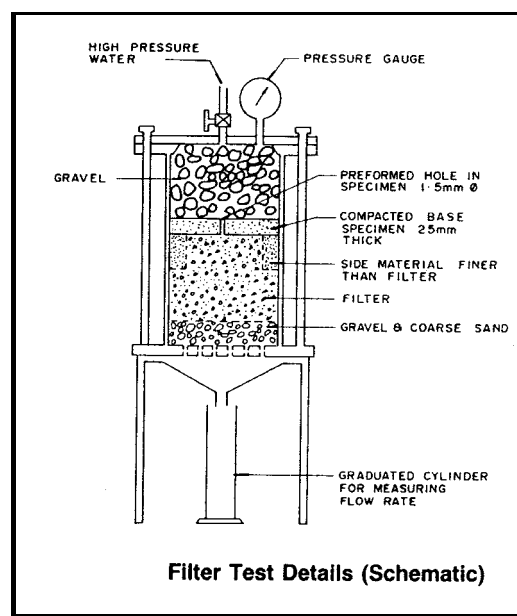
caudal, turbidez

CRITERIO ÉXITO/FRACASO

Éxito: si el agua sale clara y se estabiliza el flujo no habiendo señales de erosión en las paredes del orificio aunque siempre hay una ligera erosión inicial pero prácticamente imperceptible

Fracaso: en algunos ensayos después de una erosión aparece el agua clara lo que significa que el filtro termina funcionando, pero en cualquier caso e considera fracaso si la erosión es visible

FIGURA



OBSERVACIONES

Obtiene unos resultados que siguen la tendencia dada por Vaughan (1982) aunque no coinciden numericamente debido a la diferencia en la naturaleza del suelo base que influye en su floculación.

REFERENCIA

LAFLEUR, J., MIYNAREK, J., ROLLIN, A.L. (1989): Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol 115, No. 12

TIPO DE ENSAYO

“Screen Test” (Ensayo con tamices)

FILTRO

Procedencia: tamices de malla cuadrada de aberturas entre 0.84 mm y 4.76 mm

Granulometría: no procede

Compactación: no procede

Espesor: no procede

Otros: no procede

SUELO BASE

Procedencia: suelo artificial de bolitas esféricas

Granulometría: varias, d_{85} : 5.60 - 12.50 mm.
 Cu_B : 7 - 17.

Espesor: 230 mm

Compactación: índice de densidad relativa: 5 - 28 %

Humedad/Concentración: no procede

Aditivos: no procede

Otros: no procede

CONDICIONES DEL ENSAYO

Orificio: no procede

Presión/Gradiente Hidráulico: $2.5 < i < 6.5$

Otras: probeta sometida a vibración

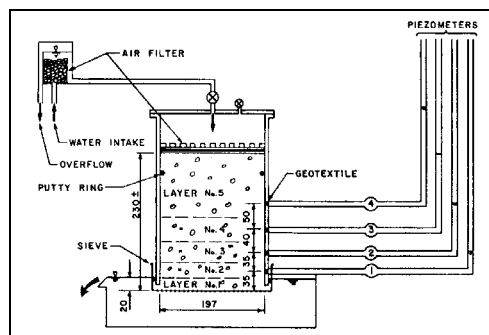
PARÁMETROS DE CONTROL

caudal, turbidez, pérdida de carga, permeabilidad filtro, masa perdida

CRITERIO ÉXITO/FRACASO

No especificado

FIGURA



OBSERVACIONES

Ejecución del ensayo: se hace pasa agua a presión sobre el suelo base y cada cierto tiempo se toman muestras de material de cada capa y medidas de permeabilidad empleando los piezómetros. Se mide también el tiempo de estabilización (70- >150 min) y la masa perdida (2.25 - 7.67 g/cm²)

Resultados: se observa que el lavado de partículas sólo se produce en la capa que está en contacto con el filtro y por ello esta capa es la que queda con mayor permeabilidad. El comportamiento es muy diferente en función de la forma de la curva granulométrica

REFERENCIA

LAFLEUR, J., MIYNAREK, J., ROLLIN, A.L. (1989): Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol 115, No. 12

TIPO DE ENSAYO

“Compatibility Test” (Ensayo de compatibilidad)

FILTRO

Procedencia: material granular de arenas y gravas lavadas

Granulometría: lineal reconstruida con D15 0.20-11 mm, Cu 2.2-26.7

Compactación: ninguna (densidad relativa 51%)

Espesor: 150 mm

Otros: no procede

SUELO BASE

Procedencia: bases naturales de la Bahía de James, no cohesivas

Granulometría: ampliamente graduadas, d85 1.8-19 mm, Cu 1.04-286

Espesor: 150 mm

Compactación: 104 % densidad máxima

Humedad/Concentración: $h_{opt} + 2\%$

Aditivos: no procede

Otros: no procede

CONDICIONES DEL ENSAYO

Orificio: no procede

Presión/Gradiente Hidráulico: $i = 8$

Otras: retropresión constante de 800 kPa

PARÁMETROS DE CONTROL

caudal, turbidez, pérdida de carga, permeabilidad filtro, masa perdida

CRITERIO ÉXITO/FRACASO

Se considera que el sistema es estable si se tiene una migración de suelo base inferior a 0.25 g/cm²

FIGURA



OBSERVACIONES

Se observó que el diámetro característico del filtro es diferente en cada caso, oscilando entre el d50 y el d85, por lo que los criterios anteriores quedaban fuera del lado de la seguridad lo cual es muy interesante. También se apreció que en este ensayo se perdía menos material que el esperado según el modelo y el “Screen test” lo que se justificó al no haber empleado ahora vibración. Se obtuvo además como conclusión importante que el tamaño de apertura de cada filtro está íntimamente relacionado con su índice de densidad relativa.

REFERENCIA

MARANHA DAS NEVES (1989) “Analysis of Crack Erosion in Dam Cores. The Crack Erosion Test”. De Mello Volumen, pg. 284-298.

TIPO DE ENSAYO

“Crack Erosion Test” (Ensayo de erosión en fisura)

FILTRO

Procedencia: no especificado

Granulometría: muy uniformes y lineales

Compactación: no especificado

Espesor: no especificado

Otros: no procede

SUELO BASE

Procedencia: suelos residuales procedentes de la degradación de esquistos o de granitos

Granulometría: varias

Espesor: probeta próctor seccionada

Compactación: densidad máxima próctor

Humedad/Concentración: humedad óptima

Aditivos: no procede

Otros: no procede

CONDICIONES DEL ENSAYO

Orificio: no procede

Presión/Gradiente Hidráulico: 0.5 kg/cm²

Otras: se varía la inclinación de la probeta

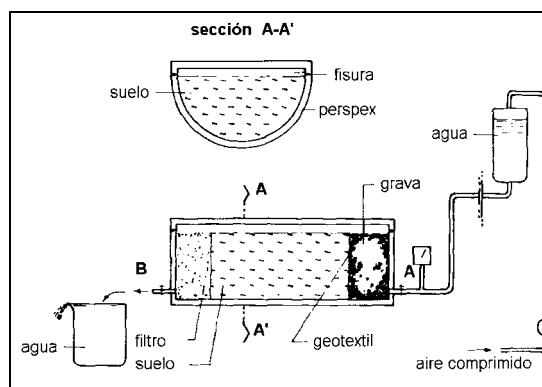
PARÁMETROS DE CONTROL

Caudal, turbidez, material erosionado, zonas de erosión preferencial

CRITERIO ÉXITO/FRACASO

Se considera **éxito** del filtro el taponamiento de la fisura con grumos y agrupaciones de partículas, con una permeabilidad residual, que es irrelevante, ante la pequeña superficie afectada por la fisura, en relación con la superficie total de filtración, y no la constitución del filtro natural por detención estereométrica del movimiento de las partículas que pueden soltarse del suelo, a través de los huecos del filtro.

FIGURA

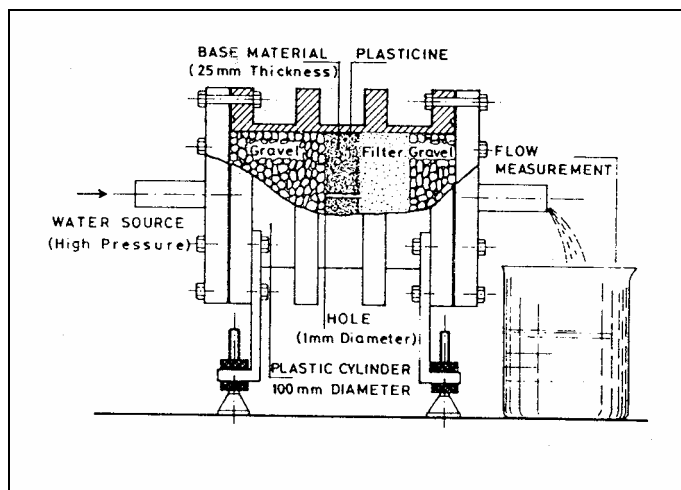


OBSERVACIONES

El modelo puede ser colocado para estudiar fisuras horizontales, verticales e inclinadas. Los resultados del ensayo, parecen confirmar que la inclinación en rampa disminuye, en general, las velocidades iniciales y las erosiones y que la inclinación en pendiente las agrava, aunque estas conclusiones no se pueden obtener en todos los casos.

REFERENCIA:

SECO E PINTO, SANTANA (1989) "Filters for Clay Cores of Embankment Dams". Proceedings, 12th International Conference On Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro.1989.



Con la misma instalación llevan a cabo tres tipos diferentes de ensayo, ensayo convencional de filtros, ensayo de ranura (9.0 x 1 mm²) y ensayo de orificio (1 mm de diámetro). Emplean una rebanada de suelo base de la probeta del ensayo próctor, con 25 mm de espesor que se coloca en un cilindro de 100 mm de diámetro. El material de filtro, (20 mm de espesor), y material de grava, se colocan aguas abajo y también se coloca grava aguas arriba para tranquilizar la corriente.

En el ensayo convencional y en el de ranura la presión de agua se va incrementando en escalones de 0.05 MPa (0.51 Kg/cm²) hasta 0.2 MPa (2.04 Kg/cm²), teniendo cada escalón una duración de 5 minutos. Para el ensayo de orificio se aplica rápidamente una presión de 0.25MPa (2.55 Kg/cm²), manteniéndose durante 20 o 25 minutos. También se realizan ensayos de larga duración, con 0.05 MPa de presión durante varios días. En todos los ensayos se consideran los siguientes **parámetros**: estabilidad del suelo base, color del agua efluente, suelo base erosionado a través del

filtro, variación del flujo durante el ensayo, velocidad de flujo y diámetro final del orificio.

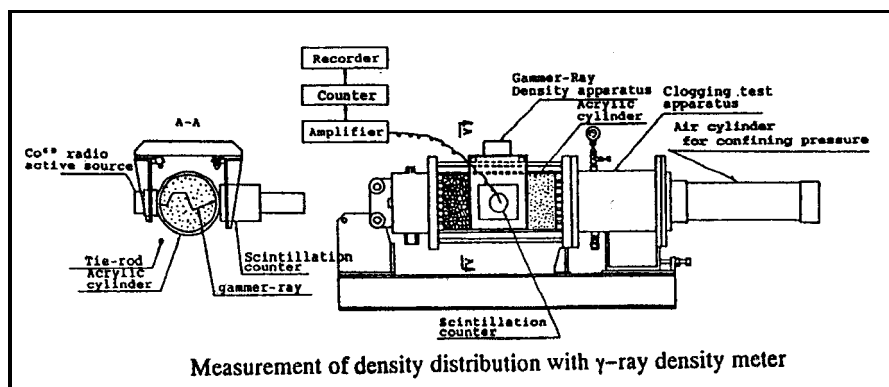
Comparando con otros autores, (Sherard, Vaughan, Wolski, Paré et al. y Kjaernsli), para el suelo base CH, estos ensayos dan filtros más finos que los otros autores, en cambio para la base SM, los ensayos dan filtros más gruesos.

REFERENCIA:

OKITA Y NISHIGAKI (1992) “ Filtration Processes Observed with γ -ray Density Meter “.Filters in Geotechnical and Hidraulic Engineering, Brauns, Heibaum y Schuler (eds.), 1993 Balkema, Rotterdam, Netherlands, Proceedings of Geofilters'92, held in Karlsruhe, Germany, October 1992.

Han ideado un novedoso ensayo en el que se emplean rayos- γ para detectar la variación de la densidad del filtro durante el proceso de erosión del suelo base e interceptación en el interior del filtro granular. Los ensayos han sido realizado empleando como suelo base arena silícea y como filtro agregados y macadam. El suelo base se compacta con una densidad cercana al 65% de la densidad relativa y el filtro es compactado al 85% de la densidad relativa.

El instrumental del ensayo dispone de un cilindro transparente equipado con un sistema neumático de control de la presión de confinamiento y otro de control de la presión del agua, que se fija inicialmente en 1 kg/cm^2 . Además posee 4 sensores que permiten registrar la variación el gradiente hidráulico y un sensor de rayos γ que mide la densidad seca y su variación a lo largo del ensayo.



REFERENCIA

Indraratna et al. (1996). “Design of granular filters for a lateritic residual soil”. Dam Engineering. Vol. 1, Issue 3, p. 201-219

TIPO DE ENSAYO

Slurry Test

FILTRO

Procedencia: arenas cuarcíticas de río con forma subangular

Granulometría: Lineales: (Igual C_u -distinto D_{15}), (Igual D_{15} -distinto C_u), (Igual D_{100} -distinto C_u)

Compactación: no especificado

Espesor: no especificado

Otros: no procede

SUELO BASE

Procedencia: suelo residual laterítico de presas tailandesas

Granulometría: naturales

Espesor: no procede

Compactación: no procede

Humedad/Concentración: 25 g/l

Aditivos: $CaCl_2$ (3.5 meq/l)

Otros: no procede

CONDICIONES DEL ENSAYO

Orificio: no procede

Presión/Gradiente Hidráulico: $8 < i < 10$

Otras: no procede

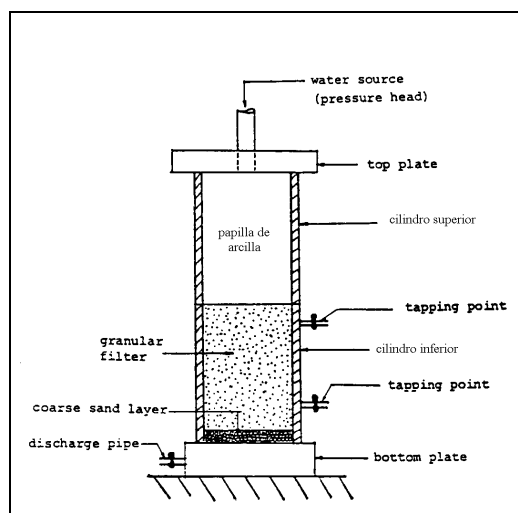
PARÁMETROS DE CONTROL

caudal, turbidez, pérdida de carga, permeabilidad filtro

CRITERIO ÉXITO/FRACASO

Filtro efectivo: si éste es capaz de retener a los flóculos, (no las partículas elementales), de forma que se observa una bajada del caudal y una rápida disminución de la turbidez, aunque se admite una ligera erosión, que se considera imprescindible para el correcto funcionamiento. **Filtro no efectivo:** si se produce un considerable escape de partículas de suelo base, con elevada turbidez (mayor de 25 NTU) sin indicios de que le mecanismo de autofiltración se esté produciendo.

FIGURA



OBSERVACIONES

Obtiene unos resultados que siguen la tendencia dada por Vaughan (1982) aunque no coinciden numericamente debido a la diferencia en la naturaleza del suelo base que influye en su floculación.

REFERENCIA

VAID, Y.P., TOMLINSON, S.S. (1996)
 “Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion” Geofilters’96, Comptes rendus Proceedings, Lafleur, J. & Rollin, A. L. (Eds.), ISBN 2-553-00561-X, Montréal, Québec 1996

TIPO DE ENSAYO

Nombre no especificado

FILTRO

Procedencia: esferas artificiales

Granulometría: 2 mm ó 3 mm

Compactación: por vibración

Espesor: 37 mm ó 25 mm

Otros: no procede

SUELO BASE

Procedencia: partículas esféricas artificiales

Granulometría: lineal

Espesor: 40 mm

Compactación: sin compactar

Humedad/Concentración: saturada

Aditivos: no procede

Otros: no procede

CONDICIONES DEL ENSAYO

Orificio: no procede

Presión/Gradiente Hidráulico: carga hidráulica variable hasta 100 cm

Otras: distintas presiones de confinamiento

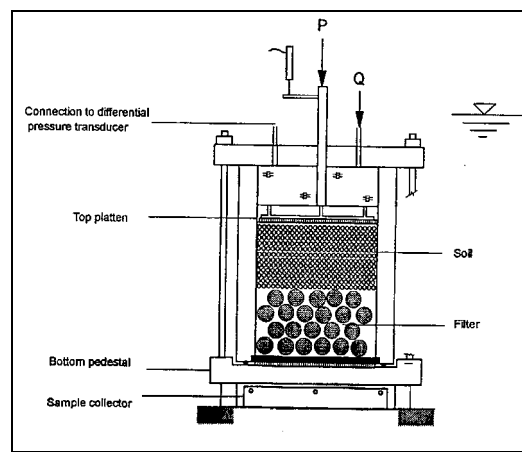
PARÁMETROS DE CONTROL

Presión de confinamiento, asiento superficial, carga hidráulica, caudal, material erosionado

CRITERIO ÉXITO/FRACASO

No se define un criterio de éxito/fracaso sino que para cada combinación de filtro/base se obtiene la carga hidráulica a partir de la cual aparece el sifonamiento.

FIGURA



OBSERVACIONES

Los autores señalan que los resultados de los ensayos son muy repetitivos. En dos ensayos diferentes con los mismos suelos, el gradiente hidráulico crítico varía sólo entre 7 y 9.

REFERENCIA

FUJISAWA, NAKAMURA, YAMAGUCHI Y KAWASAKI (1997) “Effectiveness of Granular Filters for Embankment Dams against Soil Suspension”. ICOLD, Florencia`97. Q.73 R.19, 1997.

TIPO DE ENSAYO

Dirty Water Test

FILTRO

Procedencia: no especificada

Granulometría: filtros uniformes ($Cu < 2.5$, y graduados $2.5 < Cu < 7$)

Compactación: ninguna

Espesor: 25, 50, 75 y 100 mm (estándar =50mm)

Otros: no procede

SUELO BASE

Procedencia: caolinita, bentonita y beses empleadas en presas japonesas

Granulometría: naturales

Espesor: no procede

Compactación: no procede

Humedad/Concentración: 1, 2, 4 y 8 g/l .
(estándar = 4 g/l)

Aditivos:

Otros: agua destilada con bases dispersivas

CONDICIONES DEL ENSAYO

Orificio: no procede

Presión/Gradiente Hidráulico: no procede

Otras: no procede

PARÁMETROS DE CONTROL

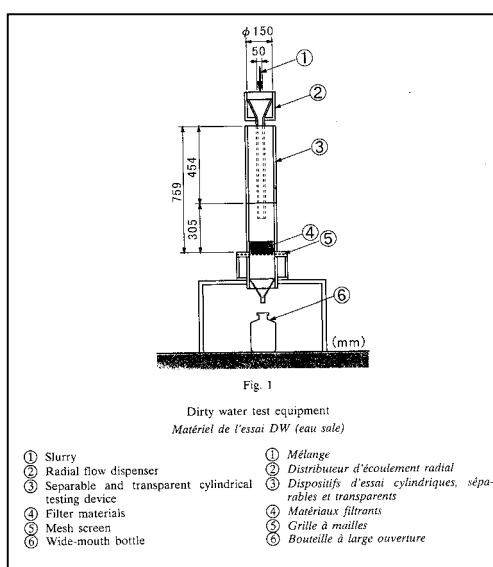
caudal, turbidez, peso sólidos erosionados

CRITERIO ÉXITO/FRACASO

Filtro efectivo: si después de 20 horas la turbidez menor de 30ppm y el ratio W_{Q70}/W_{Q100} es menor del 97%, ó si el ensayo finaliza antes con una turbidez menor de 30ppm

Filtro no efectivo: en caso contrario, salvo en casos de frontera que se decide por observación visual.

FIGURA



OBSERVACIONES

Obtienen unos resultados ligeramente más estrictos que los de Sherard (1985)

REFERENCIA

FOSTER Y FELL (1999) “Filter testing for dams- no erosion and continuing erosion boundaries. Proc. 8th Australi and N. Zealand conference on geomechanics.

TIPO DE ENSAYO

Continuing erosion test (Ensayo de erosión continua)

FILTRO

Procedencia: no especificado

Granulometría: D_{15F} 0.2 – 38 mm

Compactación: no especificado

Espesor: 150mm ($D_{15F} < 1.5\text{mm}$); 200mm ($D_{15F} > 1.5\text{mm}$)

Otros: emplea material lateral

SUELO BASE

Procedencia: 8 muestras de presas australianas y neozelandesas, (dos dispersivas)

Granulometría: naturales (d_{85B} 0.2 – 10 mm)

Espesor: 100 mm

Compactación: no especificado

Humedad/Concentración: no especificado

Aditivos: no procede

Otros: no procede

CONDICIONES DEL ENSAYO

Orificio: 5 mm

Presión/Gradiente Hidráulico: no especific.

Otras: no procede

PARÁMETROS DE CONTROL

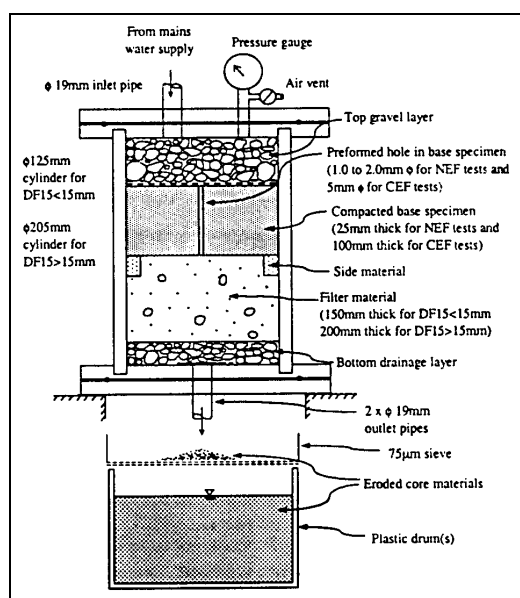
caudal, turbidez, peso sólidos erosionados

CRITERIO ÉXITO/FRACASO

Filtro efectivo: si éste acaba sellándose, lo que se produce cuando:

- Se mantiene la presión
- El agua de salida es clara
- Hay una disminución significativa de caudal.

FIGURA



OBSERVACIONES

Obtiene unos resultados mucho menos estrictos que en los ensayos de no erosión.

Los filtros límite tienen intervalos muy amplios de definición.

REFERENCIA

LOCKE E INDRARATNA (2000). Erosion and filtration of cohesive soils. Geofilters 2000. Polonia

TIPO DE ENSAYO

Pinhole “modificado”

FILTRO

Procedencia: no procede

Granulometría: no procede

Compactación: no procede

Espesor: no procede

Otros: no procede

SUELO BASE

Procedencia: núcleos de presas australianas, arcillas de proveedores y depósitos naturales

Granulometría: naturales

Espesor: 200 mm

Compactación: 5x50 golpes (90% P.N.)

Humedad/Concentración: Varias

Aditivos: ninguno

Otros: no procede

CONDICIONES DEL ENSAYO

Orificio: 3 mm

Presión/Gradiente Hidráulico: variable en escalones de 0.3 a 2.2 m

Otras: velocidad de flujo 0.7-3.5 m/s

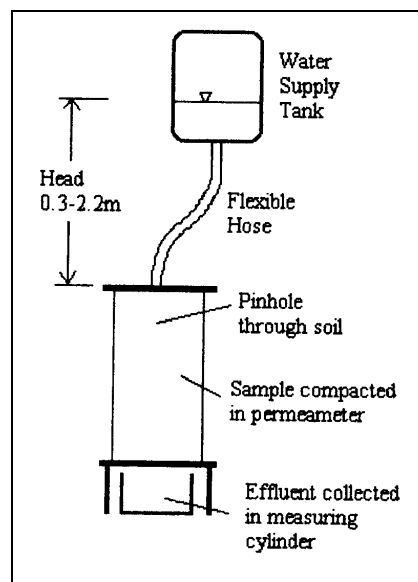
PARÁMETROS DE CONTROL

caudal, turbidez, presión, granulometría de los sólidos del efluente

CRITERIO ÉXITO/FRACASO

No procede

FIGURA



OBSERVACIONES

Se trata de un ensayo de Pinhole ligeramente modificado para medir mejor la erosión del suelo base según distintas variables.

No trata de diseñar filtros granulares sino estudiar el fenómeno de la erosión de los materiales arcillosos.

También emplearon el ensayo NEF de Sherard con filtros granulares.

2.3.2 Modelización numérica

2.3.2.1 *Introducción*

En los estudios sobre erosión interna hay una tendencia reciente a desarrollar y aplicar modelos numéricos de filtración para poder comprender mejor lo que ocurre dentro de los filtros granulares. Los modelos numéricos estudian el movimiento de las partículas finas hacia el filtro debido a las fuerzas de filtración. Para ello es preciso un modelo conceptual de los poros del filtro que permiten el movimiento del agua y de las partículas de suelo Base y un método de análisis de dicho movimiento. Algunos de estos modelos se han desarrollado y comparado con suelos reales obteniéndose distintos resultados. (Locke et al 1999).

La siguiente figura muestra lo que ocurre en una interfase base-filtro estable. Las fuerzas de filtración han arrastrado algunas partículas de suelo base dentro del filtro. En principio algunas partículas podrían ser arrastradas completamente a través del filtro, pero en un filtro estable, las partículas de base más gruesas pueden ser atrapadas por los poros del filtro más pequeños. Estas partículas atrapadas podrán entonces retener a otras más pequeñas con lo que al final toda la interfase se vuelve estable. La filtración se puede reducir durante el proceso, pero generalmente se alcanza un equilibrio.

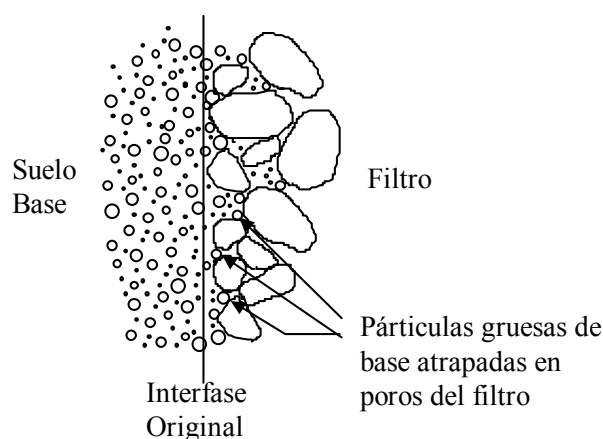


Figura 1.- Interfase Base-Filtro estable

La mayor parte de la investigación en filtros ha sido empírica. Una serie de experimentos con combinaciones de suelo base y filtro han permitido a los investigadores dar reglas empíricas de diseño para una combinación estable la cual está generalmente basada en una ratio entre los tamaños de las partículas de la base y el filtro. Algunos estudios recientes han trabajado en métodos numéricos para modelizar las combinaciones suelo base - filtro y en particular el movimiento de las partículas a través de los filtros. El análisis se basa en examinar el camino probable a través del cual una partícula de suelo base puede migrar dentro del filtro, naturalmente este camino depende de los poros que la partícula encuentre a su paso.

2.3.2.2 Requerimientos de un Análisis Numérico

El primer requerimiento para cualquier análisis numérico es un modelo del suelo base y del filtro. Normalmente es suficiente utilizar la curva granulométrica del suelo base para representarlo como un número de partículas esféricas de diferente tamaño.

Dentro del filtro, son los poros, más que las partículas, quienes controlan la filtración. En particular, las partículas de base suelen ser retenidas por la más estrecha de las conexiones entre dos poros, usualmente llamada constricción de control. La aproximación más frecuente es determinar la distribución de los tamaños de poros, a partir de la curva granulométrica del filtro. En el apartado siguiente se describe algunos de los modelos de poros empleados por distintos investigadores.

El análisis numérico debe también considerar el movimiento de las partículas de base bajo las fuerzas de filtración y la captura de éstas dentro del filtro. La retención de una partícula se suele modelizar por una comprobación probabilística de los tamaños de las partículas de la base y de los poros del filtro. Una partícula más pequeña que el poro del filtro puede atravesarlo hasta otro poro donde se repite la comparación probabilística (Silveira 1965, Schuler 1996). De esta manera, la distancia esperada de infiltración de las partículas de suelo base puede ser simulada por un análisis probabilístico de la curva granulométrica del suelo base y la de los poros del filtro.

Un buen modelo debe considerar también los siguientes factores: la cantidad de partículas de base movilizadas por efecto de las fuerzas de filtración y los cambios en la distribución del tamaño de poros conforme se capturan partículas de suelo Base.

El análisis numérico proporciona modelos detallados de lo que ocurre en la interfase base-filtro. Modelizando las partículas de suelo base, estos métodos proporcionan una indicación del espesor de filtro requerido, la cantidad de material perdido e incluso pueden estimar la probabilidad de fallo. De cualquier manera, algunas de las simplificaciones hechas en estos modelos reducen su precisión y además suelen contener parámetros de muy difícil estimación.

2.3.2.3 *Modelos de Poros*

Los modelos de poros han sido empleados asiduamente para modelizar filtración química, permeabilidad y transporte de contaminantes. Esta discusión se limita a los modelos empleados en ingeniería geotécnica para filtros. Silveira (1965) propuso un modelo de poros que consideraba que el tamaño de un poro es el mayor círculo que puede encajar entre tres partículas de filtro en contacto. El modelo supone que :

1. Los granos son esféricos
2. El Filtro tiene su máxima densidad
3. La posición relativa que ocupan los granos es aleatoria

Como muestra la Fig. 2a, un poro se produce por tres partículas de filtro que son tangentes entre sí y el diámetro del poro, - d -, es una función de los diámetros de esas partículas. Conociendo las probabilidades de ocurrencia de cada diámetro de partícula de filtro, determinado a partir de la curva granulométrica, una combinación de esas probabilidades dará lugar a una probabilidad del tamaño de poro, y de aquí, a una distribución de los tamaños de poros.

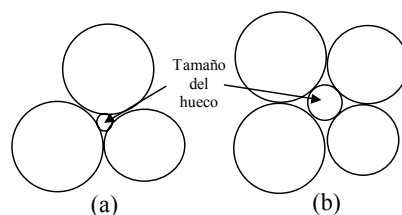


Figura 2– Disposición de las partículas

Se considera que una partícula de base se encuentra aleatoriamente con poros seleccionados de la distribución de poros en capas unitarias como muestra la Fig.3 y se emplean funciones de probabilidad para estimar el número de confrontaciones entre poros generados aleatoriamente y partículas de base que serán retenidas por ellos. Puesto que los filtros no siempre están compactados a su máxima densidad, en la Fig. 2b se muestra un modelo alternativo para el estado menos denso de un suelo, donde cuatro partículas se combinan para formar un poro.

El modelo de tamaño de poros de Silveira ha demostrado ser una buena aproximación para filtros uniformes. De cualquier manera, en filtros más ampliamente graduados, el empleo de la distribución de partículas en peso (como se determina por tamizado), para representar las partículas del filtro introduce ciertos errores. Esto es porque las partículas gruesas, con una masa elevada, serán representadas como formando parte de una gran fracción de los poros, mientras que es realmente poco probable que esas partículas gruesas puedan encontrarse para formar un gran poro. Humes (1996) ha demostrado que el modelo de Silveira predice un aumento en el índice de poros de gran tamaño respecto al tamaño medio de las partículas del filtro, d_{v85}/D_{50} , al aumentar el coeficiente de uniformidad - C_u -, lo cual es contrario a la tendencia esperada.

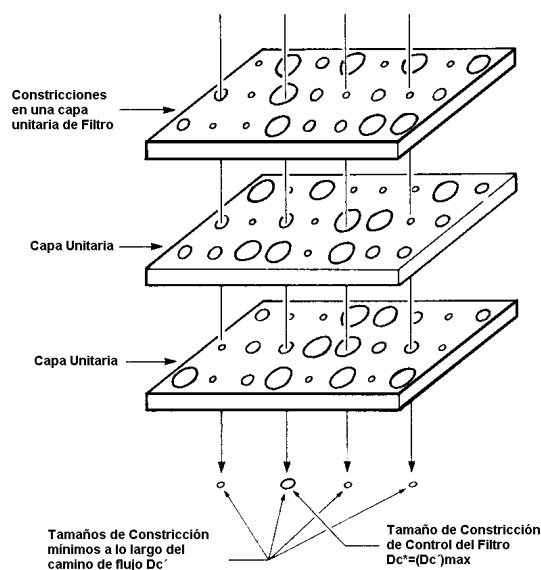


Figura 3 – Modelo de Filtro por capas - Kenney et al. (1985)

Kenney et al. (1985) y Federico y Musso (1992) abordaron este problema convirtiendo la curva granulométrica del filtro en peso a una curva por número de partículas. Esto consigue una mejor aproximación pero aún da lugar a errores para filtros ampliamente graduados. Humes (1996) y Schuler (1996) han adoptado una curva granulométrica por superficie de las partículas. Se considera que esto representa mejor a las posibles partículas que pueden formar un poro, ya que, aunque sean más pequeñas, tendrán un mayor número de contactos debido a su mayor superficie.

Un modelo alternativo de poros representa los poros del filtro como una serie de canales de diámetros variables. Wittman (1979) tomó una muestra de medio poroso, la rellenó con resina y después de endurecida cortó la muestra en secciones para examinar la distribución de poros. Empleando esta distribución de poros medida como una función de probabilidad, desarrolló un modelo de camino de flujo en forma de un canal entre poros con una anchura irregular en la dirección del flujo. La más pequeña de las constricciones de poro dentro de un canal gobierna el tamaño de partícula de Base que puede pasar. El trabajo de Wittman ha recibido algunas críticas porque él midió tamaños de poro mientras que debería haber medido las conexiones

entre poros (constricciones) que son las que dan lugar a las restricciones del flujo. El modelo de Wittman supone que el filtro está formado por una serie aleatoria de partículas esféricas donde la distribución del tamaño de poros está basada en la distribución del tamaño de partículas en número. Este modelo concuerda bien con los datos experimentales.

Indraratna y Vafai (1997) han adoptado un modelo similar de los poros del filtro en el que se consideran canales paralelos de constricciones y poros (como se muestra en la Fig.4). Kovacs (1981) ha mostrado que este modelo es una buena representación de los grandes y pequeños poros en un suelo natural. En este modelo el diámetro mínimo del canal de poro, - d_0 -, viene dado por la siguiente ecuación:

$$d_0 = 2.67 \frac{n}{1-n} \frac{D_h}{\alpha} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde - D_h - es el diámetro equivalente medido en peso y - α - es el coeficiente de forma. En Indraratna y Vafai podemos encontrar métodos para determinar esos valores. Una limitación de este modelo es que el valor de - d_0 - en la Ec. 9 es muy sensible al coeficiente de forma, α . Vafai (1996) muestra que el modelo es preciso para partículas uniformes. A partir de un coeficiente de uniformidad, - C_u -, superior a seis (ej. suelos bien graduados), el modelo irá perdiendo precisión a no ser que el valor de - α - pueda ser estimado correctamente.

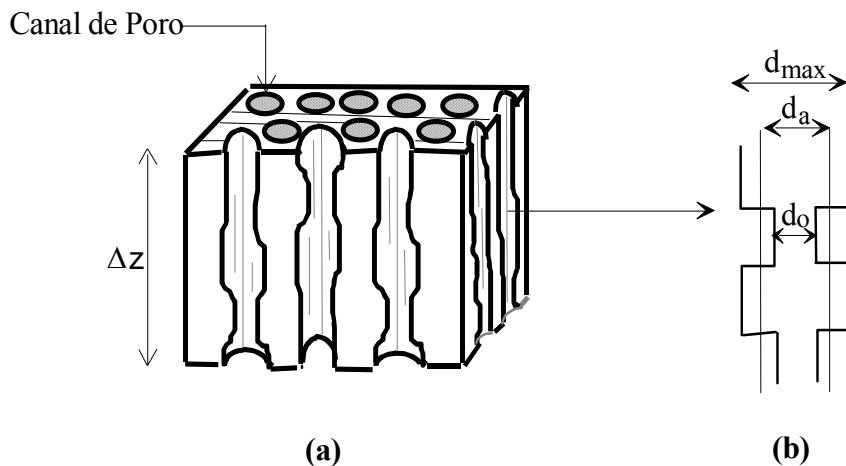
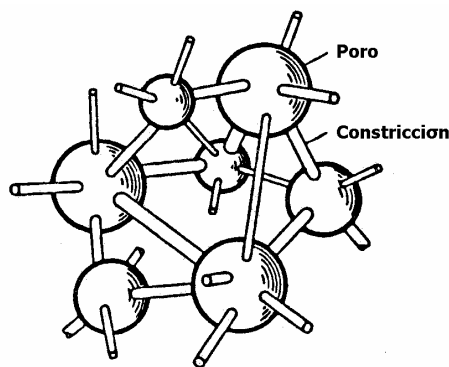


Figura 4 – Modelo de canal de poros - Indraratna y Vafai (1997)

Otro progreso reciente ha sido emplear un modelo de red de poros. Witt (1992) desarrolló un modelo de poros con esferas interconectadas por conductos (constricciones) como se ve en la Fig. 5. Este modelo supone que para cada poro hay un número de salidas posibles, y que la mayor de ellas determinará si una partícula puede moverse o no dentro de él.

A partir de las medidas de la distribución de los tamaños de constricción en un modelo real, en el cual se vertió silicona dentro de los poros de una grava, se determinó una distribución estadística del tamaño de las mayores salidas. Se ha comprobado que la distribución de los mayores tamaños de salida sigue una ley log-normal. Empleando métodos estocásticos, se puede determinar a partir de la distribución del tamaño de las mayores salidas la probabilidad de que un grano encuentre una constricción a través de la cual no puede pasar después de un cierto número de confrontaciones.

**Figura 5.- Modelo de Red de Poros – Witt (1992)**

Schuler empleó un modelo de retícula cúbica de poros interconectados por seis constricciones, similar al de Witt (1992), como se ve en la Fig.6. El tamaño de las constricciones se ha calculado empleando una adaptación del método geométrico de Silveira (1965), como se ve en la Fig.7. El modelo prevé una reducción del tamaño de constricción con aumento de densidad al disminuir el ángulo α . La “probabilidad

de ocurrencia” de cada tamaño de partícula del filtro, empleado para calcular la distribución de tamaños de constricción, se determina a partir de la distribución por superficie.

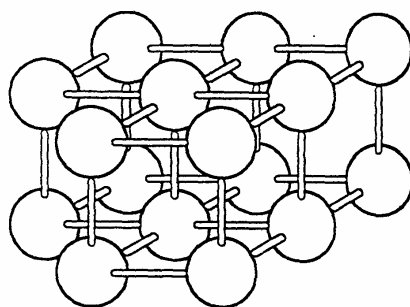


Figura 6 – Red Reticular Cúbica de Poros - Schuler (1996)

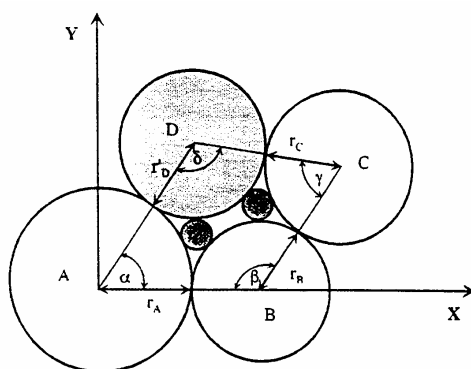


Figura 7- Método para Determinar la Distribución de los Tamaños de Poros - Schuler (1996)

2.3.2.4 Métodos Probabilísticos

Los métodos probabilísticos simulan la probabilidad de que una partícula de base penetre dentro de los poros del filtro por comparación con la probabilidad de que esa partícula encuentre un poro a través del cual pueda pasar. A continuación se describen algunos de los métodos propuestos.

□ *Métodos basados en la distribución de tamaños de poros*

Silveira (1965) fue el primero en aplicar métodos probabilísticos para estudiar la migración de partículas de suelo base dentro de filtros. Su análisis se basó en el estudio del camino probable a través del cual una partícula de base, con un diámetro equivalente - d' -, puede entrar en el filtro. El camino depende de los poros que la partícula encuentre en su trayectoria. A partir de la distribución del tamaño de poros, se puede encontrar la probabilidad - P - de que una partícula de base, - d' -, encuentre en una confrontación un poro, - \bar{d} -, tal que - $\bar{d} > d'$ -. (ej. - P - es la probabilidad de que una partícula atraviese un poro). Entonces, el número de confrontaciones, - n -, necesario para parar una partícula, con un nivel de confianza - \bar{P} - es :

$$n = \frac{\text{Log}(1 - \bar{P})}{\text{Log}P} \quad \text{- Ecuación 10}$$

La distancia - S - recorrida por la partícula es: $S=n.s$, donde - s - es la distancia entre cada confrontación. Silveira supone que - s - es igual que el diámetro medio de los granos de filtro (a partir de la curva en peso). Wittman (1979) sugirió que se debía adoptar el diámetro medio de los granos empleando la distribución por número. El modelo puede entonces mostrar la transición continua entre base y material de filtro, lo que nos permite ver que le ocurrirá al filtro durante la filtración, y como le afectará la infiltración de partículas de suelo base. También analiza el efecto del espesor del filtro.

El modelo no considera el cambio en la curva granulométrica del filtro debido a la retención de partículas de base. Humes (1996) mostró que el método de Silveira da mejores resultados cuando la distribución de los tamaños de poros es determinada a partir de la curva granulométrica del filtro calculada por superficie mejor que por masa.

Kenney et al. (1985) empleó el modelo de Silveira y el concepto de una serie de capas unitarias como se muestra en la Fig.3. Más que un análisis probabilístico de la

profundidad de infiltración de partículas, lo que se tiene en cuenta es la probabilidad de ocurrencia de un tamaño de constricción mínimo a través del camino de flujo perpendicular a las capas unitarias. Kenney et al. (1985) encontró que el tamaño mínimo de constricción encontrado a lo largo del camino de flujo alcanza rápidamente un valor constante, llamado tamaño de constricción de control, el cual está relacionado con el tamaño de las partículas de filtro.

$$DC^* / D_{50} \leq 0.25 \quad \text{ó} \quad \text{- Ecuación 11}$$

$$DC^* / D_{15} \leq 0.2$$

□ Análisis Estocástico de Redes de Poros

Witt (1992) adoptó un análisis estocástico del modelo de red de poros descrito anteriormente, generando unas series aleatorias de constricciones y comparando la mayor constricción con el tamaño de la partícula de suelo base para determinar si el movimiento era posible. Witt mostró que conforme el número de confrontaciones aumenta, el mínimo tamaño de constricción de cualquier camino tiende a un valor constante - d_p - para todos los caminos y para una profundidad de penetración - l_e -:

$$d_p = 0.23 d_g \quad \text{para } l_e \sim 300 D_{5F} \quad \text{- Ecuación 12}$$

En la Ec. 12, - d_g - es el tamaño medio de los granos del Filtro (en número) . Si - l_e - aumenta por encima de - $300 D_{5F}$ - la disminución en la apertura efectiva del filtro es despreciable.

Si hay granos en el suelo base que son mayores que - d_p - ; entonces se alcanzará un estado de equilibrio (siempre que el suelo base sea internamente estable) cuando todos los grandes caminos dentro del filtro sean taponados y exista una interfase estable. La cantidad de suelo base perdido antes de que se alcance el estado de equilibrio depende de los tamaños relativos de las partículas. Witt (1992), a través de modelización y experimentación, buscó una relación entre el tamaño de apertura efectiva - d_p - y el porcentaje de material base más fino que - d_p - . Witt mostró que

para $d_p < d_{85B}$ a d_{90B} -, sólo una pequeña cantidad de suelo base se pierde antes de alcanzarse las condiciones de estado de equilibrio. Witt trató de definir un factor de seguridad para el Filtro basado en la cantidad de suelo base perdida antes de alcanzarse el estado de equilibrio.

□ *Teoría de la Percolación*

Schuler(1996) empleó la teoría de la percolación para modelizar el movimiento de partículas de suelo base a través del modelo de red de poros descrito anteriormente.

Esta teoría sugiere que una red puede ser percolada indefinidamente si la probabilidad de penetración (pasar desde una capa a la siguiente a través de una constricción) es mayor que una cierta probabilidad crítica, específica de la red de poros. Esto significa que una partícula de suelo base puede atravesar un filtro indefinidamente grueso si la probabilidad de que la partícula encuentre constricciones de mayor tamaño que ella, supera a la probabilidad crítica, - p_{cr} -. Para examinar la profundidad de infiltración de un gran número de partículas de base de distintos tamaños dentro del modelo de Filtro se emplea una simulación de Monte Carlo. La simulación muestra que $p_{cr} = 37\%$. (ej. correspondiente al 73% acumulado de la distribución de tamaño de constricción). La profundidad media de penetración (número de confrontaciones), - $E(p)$ -, puede ser estimada por la ecuación :

$$E(p) = 123(36.3 - p)^{-0.88} \quad \text{para } p < 36.3\% \quad \text{- Ecuación 13}$$

A pesar de que no hay comparación de este modelo con experimentos de laboratorio o resultados de campo , parece ser teóricamente correcto. El modelo combina varios de los mejores conceptos de aproximaciones analíticas anteriores y da lugar probablemente al más preciso de los modelos disponibles.

□ *Otros Modelos Probabilísticos*

Se han propuesto varios modelos numéricos que generalmente proporcionan un método alternativo para determinar la distribución de tamaños de poros, o una nueva aproximación probabilística para el transporte de partículas a través de una red de poros supuesta. De cualquier manera, algunos de los modelos propuestos no son útiles para el diseño práctico, ya que requieren un gran número de parámetros empíricos o una complicada modelización por ordenador. Una crítica aún más importante a estos modelos es que los modelos de distribución de poros no describen adecuadamente suelos ampliamente graduados y además sólo considera partículas esféricas no cohesivas.

Imdakh y Sahimi (1987) han empleado una simulación de Monte Carlo para modelizar la filtración en Ingeniería Química. Las partículas tienen un movimiento másico aleatorio y son retenidas si encuentran un poro menor que el diámetro de la partícula (generado aleatoriamente a partir de la distribución probabilística del tamaño de poros). Los poros taponados reducen la permeabilidad y los posibles caminos de flujo dentro del filtro.

Aberg (1992, 1996) ha producido un modelo para calcular el índice de poros y el tamaño medio de poro en función de la distribución del tamaño de granos basada en un modelo estocástico de la estructura de poros en suelos sin cohesión. El modelo considera cualquier trayectoria recta aleatoria a través de un conjunto de partículas y compara la longitud de los segmentos de intersección de esa trayectoria con los granos y con los poros. Considerando la longitud media de estos segmentos, se desarrolla un modelo para estimar el tamaño medio de los poros.

El modelo de Aberg tiene la ventaja de considerar tanto suelos donde todas las partículas forman el esqueleto del material, como suelos donde las partículas más finas se encuentran sueltas dentro del esqueleto de las partículas más gruesas. Aberg encontró una buena correlación entre las predicciones de su modelo y los ensayos de Filtros realizados por Kenney et al. (1985).

Federico y Musso (1992) han adaptado el modelo de Silveira (1965) para producir lo que ellos sugieren que es una mejor distribución del tamaño de poros basada en la curva granulométrica del Filtro y su densidad. Ellos también modifican el modelo de transporte para excluir aquellos poros ya encontrados por las partículas en su movimiento. Proponen un cálculo nuevo para las distancias medias entre las constricciones (s - en la notación de Silveira) donde s es igual al diámetro medio medido en número. Sugieren que se necesita profundizar en el proceso de taponamiento para eliminar la restricción fundamental, ej. la distribución del tamaño de poros del filtro no es modificada por el proceso de difusión de las partículas que tiene lugar durante la filtración.

2.3.2.5 Modelos de Transporte de Partículas

Los modelos de transporte de partículas han sido extensamente considerados en el transporte de contaminantes y en la filtración química. La aproximación más frecuente es considerar la conservación de la masa y el momento para modelizar el flujo de un fluido que contiene partículas coloidales a través de los poros de un Filtro. La captura de partículas se debe a la atracción físico-química.

Honjo y Veneziano (1989) han desarrollado un modelo de transporte de partículas de suelo basado en la conservación de la masa en las fases sólida y líquida (“slurry” ó papilla). El modelo es capaz de describir la absorción y emisión de partículas de suelo en el tiempo en elementos diferentes del suelo base y el Filtro. También se han considerado distintos tamaños de partículas de suelo. El modelo se ha empleado para demostrar el fenómeno de autosellado y también se puede investigar con él la estabilidad interna.

Indraratna y Vafai (1997) emplean el transporte de partículas para desarrollar un modelo que incorpora un modelo simple de canales de poros, (Ver apartado 3), que determina las constricciones geométricas del movimiento. Ellos también tienen en cuenta las fuerzas hidráulicas necesarias para movilizar a las partículas. Si la fuerza hidráulica mínima es superada entonces el movimiento de las partículas se modeliza

mediante las teorías de mecánica de fluidos de la conservación de la masa y el momento para dar lugar a un modelo de transporte de partículas más que un análisis de la probabilidad de este movimiento.

El gradiente hidráulico crítico se determina a partir del balance entre las fuerzas de rozamiento y las fuerzas hidráulicas y gravitacionales. Si las fuerzas de filtración superan al gradiente hidráulico crítico y la partícula es menor que la constricción geométrica - d_0 -, ésta se moverá. El movimiento de las partículas está controlado por las ecuaciones diferenciales de la conservación de la masa, Ec 14, y el momento, Ec 15.

$$\frac{d(\rho_m u)}{dz} = \frac{d\rho_m}{dt} \quad \text{- Ecuación 14}$$

$$\sum F = \rho_m V_m \left(\frac{du}{dt} + u \frac{du}{dz} \right) \quad \text{- Ecuación 15}$$

Considerando un cierto número de elementos en la interfase base-filtro, el movimiento de las partículas está modelizado por un análisis de diferencias finitas.

El procedimiento es determinar, a partir de las curvas granulométricas iniciales de los elementos, el diámetro mínimo del canal de poro - d_0 - para cada elemento. Esto determina qué partículas pueden pasar a través del próximo elemento. La erosión del suelo base está controlada por las ecuaciones de la masa y el momento. La distribución del tamaño de las partículas es recalculada en cada etapa y el proceso se repite. Este análisis muestra el cambio gradual en la distribución del tamaño de las partículas, la permeabilidad y la porosidad de los elementos de base y filtro y por lo tanto describe qué está ocurriendo en la interfase base-filtro a lo largo del tiempo para todo el rango de tamaños.

Este es el único método conocido que utiliza la curva granulométrica completa y que considera la variación de ésta a lo largo del tiempo. La elección de un valor simple para el diámetro mínimo del canal de poro - d_0 - puede ser justificada por el trabajo de Kenney et al. (1985) y Witt (1992), los cuales encontraron que después de una corta distancia la constricción más pequeña de cualquier canal tenderá a un valor simple, el tamaño de constricción de control - D_c^* -. De cualquier manera el diámetro del canal - d_0 - suele ser mayor que el tamaño de constricción de control de Kenney et al. (1985) y Witt (1992), y esto compromete la precisión del modelo.

2.3.2.6 Comparación de Modelos de Poros

Con tantas técnicas diferentes para modelizar el movimiento de las partículas, es necesaria una comparación entre ellas (Locke, Delgado e Indraratna 1999). El procedimiento general en la mayoría de los métodos numéricos es predecir la profundidad de infiltración de las partículas de base de distintos diámetros. Los modelos de Schuler (1996) y Silveira (1965), (adaptado por Humes, 1996), lo consiguen directamente. Los tamaños de constricción de control de Witt (1992) y Kenney et al. (1985) pueden ser comparados también ya que ellos predicen un tamaño simple de partículas de suelo base por debajo del cual la infiltración será infinita. El modelo de Indraratna y Vafai (1997) no puede ser comparado directamente con otros modelos, mientras que el modelo del canal de poros y el diámetro mínimo - d_0 - sí puede ser comparado .

Para la comparación se emplearán dos materiales de Filtro :

1. Filtro de arena de graduación lineal, $D_{15F} = 1.3$ mm y $C_u = 2$
2. Filtro de arena de graduación lineal (en escala log.), $D_{15F} = 1.3$ mm y $C_u = 6$

Las Figuras 8 y 9 muestran la profundidad de infiltración prevista, determinada por los métodos de Humes (1996) y Schuler (1996), dada por las ecuaciones 9 y 13.

También se pueden ver los tamaños de constricción de control predichos por Witt (1992) y Kenney et al. (1985), dados por las ecuaciones 11 y 12; y el diámetro mínimo del canal de poro - d_0 - del modelo de poros de Indraratna y Vafai (1997), Ec. 9.

Kenney et al. (1985) presenta dos fórmulas para el tamaño de constricción de control basadas en el D_{15F} y el D_5 del Filtro, por lo que se ha mostrado solamente el valor más alto que además es el más conservador.

Como se puede ver, en ambos ejemplos el modelo de Schuler predice un diámetro de percolación muy próximo al calculado por Kenney y Witt. El modelo de Humes predice que para la infiltración se precisan partículas mucho más finas, mientras que el modelo de Indraratna y Vafai dan valores cercanos a los de otros modelos, pero el diámetro mínimo de canal de poro previsto es más grande que en otros modelos para el Filtro más ampliamente graduado. De hecho, Vafai (1996) ha señalado que la validez del - d_0 - tiende a disminuir cuando el C_u es mayor que 6. El modelo de Indraratna y Vafai (1997) supone partículas prácticamente esféricas (coeficiente de forma $\alpha = 6$), lo que hace disminuir la precisión cuando se trabaja con Filtros ampliamente graduados.

Las ecuaciones para determinar el tamaño de constricción de control obtenidas por Witt (1992) y Kenney et al (1985), han sido verificadas mediante una amplia experimentación en laboratorio y por lo tanto es de esperar que sean más precisas. Esto sugiere que el modelo de poro adoptado por Schuler (1996) es en general más representativo para suelos reales. De cualquier manera, la mejor aproximación puede ser calcular - d_0 - por los métodos de Kenney et al.(1985) ó Witt (1992), y entonces emplear el modelo de Indraratna y Vafai (1997) para obtener el comportamiento del filtro en función del tiempo de una forma completa.

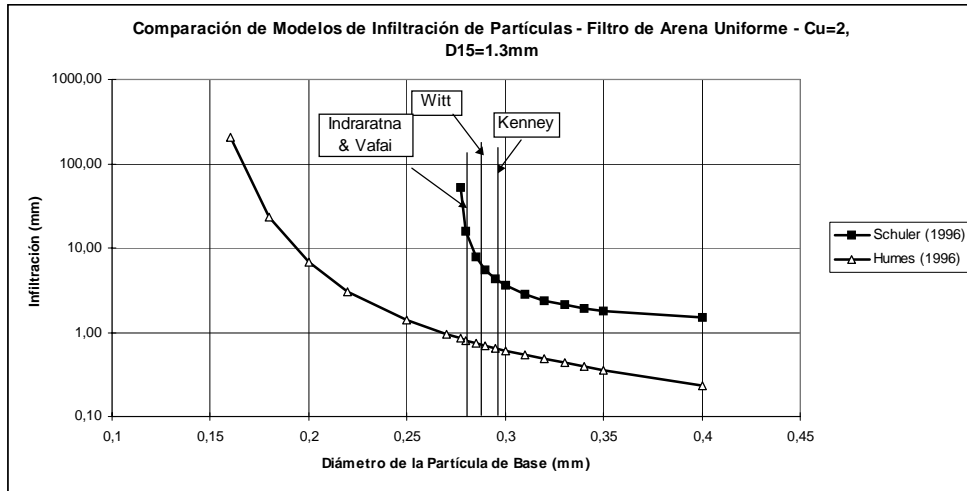


Figura 8 .- Profundidad de Infiltración prevista - Filtro Uniforme

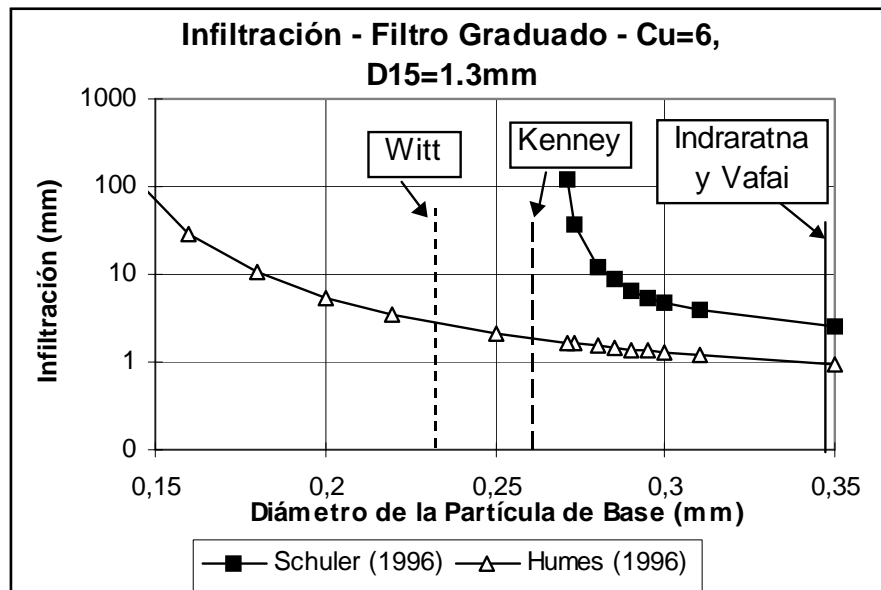


Figura 9.- Profundidad de infiltración prevista - Filtro Graduado

2.3.2.7 Conclusiones sobre los métodos numéricos

En los últimos años se han conseguido avances significativos en la modelización numérica de la migración de partículas dentro de los filtros. La mayoría de los métodos centran la atención en la profundidad esperada de infiltración de una

partícula dentro de un poro del filtro mediante análisis probabilístico. La elección de un modelo de poros es un paso muy importante en el análisis numérico. El modelo de red reticular cúbica de poros adoptado por Schuler (1996) ha demostrado ser capaz de predecir las profundidades de infiltración de partículas en concordancia con los valores predichos a partir de una amplia experimentación en laboratorio llevada a cabo por Witt (1992) y Kenney et al. (1985).

Aberg (1992) ha considerado suelos en los cuales las partículas más finas pueden estar sueltas dentro de un esqueleto de partículas más gruesas, esto es muy importante en la modelización de materiales ampliamente graduados. La simulación de Monte Carlo empleada por Schuler (1996) proporciona unas predicciones muy buenas de la profundidad de infiltración de partículas dentro del Filtro. De todas formas el modelo no considera los cambios temporales en los poros del Filtro ni en la permeabilidad debidos a la captura de partículas.

El modelo de migración de partículas de Indraratna y Vafai (1997) es el único conocido que considera las ecuaciones básicas de la conservación de la masa y del momento en la modelización del transporte de masa. Esto permite una observación del tiempo necesario para la migración de una partícula y también considera la modificación de las propiedades del material conforme las partículas son capturadas dentro de los poros del Filtro. El modelo de poros adoptado por Indraratna y Vafai es una representación simple adecuada para filtros uniformes pero se vuelve menos precisa cuando $Cu > 6$, por ejemplo, en filtros bien graduados.

Es preciso un mayor desarrollo para mejorar este modelo de poros, posiblemente adoptando la red reticular cúbica de Schuler (1996), o determinando el valor más probable de constricción de control basado en las ecuaciones de Witt (1992) y Kenney et al. (1985) y entonces aplicar el modelo de migración de partículas de Indraratna y Vafai (1997).

Todos los modelos que se han comentado aquí son aplicables para bases no cohesivas. Reddi y Bonala (1997) han modelizado el taponamiento de filtros debido

a captura físico-química de partículas coloidales. De cualquier manera este modelo no considera la captura física de partículas más grandes, por lo que un modelo para suelos base cohesivos debería considerar las fuerzas de cohesión que se oponen a la erosión, los efectos físico-químicos que capturan partículas de arcilla y la fisuración de la base cohesiva debida a los asientos diferenciales, etc.

En la actualidad, Indraratna y Locke, de la Universidad de Wollongong, (Australia), están investigando sobre un modelo numérico para suelos cohesivos, habiéndose establecido una colaboración mutua entre estos investigadores y el autor de la presente Tesis Doctoral para combinar los resultados de la experimentación directa con las predicciones de los modelos numéricos.

2.4 Influencia del suelo base

2.4.1 Introducción

En los apartados anteriores se han descrito los posibles mecanismos de erosión interna, (arranque y transporte de partículas), así como el funcionamiento de los filtros granulares como protección frente a este fenómeno. Aunque en esta descripción se ha incluido alguna mención a las variables que influyen en cada proceso, es importante realizar un repaso más exhaustivo y metódico que permita identificar cada una de las variables influyentes así como indicar su efecto.

La mayoría de las investigaciones sobre esta cuestión han empleado ensayos de laboratorio o modelización matemática para estudiar estos procesos por separado o de forma conjunta. Así por ejemplo, en 1976 Sherard estudió específicamente la dispersabilidad de las arcillas mediante el ensayo “pinhole”, mientras que en 1982, con el “Slot Test”, (ensayo de ranura) y el “Slurry Test”, (ensayo con papilla), y en 1985 con el ensayo NEF (ensayo de filtros sin erosión) estudió la relación existente entre la granulometría del suelo base y la del filtro necesario para evitar el progreso de la erosión interna.

En los siguientes apartados se estudia la influencia que tienen las distintas variables relativas al suelo base, distinguiendo por un lado aquellos que influyen en la erosionabilidad del suelo base y por otro, los que influyen en el diseño del filtro granular preciso.

2.4.2 Granulometría

El tamaño de las partículas del suelo base es determinante tanto en su comportamiento frente a la erosión como en la posibilidad o no de atravesar los poros del filtro granular. Pero no basta con considerar el tamaño de partículas aisladas ya que los fenómenos de autofiltración dependen de la distribución de los tamaños de todas las partículas del suelo.

Por ello es fundamental conocer la curva granulométrica del suelo que se puede obtener por métodos diferentes: para la fracción gruesa, (mayor de 0.08 mm), se obtiene mediante tamizado, mientras que para la fracción fina es necesario emplear otros métodos como la sedimentación, la granulometría por rayo láser o la interpretación de fotografías con microscopio electrónico.

Es generalmente aceptado que en los suelos arcillosos la fracción gruesa tiene menor importancia en el resto de las propiedades del suelo que la fracción fina, de hecho, algunos autores⁹ como Sherard et al (1984) o Foster y Fell (1999), emplean en sus ensayos solamente la fracción menor de 4.75 mm, e incluso Fujisawa et al. (1996), sólo utiliza la fracción que pasa por el tamiz de 0.074 mm.

Respecto a la distribución granulométrica de la fracción fina, puesto que el tamizado convencional es inviable, generalmente se mide el tamaño de las partículas por métodos indirectos que tienen algunas limitaciones que interesa resaltar.

⁹ Este tema se desarrolla más ampliamente en los siguientes apartados

La granulometría por sedimentación se basa en determinar el tamaño de las partículas del suelo base midiendo la velocidad de sedimentación de las mismas, aplicando la conocida ley de Stokes.

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\eta} D^2 \quad \text{Ecuación 16}$$

Este es el método más extendido en los laboratorios de Mecánica del Suelo, sin embargo Jiménez Salas et al (1975) señalan una serie de consideraciones muy importantes que hay que tener en cuenta:

- Lo que se calcula con la ley de Stokes es el diámetro de una partícula de forma esférica, sin embargo, las partículas de arcilla tienen formas muy variadas y muy alejadas de ésta, por lo que el ensayo de sedimentación lo que ofrece es el “diámetro equivalente”, es decir, el de una partícula esférica que tenga la misma velocidad de caída que la real. Así por ejemplo, en el caso de las partículas de caolín es posible que al tener forma discoidal, su diámetro real sea diez veces superior al equivalente.
- Las partículas de arcilla suelen ser muy heterogéneas, teniendo diferentes pesos específicos, mientras que al aplicar la ley de Stokes se emplea generalmente un valor medio lo que también le resta precisión a la medida.
- Para partículas de más de 0.05 mm aproximadamente de diámetro, la velocidad de caída es tan alta que deja de ser válida la ley de Stokes que precisa un régimen laminar.
- Para partículas inferiores a 0.0002 mm, el movimiento browniano anula la validez de la ley de Stokes.

Teniendo en cuenta estas observaciones es posible calcular con suficiente precisión el tamaño de las partículas elementales de arcilla, sin embargo en la realidad éstas partículas tienen tendencia a flocular dando lugar a agregados de partículas que no

pueden ser separados por procedimientos convencionales sino que precisan el empleo de agitación mecánica, ultrasonidos o agentes dispersantes.

Aunque hay bastante discusión sobre si se debe llegar a obtener las partículas elementales o son los flóculos la mínima división “natural”, se ha adoptado como procedimiento estándar el calcular la granulometría por sedimentación previa dispersión de los flóculos, por ejemplo empleando hexametáfosfato sódico. Sin embargo es también recomendable determinar la granulometría sin dispersante.

Como argumento a favor del empleo de dispersante está el hecho de que de no utilizarlo, los agregados arcillosos del tamaño limo o arena serían contabilizados como tales, mientras que sus propiedades son claramente diferentes.

Sin embargo, a otros efectos, como el transporte de sedimentos o la interceptación en la red de poros del filtro, parece poco probable que se produzca una disgregación total de los flóculos en partículas elementales por lo que es preciso contabilizar la “granulometría de grumos”.

Sobre esta y otras cuestiones relativas a la granulometría del suelo base se va a repasar a continuación las conclusiones de recientes investigaciones.

Vaughan y Soares (1982), consideran que lo que el filtro debe retener son los flóculos del suelo base, por lo que interesa es determinar su tamaño y no la curva granulométrica convencional.

Como se comenta en el apartado relativo a la permeabilidad del filtro, han obtenido la siguiente expresión:

$$k_F = 6.1 \times 10^{-6} \times \delta^{1.42} \quad \text{Ecuación 17}$$

en el caso de que se prefiera usar el d_{85B} , la expresión queda de la siguiente forma:

$$k_F = 6.7 \times 10^{-6} \times d_{85B}^{1.52} \quad \text{Ecuación 18}$$

donde: k es la permeabilidad del filtro (**m/s**), δ el tamaño de flóculo del suelo base (μm) y d_{85B} está también expresado en μm .

Es muy importante destacar, y de hecho así lo hace el propio Vaughan, que la relación obtenida por ellos considera permeabilidad del filtro y tamaño de flóculo de la arcilla, sin embargo, para poder emplear la relación más frecuentemente conocida que incluye el d_{85} de la arcilla, es preciso tener muy presente las consideraciones que se han tenido en cuenta para hallar la relación entre el tamaño de flóculo y el d_{85B} , como son por ejemplo la validez de la ley de Stokes que calcula el tamaño de partícula como el de la esfera que tiene la misma velocidad de sedimentación y la densidad considerada del flóculo. Para cualquier otra forma de partícula o densidad de flóculo, la segunda relación no es válida.

También hay que tener en cuenta que, como se acaba de comentar, al aplicar la ley de Stokes se consideran esferas equivalentes, sin embargo, al producirse una filtración a través de una fisura, parece lógico pensar que si la partícula es alargada en vez de esférica es más fácil que se quede atrapada y podría dar lugar a un filtro menos exigente por lo que en función de la forma de las partículas el criterio de filtración se puede ver modificado.

Por otra parte, Arulanandan y Perry (1983) han comprobado las curvas granulométricas de los filtros y bases empleados en cuatro presas que fallaron o casi por sifonamiento, habiendo sido diseñados sus filtros siguiendo el criterio de Terzaghi, con otros que fueron completamente estables, concluyendo que la curva granulométrica de los finos del suelo base no proporciona por sí sola información suficiente para saber si un filtro determinado es adecuado o no, siendo necesario considerar además las características de erosionabilidad del suelo base.

En los Estados Unidos, Sherard et al. (1984), tras ensayar casi 200 muestras de bases empleadas en presas norteamericanas mediante el ensayo denominado "Slot Test" (ensayo con ranura), y el ensayo "Slurry Test" (ensayo con papilla), han obtenido que la mejor forma de representar el comportamiento del suelo base es el empleo del

d_{85B} en correlación con el D_{15F} , sin embargo considera que la correlación entre D_{50F} y d_{50B} debe ser abandonada.

Estos investigadores señalan además que los resultados de ambos ensayos son idénticos, ya que en ambos casos las partículas erosionadas se rompen dando lugar a las partículas elementales, por lo que no se produce depósito de grumos o agregados de partículas.

Sherard et al. (1984) afirman además que no es preciso diseñar un “filtro perfecto” como propone Vaughan y Soares (1982) ya que el filtro debe retener las partículas de suelo base de 50-80 μ de diámetro y no los flóculos de 10 μ .

Es necesario destacar que en una conferencia que dio Sherard en Madrid en el año 1982, señala que la granulometría del suelo base se refiere a la fracción que pasa por el tamiz número 4 (4.76 mm), ya que el resto de la fracción del suelo base no influye.

Los ensayos realizados con el “No Erosion Filter Test” en 1985 confirman la validez del d_{85B} .

En España, en los ensayos realizados con el material de la Presa de Canales empleando el “Slot Test” y el “Slurry Test” de Sherard et al. (1984), Bravo y Maeso (1985) han observado que parece que el comportamiento de estas bases finas no tiene apenas que ver con el tamaño de su d_{85B} o equivalente, pues si se calcula el tamaño de la constricción de control los filtros empleados, según Kenney et al (1985), es de 50 micras para el filtro más fino de los ensayados, mientras que el d_{85B} de la base ensayada es del orden de 10 micras, medido con peptizante, y de 25 micras, medido con agua destilada, por lo que no parece que el éxito de los filtros pueda justificarse por consideraciones puramente geométricas.

Posteriormente, Khor y Woo (1989), han ensayado suelos residuales tropicales de diferentes presas de Malasia, que van desde las arcillas arenosas hasta los limos, mediante una versión del ensayo NEF de Sherard y Dunningan (1985) en la que se ha

aumentado el diámetro de la probeta para permitir la colocación del material del suelo base sin segregación.

Es interesante señalar en primer lugar que los autores indican que las velocidades tan altas que se producen en el ensayo son capaces de disgregar los flóculos.

Además, Khor & Woo (1989) señalan que en este tipo de suelos, el d_{85B} de la curva granulométrica completa no tiene influencia en el resultado del ensayo, siendo preciso calcular el d_{85B}^* , que se define como el diámetro del tamiz que deja pasar el 85 % en peso del suelo base, pero considerando únicamente la fracción que pasa por el tamiz 200 de la serie ASTM (0.074 mm), por lo tanto la existencia de arenas y gravas en el suelo base no tiene una influencia significativa en el comportamiento frente a la erosión interna.

En cuanto al d_{50B} , lo comparan con el D_{50F} y no observan ninguna correlación, coincidiendo con las observaciones de Sherard et al. (1985).

También Honjo y Veneciano (1989) han comprobado que el d_{85B} es el mejor diámetro de representación del comportamiento del suelo base. Por otra parte el ratio d_{95B}/d_{75B} , que denominan “índice de autosellado”, tiene una influencia decisiva en la capacidad del suelo para formar una capa de autosellado de forma satisfactoria, lo cual es imprescindible para poder emplear el d_{85B} , ya que éste supone que sólo son retenidas por el filtro las partículas más gruesas del suelo base, mientras que las más finas son retenidas por dicho mecanismo de autosellado.

Precisamente, sobre el empleo del d_{85B} , Indraratna et al. (1996) hacen algunas observaciones en concordancia con Vaughan y Soares (1982), ya que han comprobado que lo importante no es el tamaño de las partículas elementales del suelo base sino de sus flóculos, por ello emplean para definir al suelo base el δ_{85} . Por otra parte, esta floculación depende de la composición química del agua y de la mineralogía del suelo base. Respecto a la primera, señalan la importancia de los cationes existentes en el agua, en particular el catión Ca^{++} , que hace aumentar el

tamaño de flóculo. Por esta razón, en sus ensayos emplean agua destilada y le añaden cloruro cálcico hasta reproducir la misma concentración de cationes que en el agua del embalse. En cuanto a la mineralogía, aunque señalan su influencia no hacen ninguna especificación concreta..

En el caso de emplear como material impermeable suelos del tamaño grava bien graduados, el tamaño de comparación empleado por Zhu y Anderson (1996), es el denominado $P_{0.1}$, que significa el porcentaje en peso del suelo base menor de 0.1 mm.

También emplean del d_{85B}^* , definido como el d_{85B} pero de la fracción que es menor de 0.1 mm.

En cuanto a Honjo et al. (1996), han ensayado suelos no cohesivos con granulometría ampliamente graduada y discontinua empleando como filtro tamices concluyendo que la fracción más gruesa del suelo base es la que controla el éxito del mecanismo de autofiltración, siendo la porción fina menos importante.

En particular, los diámetros del suelo base que permiten predecir el comportamiento de ésta corresponden a la fracción más gruesa, entre el d_{95B} y el d_{70B} . También es influyente la amplitud de la granulometría del suelo base menor que el tamaño de apertura del filtro, mientras que el coeficiente de uniformidad del suelo base parece tener menos importancia.

Ante tanta dispersión de conclusiones existentes, Fischer y Holtz (1996) han realizado un estudio de los resultados de otros investigadores, (con muestras de suelo base no plásticas), concluyendo que el diámetro que mejor representa el comportamiento del suelo base es el d_{75B} . La razón de emplear el d_{75B} en vez del más usual d_{85B} es que si se compara la curva granulométrica de las partículas en peso (que es la forma normal de calcularla) y en número, se observa que el d_{85B} en peso equivale, para una muestra determinada, al d_{99B} en número, por lo que es excesivo intentar que se puedan erosionar sólo el 1% de las partículas, Sin embargo, el d_{75B} en

peso equivale al d_{96B} en número, lo cual es más razonable. Sin embargo, los autores afirman que aunque era de esperar un mayor correlación entre el D_{15FL} y diámetros inferiores al d_{75B} , eso no ocurre y por ejemplo, el d_{50B} no es un diámetro de comparación adecuado.

También han comprobado que el coeficiente de uniformidad del suelo base, (Cu_B), determina el valor de la ratio entre el D_{15F} y el d_{85B} , según una relación inversamente proporcional.

Igualmente Vaid y Tomlinson (1996) confirman la validez del d_{85B} para definir el comportamiento del suelo base, empleando como suelo base partículas esféricas de distintos tamaños para construir suelos con granulometrías lineales.

Sin embargo, Fujisawa et al. (1997), distinguen entre el d_{85B} de la fracción total y el d_{85B} de la fracción que pasa por el tamiz 0.074 mm, concluyendo que esta última fracción es más representativa del comportamiento del suelo base y que el tamaño máximo de la base no tiene ninguna influencia.

Al igual que hicieran Fischer y Holtz (1996), Foster y Fell (1999) realizaron al principio un análisis estadístico de los resultados obtenidos por otros investigadores, pero al observar que había pocos datos de bases con d_{85B} mayor que 0.1 mm, han realizado una serie de ensayos con muestras de este tipo. Consideran que es más representativo del comportamiento del suelo base el d_{95B} , aunque también emplea el d_{85B} . En cualquier caso, las muestras han sido cortadas previamente por el tamiz de 4.75 mm.

Muy recientemente, Locke e Indraratna (2000), empleando un ensayo de "Pinhole" modificado han medido la granulometría del suelo base original y la del material erosionado, tanto con dispersión mediante ultrasonidos como sin ella. Los ensayos han demostrado que la erosión de un suelo arcilloso a través de una fuga localizada produce partículas erosionadas que generalmente son significativamente mayores que los agregados del material original, aumentando esta proporción cuanto mayor es

el contenido de finos del suelo base. No han encontrado ninguna relación entre la velocidad del agua o el esfuerzo cortante y el tamaño de las partículas erosionadas antes de la dispersión.

En cuanto a la diferencia entre la granulometría sin dispersión y con ella, han comprobado que al producir la disgregación de los flóculos por ultrasonidos, a partir de un cierto tiempo se estabiliza el proceso de dispersión manteniéndose constante la granulometría, siendo esta una propiedad intrínseca del suelo ya que no varía significativamente ni con la humedad ni con la composición química del agua.

Para estudiar el fenómeno de la erosión han definido la “ratio de agregación” como el cociente entre el d_{85BE} y el d_{85BO} , (d_{85} de la base erosionada / d_{85} de la base original), ambos medidos después de la dispersión.

Posteriormente realizaron una serie de ensayos NEF siguiendo la metodología propuesta por Delgado y Locke (2000) para definir el filtro límite de cada una de las bases utilizadas anteriormente: comprobando que como variable representativa del suelo base se puede elegir el $d_{85BE(disp)}$ o el d_{85BO} , (d_{85B} de las partículas erosionadas, calculado después de dispersión y d_{85B} del suelo base original, respectivamente).

Como se puede ver, no existe un acuerdo general sobre el diámetro del suelo base que mejor representa su comportamiento, pero si hay una opinión mayoritaria de que el d_{85B} es el que obtiene mejor resultado. También parece haber acuerdo general de que este d_{85B} debe ser calculado sobre la fracción de suelo base que pasa por el tamiz de 4.75 mm, ya que la fracción más gruesa no tiene influencia en este tipo de suelos.

Queda por tanto un campo abierto a nuevas investigaciones que traten de comprobar efectivamente si éste diámetro es el idóneo o hay otras variables relativas a la granulometría del suelo base que deben ser tenidas en cuenta.

2.4.3 Humedad – densidad

Respecto a la influencia de las condiciones de compactación del suelo base: humedad y densidad, tampoco parece haber un acuerdo general, si bien ya se ha comentado antes que en principio un suelo más denso tiene mayor resistencia a la erosión, el efecto de la humedad no es tan claro.

Sherard et al. (1984) han comprobado que los resultados del “Slot Test”, con el suelo base compactado y el “Slurry Test” en el que el suelo base se diluye en agua destilada son idénticos, por lo que se concluye que la humedad no tiene ninguna influencia en el resultado de los ensayos ya que en ambos casos las partículas erosionadas se rompen dando lugar a partículas elementales.

En el “Slurry Test” el suelo base se rompe por mezcla mecánica en agua dando lugar a un estado en el que la granulometría es la misma que si se midiera en un ensayo de sedimentación convencional sin empleo de dispersante.

En los ensayos con el “No Erosion Filter Test” , Sherard y Dunningan (1985), también se comprobó que la humedad y la densidad del suelo base no tiene una influencia significativa en los resultados, sin embargo, Bravo y Maeso (1985) han hecho ensayos en la Presa de Canales (España), con la base desleída en diferentes proporciones de agua, ensayos hechos también por Sherard aunque menos diluidos, y han visto que con cantidades de agua del orden de seis veces el límite líquido la base pasa íntegramente a través de todos los filtros de $D_{15F} \leq 0,6$ mm., mientras que con diluciones menores, el filtro puede acabar taponándose y se observa que la arcilla que tapona el filtro tiene un contenido de agua mucho menor que el de la "papilla" que se hizo filtrar. Parece que el taponamiento del filtro podría deberse en este caso a la sucesiva adherencia de las partículas de arcilla a los granos del filtro por atracción molecular.

En Portugal, Sêco y Santana (1989) han realizado ensayos del tipo NEF, Slot Test (Sherard) y Crack Erosion Test (Neves) en los cuales han variado la humedad de

compactación del suelo base. En el caso del material de Santa Clara han observado que los caudales de salida en el ensayo convencional son menores para humedades inferiores a la óptima en comparación con el lado húmedo, mientras que en el caso del ensayo con orificio, la cantidad de material erosionado es mayor para la humedad por el lado seco.

En los ensayos con el material de Marateca se obtienen mayores caudales en el ensayo convencional con humedades del lado seco mientras que en los ensayos del material de Alvito, los caudales son menores para compactaciones por el lado húmedo.

Por lo tanto la humedad de compactación tiene una influencia apreciable en los resultados de los ensayos, sin embargo su efecto no es repetitivo por lo que no permite obtener conclusiones claras.

En cuanto a la influencia de la compactación del suelo base, si se observa con carácter general que para los ensayos con un 90% de compactación el caudal y la cantidad de material erosionado es mayor que para compactaciones del 100% próctor.

También Khor y Woo (1989) se han preocupado por comprobar el efecto de la humedad para lo cual han ensayado suelos residuales tropicales de presas de Malasia, empleando en todos los ensayos NEF humedades de compactación iguales a la óptima próctor ya que esa fue la humedad empleada en la construcción de las presas respectivas. Sin embargo en algunos ensayos han comprobado el efecto de la saturación posterior de la muestra de suelo base mateniéndola sumergida durante 24 horas, observando que dicha saturación no tiene una influencia significativa en el resultado del ensayo.

Los autores argumentan que esto no es sorprendente ya que en el propio ensayo NEF, dado el enorme gradiente hidráulico, la saturación de la arcilla se produce durante la ejecución del ensayo.

Posteriormente, Leonards et al. (1991) ensayaron 9 muestras de suelo base de la presa de Conner Run comprobando que existe una relación entre la humedad óptima y la densidad máxima del ensayo Próctor normal. En todos los ensayos la muestra de suelo base se ha compactado con una humedad un 1 % por debajo de la óptima, pero han comprobado que para una compactación del 95 % de la densidad máxima, la muestra no se sifonaba para gradientes hidráulicos entre 40 y 80, mientras que para una densidad del 100 %, el gradiente ascendía hasta el intervalo 160-240. Concluyen por tanto que la compactación reduce significativamente el potencial de sifonamiento.

De nuevo en España, Kabasy (1993) ha estudiado el efecto de la humedad en la erosionabilidad de las arcillas. En una primera de serie de ensayos de dispersabilidad de arcillas, (“pinhole”), en los que se ha utilizado el material del núcleo de la presa de Zahara (Cádiz, España) variando la humedad de compactación, se ha observado que el caudal aumenta al aumentar la humedad de compactación, pero sin un cambio aparente en la clasificación final del suelo referente a su estado de dispersabilidad.

Posteriormente ha realizado ensayos de erosión con distintas muestras de bases arcillosas empleadas en núcleos de presas españolas, pero en vez de filtros granulares ha empleado geotextiles. En estos ensayos también se ha estudiado el influjo de la humedad obteniendo las siguientes conclusiones:

- En todos los ensayos y con todos los geotextiles, el suelo compactado con la humedad óptima Próctor es el que presenta un menor arrastre total de partículas finas, a igualdad del resto de las condiciones del ensayo
- El peso total filtrado es mayor con humedades por encima de la óptima que con humedades inferiores a ésta
- La concentración de partículas es mayor en el lado seco y disminuye en el lado húmedo

Por lo tanto parece claro que la humedad tiene una clara influencia aunque hay que tener en cuenta que el compactar con una humedad igual a la óptima no sólo supone fijar un cierto contenido de agua en el suelo, sino que se obtiene además la densidad máxima, por lo que es posible que se dificulte el arrastre de partículas.

Puesto que además de la erosionabilidad de la arcilla interesa su fisurabilidad, Indraratna et al. (1996) han comprobado que si la humedad del suelo base es inferior a la óptima del ensayo Próctor normal, se aumenta el riesgo de fisuración. En cambio, para humedades un 2 por ciento por encima de la óptima, se aumenta considerablemente la capacidad del suelo base para deformarse bajo tensión. Por lo tanto concluyen que compactar enérgicamente por el lado seco es muy desfavorable frente a la fisuración. Sin embargo, Fischer y Holtz (1996), basados en los resultados de Bertram (1940), y Newton y Hurley (1940), concluyen que la densidad de la base no tiene una influencia significativa siempre que se disponga de una mínima compactación. Por ello ignoran esta variable en su estudio.

Por otra parte, en los ensayos denominados del tipo “slurry test” (ensayo con papilla), Indraratna et al. (1996) han observado que la concentración de esta papilla influye considerablemente en el resultado. En los ensayos realizados con suelos residuales lateríticos han comprobado que es adecuado emplear una concentración de 25 g/l, ya que para concentraciones mayores la velocidad de sedimentación se ve afectada sensiblemente y por lo tanto el diámetro equivalente de las partículas queda subestimado.

De nuevo aparece cierta contradicción ya que, según Giroud (1996), la densidad del suelo base juega un importante papel en el funcionamiento del filtro puesto que en un suelo base suelto las partículas son más fáciles de desplazar que en un suelo denso. El peor caso es un suelo cohesivo en un estado suelto o poco compactado.

Zhu y Anderson (1996) han comprobado que en caso de suelos bien graduados del tamaño grava, la permeabilidad está muy influenciada por la humedad, de forma que

si el suelo se compacta con la humedad óptima del ensayo Próctor, la permeabilidad es dos veces menor que si se compacta del lado seco.

Por último, Locke e Indraratna (2000), después de una serie de ensayos de tipo “pinhole” en los que se ha modificado la humedad de compactación de las muestras de suelo base, han obtenido que la granulometría (después de dispersión por ultrasonidos) de las partículas erosionadas es prácticamente idéntica en todos los casos, sin embargo, la cantidad mínima de material erosionado se produce con humedades iguales a la óptima Próctor, lo cual concuerda con los resultados de Kabasy (1993).

De nuevo parece no haber un acuerdo general aunque la mayoría de los investigadores coinciden en que para humedades cercanas a la óptima del ensayo próctor, la erosionabilidad de la arcilla es menor.

Se debe huir de compactar por el lado seco, ya que aumenta la erosionabilidad, la fisurabilidad y la permeabilidad del suelo base, aunque tampoco es recomendable colocar la arcilla con una humedad muy superior a la óptima.

Estas conclusiones son interesantes ya que siempre es más económico compactar del lado seco, lo cual debe evitarse, y por otra parte se debe tener cuidado con la aparición de zonas húmedas en núcleos de presas de materiales sueltos.

2.4.4 Plasticidad

En cuanto a la relación entre la dispersabilidad de una arcilla y su plasticidad, Sherard et al (1972) concluyen en su primer estudio que no existe ninguna correlación útil, habiendo ensayado 80 suelos dispersivos y 115 no dispersivos de forma que queda cubierto el rango de las arcillas ordinarias (CL y CH).

A pesar de estos resultados, Sherard et al. (1976) son cautos al afirmar categóricamente que en el caso de dos arcillas dispersivas, una de alta plasticidad y otra de baja, el riesgo de sifonamiento va a ser igual, ya que el sifonamiento por

erosión en presas de materiales sueltos comienza generalmente con una fuga concentrada de movimiento lento a través de una grieta. Al paso del agua, el suelo base es erosionado pudiendo aumentar el tamaño de la grieta pero la arcilla de las paredes tiende a expandirse por lo que aparece una “lucha” entre el progreso de la erosión y la velocidad de expansión. Por otra parte, si el material de núcleo es más plástico, tendrá más facilidad para cerrar la fisura que si no lo es.

Si además se tiene en cuenta el contenido de sodio en el suelo, para aquellos suelos con un contenido medio de sodio e índice de plasticidad menor que 10 es más probable que se erosionen en el ensayo de pinhole que los que tienen un índice de plasticidad mayor.

Por otra parte, Resendiz (1977), concluye que la actividad de la arcilla definida como el cociente entre el índice de plasticidad y el porcentaje en peso seco del suelo menor de 2 micras:

$$actividad = \frac{Ip}{\%dearcilla < 2micras} \quad \text{Ecuación 19}$$

si se sitúa en el rango de 0.3 a 1.0, parece ser una condición necesaria para el sifonamiento espontáneo de suelos compactados, aunque no es condición suficiente. Si además la humedad de compactación del suelo está del lado seco de la óptima Próctor y el agua del embalse es pobre en sales disueltas o relativamente rica en potasio, sodio o litio, el riesgo de sifonamiento es muy alto.

Aunque el Bureau of Reclamations propone una relación entre la plasticidad del suelo base y su erosionabilidad, Arulanadan y Perry (1983) han comprobado que dicha clasificación no es válida ya que no tiene en cuenta factores muy importantes en la erosión como son la química del suelo y la composición del agua intersticial y del fluido erosivo.

Sin embargo, en un estudio realizado con 31 presas sobre la influencia de las propiedades del suelo y el método de construcción en la resistencia al sifonamiento,

(Ref. en Kabasy, 1993), se concluyó que las propiedades del suelo y particularmente la plasticidad de los finos, tienen mayor influencia en la resistencia al sifonamiento que el método de compactación deduciéndose las siguientes conclusiones generales:

- Tienen **mayor resistencia al sifonamiento** las arcillas de alta plasticidad ($I_p > 15\%$) bien compactadas o pobremente compactadas
- Tiene **resistencia intermedia al sifonamiento** un suelo bien graduado de arena gruesa o mezcla de arena y grava con arcilla de plasticidad media ($I_p < 6\%$), tanto si está bien o mal compactado y un suelo bien graduado de gravas no cohesivas o mezcla de arena y limo ($I_p < 6\%$) pobremente compactado
- Tiene **menor resistencia al sifonamiento** un suelo bien graduado de gravas no cohesivas, mezcla de arena y limo ($I_p < 6\%$) pobremente compactado y un suelo uniforme de arena fina no cohesiva ($I_p < 6\%$), bien o pobremente compactado

Al margen de la influencia de la plasticidad en la erosionabilidad de un suelo arcilloso, es también interesante relacionarla con otras variables del suelo base como por ejemplo la mineralogía. Holtz (1981) ha representado en el gráfico de Casagrande la posición de los distintos minerales principales de arcilla, de forma que según la posición en el gráfico de cada suelo base, se puede conocer aproximadamente el mineral de arcilla predominante.

En cuanto al efecto de la plasticidad del suelo base sobre los resultados de los ensayos con filtros granulares, de nuevo Sherard et al. (1984), tras ensayar casi 200 bases de diferente plasticidad concluyen que el ratio D_{15FL}/d_{85B} es completamente independiente de la plasticidad, por lo que los límites de Atterberg de una base arcillosa no tienen una influencia significativa en el diseño de un filtro crítico.

La misma conclusión han obtenido Khor y Woo (1989) ya que en el caso de bases de suelo residual tropical, el ratio D_{15FL}/d_{85B}^* no depende en ningún caso de la plasticidad del suelo ya que con gradientes hidráulicos mayores de 1000, la

velocidad a través de la fisura es en cualquier caso superior a 1.4 m/s, por lo que todos los suelos son erosionables.

Leonards et al. (1991) han comprobado que en el rango de muestras por ellos ensayadas en las que el índice de plasticidad varía entre 13 y 21, no se observaba una influencia significativa de la plasticidad en la resistencia del suelo base a la erosión interna.

En esta ocasión, parece haber un acuerdo general de que el diseño del filtro granular depende de la granulometría del suelo base pero no de su plasticidad, sin embargo queda también claro que la plasticidad sí afecta a la erosionabilidad.

Hay que tener en cuenta que la mayoría de los investigadores que indican la no influencia de la plasticidad en el diseño del filtro, han representado el ratio D_{15F}/d_{85B} en el gráfico de plasticidad, no observándose ninguna relación, sin embargo es posible que otro tipo de representación permita obtener conclusiones diferentes o ratificar la ya expuesta.

2.4.5 Dispersabilidad y/o erosionabilidad

Dada la peligrosidad del fenómeno de la erosión interna, Vaughan y Soares (1982) proponen diseñar un “filtro perfecto” que sería aquel capaz de retener hasta los flóculos más pequeños, sin tener en cuenta ni siquiera la posibilidad de que al llegar partículas de tamaño mayor se pueda desarrollar un fenómeno de autofiltración, de esta manera se sitúan en la más desfavorable de las situaciones.

Si bien los propios autores reconocen que a primera vista esta condición puede parecer extrema y no práctica para arcillas ya que el filtro correspondiente debería ser tan fino que podría llegar a ser cohesivo y por lo tanto tener peligro de fisuración; lo que el filtro debe retener no son las partículas elementales de arcilla sino sus flóculos, que se formarán dependiendo de las condiciones del flujo y la química y mineralogía de la arcilla .

Al situarse en las condiciones más desfavorables posibles, el criterio propuesto es esencialmente conservador y por lo tanto no requiere ningún coeficiente de seguridad ya que se considera que va a ocurrir erosión, sin tener en cuenta la resistencia de la arcilla, y se considera a su vez, que lo que llega al filtro son sólo los flóculos y no los agregados de partículas de arcilla que puede ser considerablemente más grandes.

Es interesante señalar que este criterio invalidaría aquellos basados en realizar ensayos en laboratorio con una muestra de arcilla a la que se le practica un orificio para simular una fisura, ya que en estos casos el agua arrastra partículas y no sólo flóculos por lo que el mecanismo de autofiltración puede conducir a considerar como válidos filtros más gruesos que los propuestos por Vaughan y Soares.

El criterio de Vaughan y Soares equivale prácticamente a considerar todas las arcillas como dispersivas, por lo que evidentemente, la mayor o menor dispersabilidad del suelo base no tendría ninguna influencia en el diseño del filtro.

Por otra parte, Arulanandan y Perry (1983) explican que la erosión superficial de un suelo se produce cuando el esfuerzo cortante inducido por el flujo de agua sobre la superficie del suelo base es suficientemente alto como para arrancar agregados y flóculos de dicho suelo.

La mejor forma de cuantificar la resistencia a la erosión de un suelo es calcular la *tensión cortante crítica* (τ_c), definida por Shields (1936) como el valor del esfuerzo cortante para una erosión cero, el cual se puede obtener por extrapolación en un gráfico caudal sólido erosionado-esfuerzo cortante, por ejemplo mediante el ensayo del “cilindro rotativo”. También es posible obtener el τ_c por correlación con la dispersión dieléctrica ($\Delta\epsilon_0$).

Es importante destacar que Arulanandan y Perry (1983) han comprobado que no hay una relación clara entre erosionabilidad y dispersabilidad ya que algunos suelos no dispersivos presentan un valor de τ_c tan bajo como otros suelos dispersivos y a la inversa.

A partir del estudio de diferentes suelos empleados en núcleos o cuerpos de presas obtienen la siguiente clasificación en función de la resistencia a la erosión:

- **suelos erosionables:** $\tau_c \leq 4 \text{ dynas/cm}^2$
- **suelos moderadamente erosionables:** $4 \text{ dynas/cm}^2 < \tau_c < 9 \text{ dynas/cm}^2$
- **suelos resistentes a la erosión:** $\tau_c \geq 9 \text{ dynas/cm}^2$

Respecto a la dispersabilidad del suelo base, Sherard et al. (1985) obtienen la misma conclusión que con la plasticidad: para arcillas dispersivas y no dispersivas con la misma granulometría, el filtro crítico necesario es el mismo.

Sin embargo, al hablar de “dispersabilidad”, no hay tampoco un ensayo único de cuantificación, por lo que es interesante estudiar las diferencias entre los distintos ensayos existentes. Por ello, Kabasy (1993) ha realizado una investigación sobre la dispersabilidad de seis muestras de material empleado en presas españolas con las cuales se han utilizado distintos ensayos para determinar la dispersabilidad obteniendo las siguientes conclusiones de interés:

- El ensayo de pinhole, el doble densímetro, el ensayo de grumo y el ensayo de dilución son los cuatro ensayos que dan resultados similares entre sí en general, pero especialmente cuando el suelo es o muy dispersivo o nada dispersivo. En los casos intermedios la coincidencia es menor por lo que se recomienda realizar varios de estos ensayos para definir la dispersabilidad con mayor precisión
- Hay una aceptable correlación entre el Pinhole y el índice de dispersabilidad del doble densímetro, con los siguientes intervalos:

I.D. < 33	ND1 y ND2	(no dispersivo)
33 < I.D. < 55	ND3 y ND4	(intermedio)
55 < I.D. < 65	D2	(dispersivo)

I.D. > 65

D1

(dispersivo)

- El índice de dispersabilidad deducido del ensayo de dilución, (D.T. = “dilution turbidity test”), es también adecuado para determinar la dispersabilidad. Éste índice aumenta con el contenido de sales.

Efectivamente, como se puede ver, hay que tener cuidado cuando se dice que una base es “dispersiva” o “muy dispersiva”, porque la clasificación puede depender mucho del ensayo empleado.

Ante la “categórica” afirmación de Sherard et al. (1984) de que para los gradientes tan altos que se emplean en los ensayos no hay diferencias entre arcillas dispersivas y no dispersivas, es muy importante destacar que Foster y Fell (1999) han empleado en sus ensayos algunas muestras dispersivas obteniendo un D_{15FL} menor que el esperado según el criterio de Sherard y Dunningan (1989). Foster y Fell (1999) señalan que Sherard argumenta que la dispersabilidad no tiene influencia en el resultado de los ensayos, pero sólo 2 de 28 muestras ensayadas eran dispersivas. Han comprobado que la dispersabilidad sí es una variable influyente y por tanto, para estas bases es recomendable realizar ensayos NEF específicos, ya que no basta con seguir los criterios de diseño generales, sin embargo no cuantifican la influencia de la dispersabilidad.

Por último, Locke e Indraratna (2000) no han estudiado específicamente la influencia de la dispersabilidad en los requerimientos del filtro granular para que éste sea efectivo, pero sí ofrecen una importante información sobre las variables que influyen en la dispersabilidad en sí del suelo base. Han verificado la teoría de Arulanadan et al (1975) de que la erosión es proporcional a la tensión cortante producida por el flujo menos la tensión crítica de arrastre.

Por otra parte, la erosionabilidad de un suelo cohesivo depende:

- cantidad y tipo de la fracción arcillosa

- composición química del fluido intersticial
- contenido de materia orgánica, yeso, etc.
- granulometría de la fracción no cohesiva
- puesta en obra, tixotropía e historial tensodeformacional
- composición química, temperatura y pH del fluido erosivo

2.4.6 Cohesión y ángulo de rozamiento

Todos los investigadores coinciden en la enorme diferencia entre bases cohesivas y no cohesivas a la hora de erosionarse y por tanto, para diseñar el filtro, sin embargo tampoco se cuantifica el valor de dicha “cohesividad” o cohesión.

Así por ejemplo, Vaughan y Soares (1982) resaltan la gran diferenciación entre suelos cohesivos y no cohesivos. En los primeros es posible que aparezca una fisura durante la construcción y que ésta permanezca abierta debido a las fuerzas capilares, pero en el momento en que se inicie el flujo, las fuerzas capilares desaparecen y la fisura colapsará con un pequeño arrastre de partículas pero quedando sellada; en cambio, en los suelos cohesivos esa fisura puede permanecer abierta durante la filtración con lo que el arrastre se puede prolongar y por tanto tener consecuencias más graves.

En este caso, el fenómeno es mucho más complejo e influyen factores como el tamaño y forma de la fisura, la velocidad del agua a través de ésta y la presión de filtración que puede incluso mantenerla abierta.

Por otra parte, en los apartados anteriores dedicados a las teorías sobre erosión y transporte de partículas se han expuesto algunas fórmulas que expresan la resistencia del suelo en función de su cohesión y ángulo de rozamiento, (Davidenkoff 1976, Zaslavki y Kassiff 1965, Wolski 1965 y Müllner 1992).

Sin embargo, no se ha podido conocer el trabajo de ningún investigador que haya cuantificado el efecto de la cohesión y el ángulo de rozamiento del suelo base a la hora de diseñar el filtro granular preciso.

2.4.7 Composición y mineralogía

La influencia de la mineralogía de la arcilla en su dispersabilidad no está aun completamente aclarada ya que no existe una correlación aceptable que permita determinar la dispersabilidad de un suelo conociendo únicamente su composición mineralógica, sin embargo algunos autores han obtenido conclusiones al respecto.

Bourdeaux et al. (1975) han observado que las tres muestras por ellos investigadas tienen esmectita, y las dos que son dispersivas contienen caolinita. Por otra parte, Cole et al. (1977) han detectado partículas de cuarzo y de caolinita en las arcillas dispersivas por ellos analizadas, mientras que Satton et al. (1977) han descubierto que sus arcillas dispersivas tienen montmorillonita como mineral predominante con algo de illita y una pequeña cantidad de caolinita, siendo el cuarzo y los feldespatos componentes minoritarios.

En 1972, Sherard et al. concluyeron que no es posible apreciar una diferencia significativa entre la mineralogía de las arcillas dispersivas y no dispersivas, sin embargo, Mc Donald et al. (1981) han comprobado que en todas las arcillas dispersivas existe illita y montmorillonita e Indraratna (1991) ha comprobado que en ausencia de montmorillonita la dispersión no se produce hasta la existencia de un alto contenido de sodio en el agua intersticial, por lo que la dispersabilidad parece ser un resultado de la adherencia del sodio a la montmorillonita, más que a la presencia de sodio en el agua de los poros.

Más recientemente, en 1993, Kabasy ha comprobado que las arcillas empleadas en sus ensayos que tienen carácter dispersivo contienen esmectita como mineral principal, mientras que Locke e Indraratna (2000), hacen mención a que la mineralogía del suelo base y su composición química tienen influencia en la forma

de floculación de sus partículas en agregados de mayor tamaño, sin embargo sólo especifican la influencia del ion sodio (Na^{++}) del agua.

La presencia de sodio es muy influyente en la dispersabilidad de una arcilla, de forma que Sherard et al (1972) han comprobado que cuando el contenido de sales totales en el extracto de saturación es alto, la arcilla es más resistente a la erosión. Arcillas con un contenido de sal total de 1.0 meq/l en el extracto de saturación pueden ser dispersivas con un 50% de sodio, mientras que se necesita de un 75 a un 80% de sodio para que sean altamente dispersivas arcillas con 20 o 30 meq/l de sales disueltas.

Respecto a la influencia de la mineralogía en el diseño del filtro, pocos son los autores que la mencionan de forma expresa, así por ejemplo, Vaughan y Soares (1982) al proponer el diseño de un “filtro perfecto” que sea capaz de retener los flóculos del suelo base, señalan que hay que tener en cuenta la mineralogía del suelo base para poder determinar no sólo la curva granulométrica convencional, sino el tamaño de los flóculos.

También Schuler y Brauns (1992) comenta que la mineralogía es una de las variables del suelo base que influyen en el diseño de los filtros, pero no cuantifica su efecto.

Aparece aquí una cierta laguna del conocimiento que puede permitir realizar nuevas aportaciones mediante la experimentación en laboratorio estudiando expresamente el influjo de la mineralogía.

2.4.8 Empleo de aditivos

El empleo de aditivos químicos para modificar la dispersabilidad de un suelo arcilloso es interesante puesto que permite conocer con más profundidad los mecanismos que actúan en la dispersión, pero además puede tener una aplicación práctica en el caso de que sea imprescindible reducir la dispersabilidad del material que se va a emplear en la construcción de una presa de materiales sueltos.

Bourdeaux e Imaizume (1977) ha comprobado que la adición de un 6% de **sulfato de aluminio** - $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – es capaz de transformar una arcilla altamente dispersiva en no dispersiva, aunque posteriormente han comprobado que se puede obtener un efecto similar con cantidades de 0.55 a 0.90 % respecto al peso seco del suelo.

Este aditivo se ha empleado en la mejora la arcilla dispersiva existentes en una sección de en un canal cerca de Lawton. El sulfato de aluminio tiene la ventaja de ser soluble en agua lo que facilita su puesta en obra que en el caso de la cal viva es muy complicada y peligrosa. Sin embargo tiene las desventajas de que el costo de material es hasta cinco veces superior que la cal, que sólo afecta al intercambio de cationes y que al ser muy ácido (pH de 3.4), puede ser necesario aplicar otro producto neutralizador.

En cuanto al efecto de aditivos químicos sobre la dispersabilidad de las arcillas, Kabasy (1993) ha estudiado el efecto del sulfato cálcico, magnésico y potásico, el cloruro sódico y la cal viva, obteniendo las siguientes conclusiones:

- la adición entre un 2% y un 8% de **cloruro sódico** al material no dispersivo de la presa de Canales y Calanda, no dio lugar a un cambio significativo en su dispersabilidad. Por lo que para que el sodio tenga efecto en la dispersabilidad hay que tener en cuenta otras variables además de la cantidad de este catión
- la adición de **sulfato cálcico** reduce la dispersabilidad, por ejemplo, la arcilla de la presa de Zahara, pasa de ser dispersiva en estado natural a ser no dispersiva al añadirle un 1.2% de sulfato cálcico
- el **calcio** es más eficaz como estabilizador que el **magnesio** y éste más eficaz que el **potasio**
- la adición de **cal viva** también reduce la dispersabilidad, de forma que con un 3% de cal viva para la arcilla de Zahara y un 1% para la de Rules, ambas pierden su carácter dispersivo

Estas conclusiones son muy interesantes, ya que confirman que el empleo de aditivos puede reducir sensiblemente la dispersabilidad de un suelo base, sin embargo es preciso comprobar si además permiten dimensionar filtros menos estrictos

Aparte de una posible aplicación práctica, supondría un mejor conocimiento del proceso de interacción base-filtro puesto que resolvería el siguiente interrogante: si los aditivos modifican la dispersabilidad e incluso la plasticidad de un suelo sin alterar significativamente su granulometría y si el filtro granular preciso es igual que el obtenido para la base original, quedaría demostrado que la plasticidad y la dispersabilidad no tienen ninguna influencia en el diseño del filtro, pero en caso contrario, cuestionaría muchas de las conclusiones expuestas en los apartados anteriores.

2.5 Influencia del filtro

2.5.1 Granulometría

2.5.1.1 Introducción

La distribución de los tamaños de las partículas del filtro tiene una influencia fundamental tanto en determinadas propiedades del filtro, como en su comportamiento frente a la erosión interna de la base.

Puesto que todas estas propiedades están complejamente interrelacionadas, a continuación se van a estudiar de forma separada para más claridad, distinguiendo:

- Relación entre la granulometría y la distribución de poros y constricciones
- Relación entre la granulometría y la autoestabilidad del filtro

- Relación entre la granulometría del filtro y las propiedades del suelo base al que protege

2.5.1.2 Distribución de poros y constricciones

En el apartado dedicado “modelización numérica” se ha realizado un repaso de las distintas teorías que tratan de determinar la distribución de poros y constricciones en el interior de un filtro granular a partir de los datos de la curva granulométrica y consideraciones probabilísticas.

Por lo tanto, en el presente apartado sólo se va a realizar un rápido repaso de estas teorías insistiendo fundamentalmente en la determinación del tamaño de partícula de suelo base que es capaz de atravesar un filtro de granulometría conocida.

La curva granulometría de un filtro granular (Giroud 1996), sólo ofrece información acerca del tamaño y distribución de las partículas, sin embargo se puede obtener a partir de ella, mediante algunos cálculos sencillos aunque tediosos, información tan importante como el tamaño y la distribución de los poros existentes entre las partículas del filtro, que al fin y al cabo son por donde las partículas del suelo base van a poder filtrar o ser retenidas.

Dada la complejidad de las partículas naturales, es interesante comenzar con la simplificación de considerar partículas esféricas de igual diámetro. En este caso, la distribución de poros va a depender de la disposición de las partículas, que puede variar desde el estado menos denso que corresponde a una disposición cúbica hasta el estado más compacto que tiene lugar cuando las partículas se disponen piramidalmente, (también denominada disposición tetraédrica).

En ambos casos es posible calcular matemáticamente la porosidad, que tiene un valor de 0.2595 para el estado menos denso y 0.4764 en el más compacto.

Este modelo de esferas idénticas permite aclarar la diferencia entre dos conceptos muy utilizados y a veces confundidos: el *tamaño de la apertura de filtración* y el *tamaño de poro*¹⁰.

El primero, generalmente nombrado como O_F es el tamaño de la mayor partícula (esférica) que puede atravesar el filtro granular sin alterar la disposición de sus partículas. Para ello se considera únicamente la limitación geométrica y por tanto no se tienen en cuenta ni atracciones electrostáticas ni ninguna otra fuerza. En cuanto al tamaño de poro, se define como el tamaño de la mayor partícula (esférica), que puede ser contenida en el interior del filtro. Está claro que esta partícula no se puede mover a través de los poros del filtro, por lo que el tamaño de la apertura de filtración es menor que el tamaño de poro. Por otra parte, lo que condiciona al tamaño de apertura de filtración no es el tamaño de los poros, sino de el de las constricciones existentes entre ellos.

Es necesario señalar que hay cierto desacuerdo entre distintos autores a la hora de calcular el valor de O_F , por ejemplo, Horsfield (1934) ha calculado para el caso de esferas idénticas, $O_F = 0.155d$, (d , diámetro de la esfera), mientras que el tamaño de poro es de $0.414d$. Por otro lado, Kenney et al. (1985) suponen que $O_F = 0.33d$.

Giroud (1996) opina que Kenney no justifica su resultado por lo que es más correcto el cálculo de Horsfield.

A continuación es posible calcular la relación entre O_F y d en función de la porosidad, n , interpolando entre los estados más y menos denso.

$$O_F / d = 0.45n / (1-n) \quad \text{Ecuación 20}$$

En el caso habitual del filtros granulares con porosidades entre 0.3 y 1/3 se puede obtener la siguiente expresión aproximada:

$$O_F = 0.2 d = d / 5 \quad \text{Ecuación 21}$$

¹⁰ Traducción literal de “*filtration opening size*” y “*pore size*”, respectivamente

Smith et al (1929) han realizado ensayos con esferas idénticas pero organizadas de forma aleatoria para calcular los distintos valores de porosidad, observando que en ningún caso se obtienen porosidades inferiores a 0.36. Posteriormente, Horsfield (1934) ha empleado esferas de distintos tamaños pero partiendo de una disposición tetraédrica de esferas idénticas que denomina “*primarias*” y luego estudian la distribución de esferas de igual tamaño que caben en los poros dejados por las esferas primarias, denominadas “*esferas secundarias*” y así sucesivamente hasta las esferas de quinto orden.

En el caso de filtros granulares reales el cálculo es mucho más complejo y el tamaño de las constricciones depende no sólo del de las partículas y su densidad, sino también del espesor del filtro. Kenney et al. (1985) explica esta cuestión de la siguiente manera:

“El espacio de poros en un medio granular es una red continua de poros interconectados... un poro es el espacio volumétrico formado entre cuatro o más granos y una constricción es una apertura que conecta dos poros...”

Kenney define “*el tamaño de constricción*” como el diámetro de la mayor esfera que puede pasar a través de las constricciones, por lo tanto, el tamaño máximo de la esfera queda controlado por la menor constricción que ésta encuentre a lo largo de su camino, a esa constricción se le denomina “*constricción de control*”, Kenney et al. (1985)

La menor constricción posible es:

$$O_{F_{\min}} = 0.155 D_{0F} \qquad \text{Ecuación 22}$$

Donde D_{0F} es el diámetro del tamiz que deja pasar el 0% del material de filtro, es decir, el tamaño mínimo de las partículas de filtro.

Los estudios realizados sobre esta cuestión por Silveira (1965), Wittman (1982) y Witt (1992) han sido resumidos por Giroud (1996) de la siguiente manera:

- la curva granulométrica de un filtro se expresa generalmente en porcentaje en peso del material que es inferior a una determinada apertura de tamiz, representado en papel semilogartímico
- aunque es preciso un cálculo tedioso, es posible pasar de una distribución en peso a una distribución por número de partículas, así por ejemplo, para curvas granulométricas con un coeficiente de uniformidad mayor de 3, el tamaño medio de la distribución por número es menor que el D_{10} de la distribución por peso. (Witt, 1992)
- a partir de la curva granulométrica por número se puede obtener la distribución de los tamaños de constricción, (también por número), siguiendo los cálculos de Kenney et al. (1985) o los métodos de Wittman (1982) ó Witt (1992)
- en el caso de un filtro granular muy delgado en el que cada partícula encontrara una sola constricción a su paso, la mayor de ellas es la constricción de control
- en el caso de un filtro de mayor espesor, en el que fueran posibles diferentes caminos de filtración, cada uno de ellos tiene su propia constricción mínima, denominada constricción de control, por lo que se puede obtener una distribución de los tamaños de las constricciones de control
- es posible determinar el valor de O_F a partir de los datos de la curva granulométrica

Giroud (1996) obtiene las siguientes conclusiones sobre el tamaño de la apertura de filtración (O_F) para un filtro granular:

1. está gobernado por el tamaño de las menores partículas ($D_{0F} < D < D_{10F}$), siendo habitual emplear el D_{5F}

2. depende de la longitud de filtración, que es proporcional al número de constricciones que una partícula debe atravesar
3. es igual o mayor que $0.155D_{0F}$

Además propone la siguiente tabla resumen:

Longitud de filtración	Coef. Uniform. $Cu \geq 2$	Coef. Uniform. $Cu = 1$
$L_F \geq 200 D_{5F}$	$O_F = 0.25 D_{5F}$	$O_F = 0.155 D_{5F}$
$L_F = 100 D_{5F}$	$O_F = 0.30 D_{5F}$	$O_F = 0.155 D_{5F}$
$L_F = 50 D_{5F}$	$0.30 D_{5F} \leq O_F \leq 0.25 D_{5F}$	$O_F = 0.155 D_{5F}$

Tabla 1 .- Tamaño de apertura de filtración según Giroud (1996)

En el caso de que se quiera emplear el D_{15F} , Kenney et al. (1985) propone la siguiente expresión:

$$O_F \leq 0.20 D_{15F} \qquad \text{Ecuación 23}$$

Así por ejemplo, un filtro granular con un D_{15F} de 0.4 mm, que es bastante habitual en presas de materiales sueltos con núcleo de arcilla, tiene un tamaño de apertura de filtración de 0.05 mm, luego partículas de arcilla mayores de 0.05 mm no podrían atravesar al filtro.

2.5.1.3 Autoestabilidad del filtro granular

Está claro que un filtro granular ha de ser capaz de retener a las partículas del suelo base, al menos las de un cierto tamaño, para evitar el progreso de la erosión interna, pero el propio filtro está también sometido a fuerzas hidrodinámicas que pueden arrastrar sus partículas más finas de forma que se escapen por los poros dejados entre las más gruesas.

Si esto se produce, el filtro va perdiendo su estructura interna, de forma que por un lado, puede sufrir colapso y por otro lado, puede ver aumentado el tamaño de sus poros y por lo tanto perder su funcionalidad como protector del suelo base.

Para evitar esto se exige que el filtro sea “autoestable”, que consiste en que las partículas de cualquier componente de un sistema filtrante no deben poder migrar dentro del mismo componente. Es decir el mismo filtro debe cumplir una condición de arrastre respecto de sí mismo.

Esto no es más que un caso particular de la condición general, pero ha dado lugar a incidentes graves, incluso recientemente.

Las primeras referencias sobre el proyecto de filtros solo hacían alusión a este problema de una forma cualitativa y llamaron la atención sobre las dificultades que podían presentar los materiales de granulometría no uniforme o discontinua en los que era muy grande la relación entre los tamaños más grueso y más fino.

En 1958 *Blight*, pensando en aplicar los criterios básicos de permeabilidad al propio filtro, propuso ya que este debía cumplir la condición de que

$$D_{85}/D_{15} < 5 \qquad \text{Ecuación 24}$$

esta misma condición es la que sigue recomendando en 1983 la *Chamber of Mines of South Africa*.

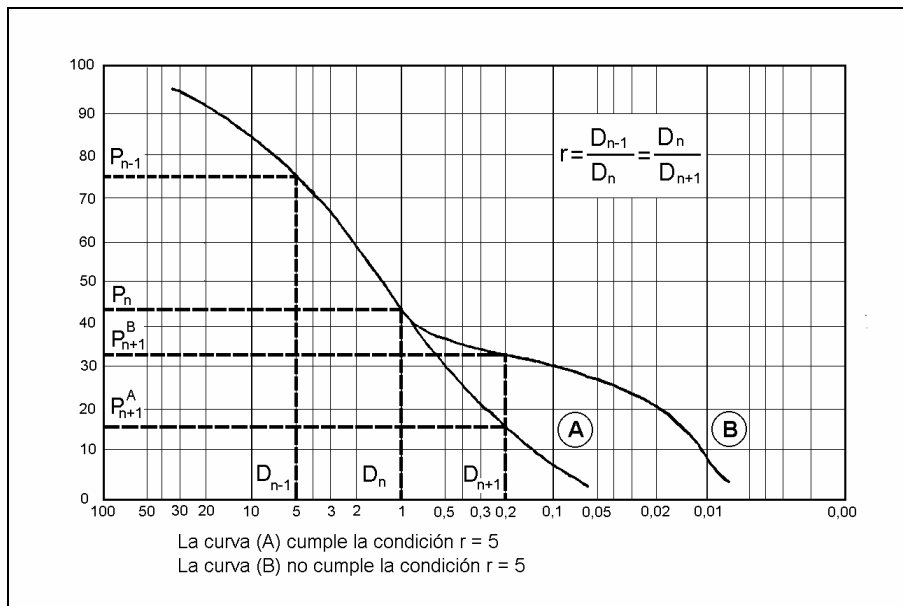


Figura 10 .- Condición de autoestabilidad de Lubochkov (1968)

En 1968 *Lubochkov* propuso que la curva granulométrica había de cumplir, con la nomenclatura indicada en la Fig.2.5.1.I, para cualquier D_n que se eligiera, la siguiente relación para poder asegurar que el material era autoestable:

$$C_{sh} = \frac{P_n - P_{n-1}}{P_{n+1} - P_n} < 4 \quad \text{Ecuación 25}$$

para un coeficiente de seguridad comprendido entre 1 y 1,3 si el valor $r=10$; o para un coeficiente de seguridad comprendido entre 1,5 y 2 si, siendo el valor r igual a 5, se cumplía que $C_{sh} < 2,5$.

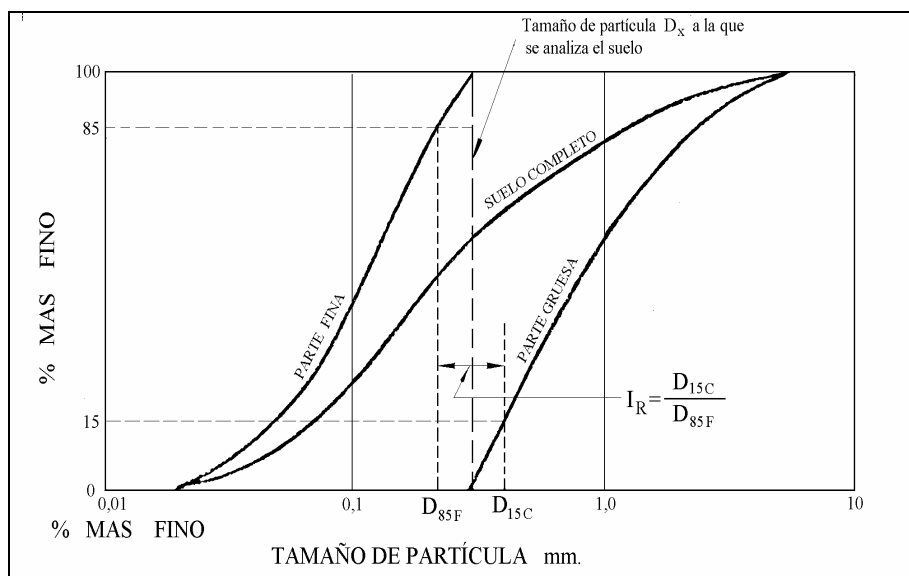


Figura 11 .- Estabilidad Interna según De Mello (1975)

En su informe a la *6th Regional Conference for Africa* de la ISSMFE, en 1975, *De Mello* propuso una comprobación sencilla basada en dividir la curva granulométrica del suelo en dos partes arbitrarias y comprobar que la gruesa cumplía las condiciones de filtro, respecto de la fina, como se indica en la Fig.2.5.1.II.

Aunque *De Mello* pensó en su aplicación a suelos de granulometría discontinua, *Sherard* (1979) amplió este criterio a cualquier suelo ampliamente graduado. Más tarde, en 1981 propuso un criterio basado en la "relación de inestabilidad" *IR* que definió como D_{15C}/D_{85F} , proponiendo que fuera menor que 5 al dividir la curva granulométrica en dos fracciones cualesquiera. También propuso que la curva se dividiera en intervalos del 5% y que se cumpliera esta relación entre cada dos intervalos.

En la Fig.2.5.1.III se puede ver cómo se hace prácticamente la aplicación de *Sherard*:

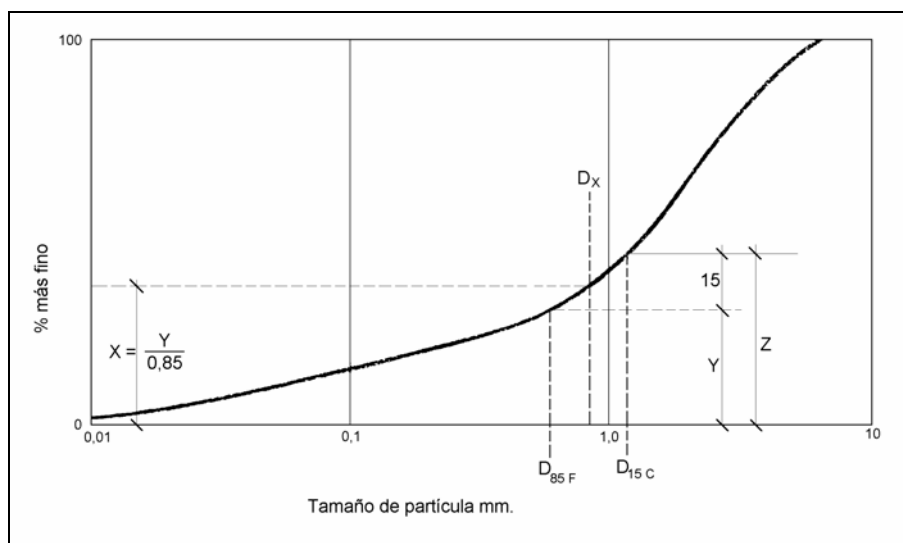


Figura 12 .- Comprobación de la Estabilidad Interna según Sherard

En el ejemplo ilustrado el suelo es internamente inestable, porque IR es mayor que 5, en las partículas menores de 0,20 mm. que suponen el 20% del suelo.

Los trabajos de *Sherard* sugieren que el mero coeficiente de uniformidad no es una buena medida de la autoestabilidad. Es preferible usar el coeficiente IR .

También concluyó que:

- a).- Para las mezclas de grava y arena usadas como filtros y drenes, cuanto más amplia sea la graduación (menos uniforme) y mayor sea el coeficiente de uniformidad, más probable es que el material sea internamente inestable.
- b).- Los materiales bien graduados, con curvas granulométricas uniformes, sin cambios bruscos de dirección ni tramos apreciables de pendiente sensiblemente menor que la media, son generalmente estables, aún con coeficientes de uniformidad del orden de 75 o incluso mayor.
- c).- Los materiales con coeficiente de uniformidad comprendido entre 10 y 20, sólo si tienen cambios muy bruscos de dirección en sus curvas granulométricas, en la zona de la arena, pueden ser inestables.

d).- Por bajo del coeficiente de uniformidad 10, la inestabilidad interna es muy improbable.

Santiago Uriel tradujo la condición de *Sherard*, a la siguiente:

$$P_{n+1} - P_n > 15\% \text{ para } D_{n+1} = 5D_n \quad \text{Ecuación 26}$$

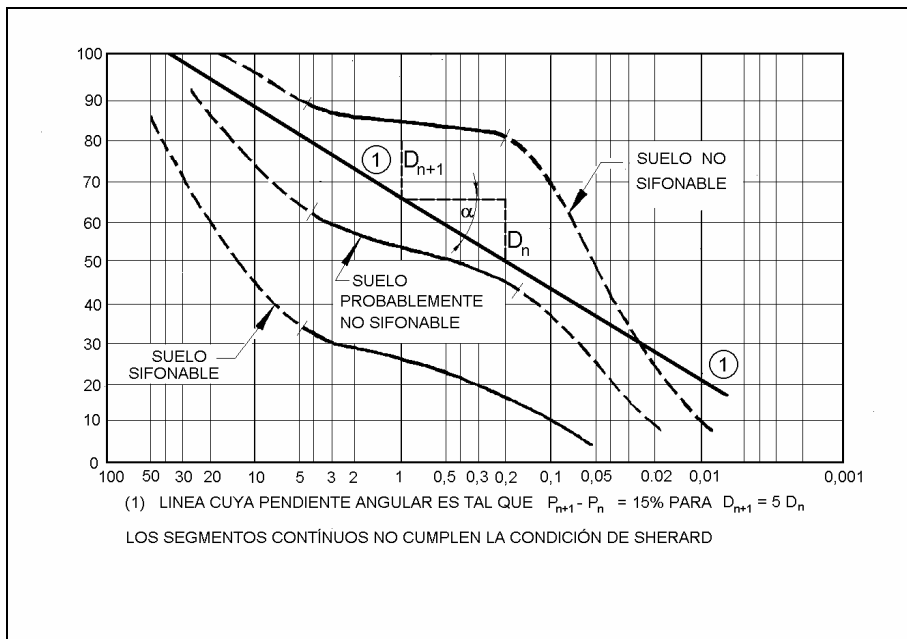


Figura 13 .- Equivalencia de la condición de Sherard (Uriel 1979)

es decir, que en un diagrama semilogarítmico la pendiente de la curva granulométrica debe ser mayor que la indicada en la Fig.2.5.1-IV. Si la pendiente de la curva es más pequeña, lo que indicaría que las partículas finas pueden ser arrastradas a través de los poros de las grandes, se requeriría, no obstante, para que se produjera la inestabilidad, que éstas fueran lo bastante abundantes para formar un esqueleto individualizado. Para ello se precisa de P_{n+1} sea menor del 30 o 40%. En caso contrario, la fracción gruesa quedaría flotando en una matriz de grano fino y el filtro estaría realmente constituido por esta fracción fina.

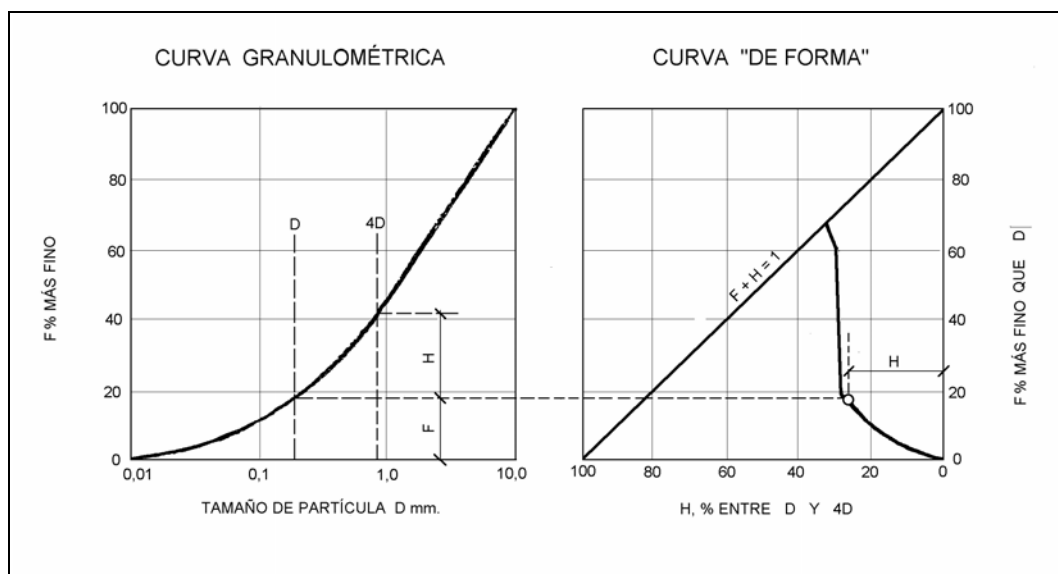


Figura 14 .- Método de obtención de la “Curva de Forma” (Kenney y Lau 1985)

Kenney y Lau (1985) analizaron la estabilidad interna de los filtros granulares, investigando la relación entre el número de partículas que pueden ser arrastradas de un filtro y el número de partículas que forman constricciones suficientemente pequeñas para impedir el paso de estas partículas. Expresaron esta relación como una "curva de forma" (*shape curve*), que depende solamente de la forma geométrica de la curva granulométrica.

En la Fig.2.5.1-V se ilustra el método de deducir la curva de forma. En cualquier punto de la curva granulométrica, el porcentaje de partículas menores que el diámetro D será F ; el porcentaje de partículas que pueden impedir el paso de la fracción anterior será el comprendido entre D y $4D$, ya que los tamaños superiores forman constricciones superiores a D . En el diagrama de la derecha se dibuja H en función de F . El punto que representa el extremo más grueso estará en la línea $F+H=1$. Los valores grandes de H corresponden a trozos muy pendientes de la curva granulométrica y los valores menores a las zonas más llanas de la curva: si H es constante nos encontramos en trozos rectilíneos de la curva granulométrica.

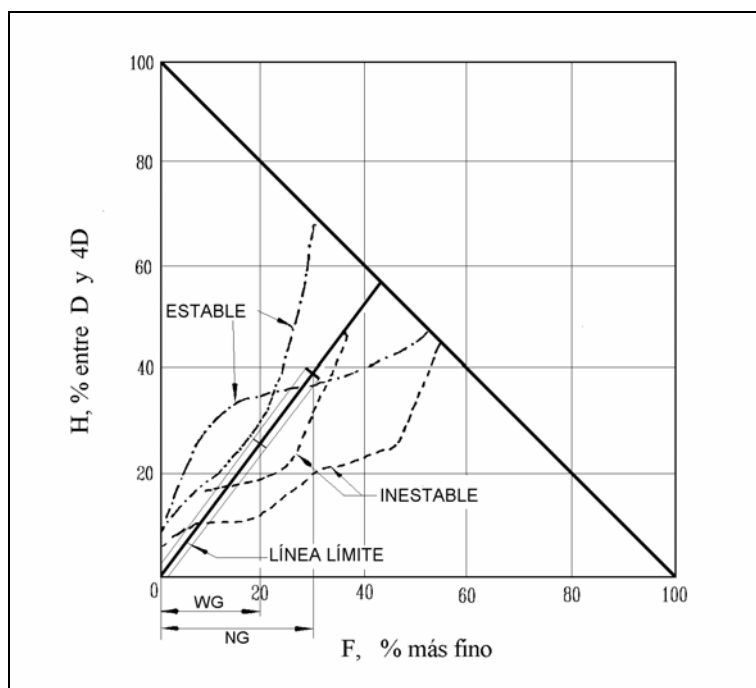


Figura 15 .- Límite entre suelos estables e inestables (Kenney y Lau 1985)

En la Fig.2.5.1-VI los ejes se han girado 90° en relación con la anterior. La banda sombreada se supone el límite entre los suelos estables y los inestables y da los menores valores de H que son necesarios para asegurar la estabilidad. A los suelos inestables les falta proporción suficiente de algunos tamaños, como demuestran las curvas de forma situadas bajo la banda. Solo la porción de curva que se refiere a partículas sueltas tiene importancia en la inestabilidad, así que el campo de aplicabilidad de la banda límite, varía según el tipo de suelo al que se quiere aplicar este criterio.

- *WG*.- Suelos ampliamente graduados con $C_u > 3$

De 0 a 20%

- *NG*.- Suelos más uniformes con $C_u < 3$

De 0 a 30%

El método más seguro para determinar si un material granular es internamente inestable es realizar con él un ensayo de filtración; pero estos ensayos son delicados y no deben recomendarse más que en casos poco claros o muy importantes. Para que puedan obtenerse resultados significativos son necesarios procedimientos de ensayos muy cuidadosos, como el descrito por *Kenney y Lau* (1985).

El límite definido por *Kenney* en la Fig.2.5.1-VI supone que los suelos son estables cuando $H > 1,3 F$. En las conclusiones de su artículo de 1989, él mismo considera que las condiciones del ensayo eran conservadoras y excesivamente severas, por lo que propone que basta cumplir

$$H \geq F \quad \text{Ecuación 27}$$

2.5.1.4 *Relaciones entre granulometría del filtro y del suelo base*

Indudablemente, la variable del filtro y del suelo base más influyente es la granulometría, aunque ya se ha visto en apartados anteriores que no existe un total acuerdo sobre el diámetro de comparación del suelo base. Sin embargo, respecto al filtro, sí parece existir un acuerdo general de que el D_{15F} caracteriza el tamaño de los poros y por lo tanto es el mejor diámetro para caracterizar el comportamiento del filtro.

En cualquier caso, es posible que además del D_{15F} se deba tener en cuenta el coeficiente de uniformidad, la forma de la curva granulométrica, el tamaño máximo, la fracción fina, etc.

Vaughan y Soares (1982), tras la negativa experiencia de la presa de Balderhead, a la hora de diseñar los filtros de la presa de Cow Green, decidieron emplear el concepto de “filtro perfecto” para lo cual realizaron una serie de ensayos en los que se tuvo en cuenta la granulometría de la arcilla con y sin dispersante y además empleaban el agua del propio río para representar los mismos fenómenos de floculación.

Se ensayaron distintos filtros y se observó que un filtro que inicialmente había funcionado, si lo lavamos para quitarle la fracción fina, puede fallar; lo cual nos da una idea de la importancia que tiene esta fracción. Esta aportación es muy interesante ya que la mayoría de los criterios que se basan sólo en la granulometría del filtro representada generalmente por el D_{15F} , no tienen en cuenta este hecho de vital importancia.

En la presa de Empingham lavaron los filtros para quitarles la fracción fina y después le añadieron distintas cantidades de limo para conseguir la permeabilidad adecuada.

Sin embargo, Sherard et al. (1984) han comprobado en sus primeros ensayos que el D_{15F} representa perfectamente el comportamiento del filtro a la hora de proteger a un

suelo base frente a la erosión interna, de forma que en los ensayos se puede obtener el D_{15FL} con un error menor del 10%, (hay que señalar que emplean filtros lavados).

Tras realizar numerosos ensayos con el “Slurry Test”, “Slot Test” y “No Erosion Filter Test”, confirman que el D_{15F} es el diámetro que mejor representa el comportamiento del filtro, si bien en el “No Erosion Filter Test” el D_{15FL} es sólo del 20 al 40% del obtenido con los otros ensayos. Sin embargo, Sherard et al. (1989) concluyen que el NEF (“No Erosion Filter Test” es el mejor ensayo de filtros puesto que es válido tanto para bases finas como gruesas.

Khor y Woo (1989) están de acuerdo con Sherard ya que mediante la realización de ensayos del tipo NEF de Sherard han comprobado que efectivamente el D_{15F} es el diámetro que mejor representa el comportamiento del filtro, sin embargo señalan que también tiene mucha influencia la fracción del filtro inferior al D_{15F} y la forma de la curva granulométrica.

En una dirección similar se pronuncia Brauns (1991), que en su repaso a los distintos criterios de diseño de filtros granulares señala que el mejor diámetro de comparación del filtro granular es el D_{15F} , de lo que parece no haber discusión, sin embargo señala la influencia también del coeficiente de uniformidad del filtro, Cu_{Filtro} , sobre todo si se emplea el D_{50F} . Como no podía ser de otra manera, Brauns (1991) insiste en la necesidad de que el filtro, (y también el suelo base), sea autoestable y que además no sufra ningún proceso de segregación.

Parece claro que todos los investigadores coinciden en que la granulometría del filtro es la variable más importante de las que definen su comportamiento, pero también es por todos conocido que bajo determinadas circunstancias, la distribución granulométrica de un filtro granular se puede ver peligrosamente afectada por la segregación de sus partículas con lo cual el filtro deja de ser homogéneo y se “separa” en distintas capas o fracciones que seguramente no cumplan con los condicionantes impuestos previamente para asegurar su eficacia.

El tema de la segregación ha sido ampliamente estudiado por Kenney y Westland (1992) mediante la realización de un ensayo que básicamente consiste en introducir en un cilindro la muestra de filtro y someterla a rotación para estudiar posteriormente la segregación sufrida. Las conclusiones más interesantes obtenidas de este estudio son:

- todos los materiales compuestos de arena y/o grava en un estado seco, segregan rápidamente
- la segregación es un proceso que se puede reproducir en los ensayos de forma repetitiva lo que supone que la segregación es un proceso regular más que aleatorio
- los resultados de los experimentos pueden ser normalizados
- el agua tiene un efecto beneficioso para impedir o reducir la segregación en suelos con más de un 30% de arena

Por último, Kenney y Westland (1992) llaman la atención sobre el hecho de que la mayoría de los investigadores o diseñadores de filtros granulares prestan atención al D_{15F} o diámetro inferior y al coeficiente de uniformidad, sin embargo ambos factores no tienen en cuenta tamaños superiores al D_{60F} que son aquellos donde la segregación es más probable, por ello hay que especificar también el tamaño máximo del filtro y colocarlo en obra cuidadosamente y con cierta humedad.

Indraratna et al. (1996) han empleado en sus ensayos siempre granulometrías lineales, variando el D_{15F} , el D_{100F} y el Cu. En general se verifica que efectivamente la granulometría influye decisivamente en el resultado de los ensayos, pero no sólo definida por el D_{15F} , sino que las demás variables son también influyentes. Por eso prefieren adoptar como variable de comparación la permeabilidad del filtro, que ya incluye el efecto de estas variables.

En cuanto a Fischer y Holtz (1996), ya se ha comentado anteriormente que no han desarrollado un programa propio de experimentación sino que han estudiado estadísticamente los resultados de otros. Confirman la adopción del D_{15F} como diámetro de comparación del filtro granular, descartando cualquier otro, como el a veces empleado D_{50F} .

En cuanto a la forma de las partículas, concluyen que de acuerdo con los estudios previos de Bertram (1940), USBR (1947) y Sherard et al. (1989), ésta no tiene una influencia significativa en los resultados.

También Vaid y Tomlinson (1996) confirman la validez del D_{15F} en sus ensayos en los que emplean como material de filtro partículas esféricas de tamaño uniforme, 2 mm o 3 mm, compactadas por vibración, si bien no especifican el grado de compactación. A pesar de ser un filtro totalmente uniforme, definen su comportamiento con el D_{15F} , aunque su valor es igual cualquiera que sea el diámetro de comparación elegido.

Más completo es el estudio de Fujisawa et al. (1997), quienes han empleado en sus ensayos tanto filtros granulares uniformes como graduados. En el caso de los filtros uniformes se obtiene muy buena representación del comportamiento de éstos con el D_{15F} , mientras que en el caso de los filtros graduados, se observa que su efectividad está fuertemente afectada no sólo por el D_{15F} sino también por otros diámetros característicos como por ejemplo el D_{100F} y otros diámetros inferiores al D_{15F} , mientras que Foster y Fell (1999) para definir el comportamiento del filtro emplean exclusivamente el D_{15F} , sin especificar ningún otro diámetro, ni hacer mención a la permeabilidad al igual que hacen Locke e Indraratna (2000).

2.5.2 Densidad – porosidad

Aunque está claro que la compactación del filtro y en particular, su porosidad, tiene una influencia clara en el tamaño de los poros y por tanto en su comportamiento

frente a la erosión interna de bases cohesivas, es destacable que muy pocos investigadores han incluido estas variables en sus estudios.

Así por ejemplo Lafleur et al (1989) han comprobado que el tamaño de apertura de cada filtro está íntimamente relacionado con su índice de densidad relativa, pero tampoco proponen esta variable como variable de diseño.

Donde sí se considera la influencia de la porosidad y la densidad es en el cálculo de la permeabilidad del filtro, como se puede ver en el siguiente apartado.

2.5.3 Permeabilidad

La permeabilidad del filtro granular tiene una doble influencia: por un lado ha de ser lo suficientemente alta como para que permita el flujo de agua sin que se produzca un aumento excesivo de presiones intersticiales y no de lugar a una excesiva disminución del caudal; pero por otro lado, si la permeabilidad representa de alguna manera la facilidad del paso del agua a través del filtro, es posible imaginar que también ésta tenga influencia en la posibilidad del paso de partículas del suelo base.

Por ello algunos investigadores sólo emplean la permeabilidad del filtro mediante el empleo del criterio de permeabilidad antes mencionado, pero otros como Vaughan y Soares (1982), emplean directamente la permeabilidad del filtro para evaluar el criterio de permeabilidad y el de retención.

Precisamente, Vaughan y Soares estudiaron el fracaso de las Presa de Balderhead que sufrió erosión interna en 1967. Observaron que se había producido segregación y el filtro había sido incapaz de retener las partículas que llegaban hasta él.

La fisuras que se desarrollan en un núcleo de arcilla pueden permanecer abiertas y relativamente estables. A veces, la partículas finas se van desprendiendo, quedando en su lugar las gruesas, por lo que no es posible que la fisura se tapone con estas partículas gruesas. *Vaughan y Soares* (1982) sugirieron que un "filtro perfecto"

debería poder detener la menor de las partículas que lleguen al filtro durante la erosión; sería necesario un filtro capaz de detener los flóculos de arcilla.

Se emprendió un amplio programa de investigación y encontraron una relación entre el diámetro de la menor partícula (o flóculo) que debe retener el filtro y la permeabilidad máxima que debe exigírsele. Esta relación es:

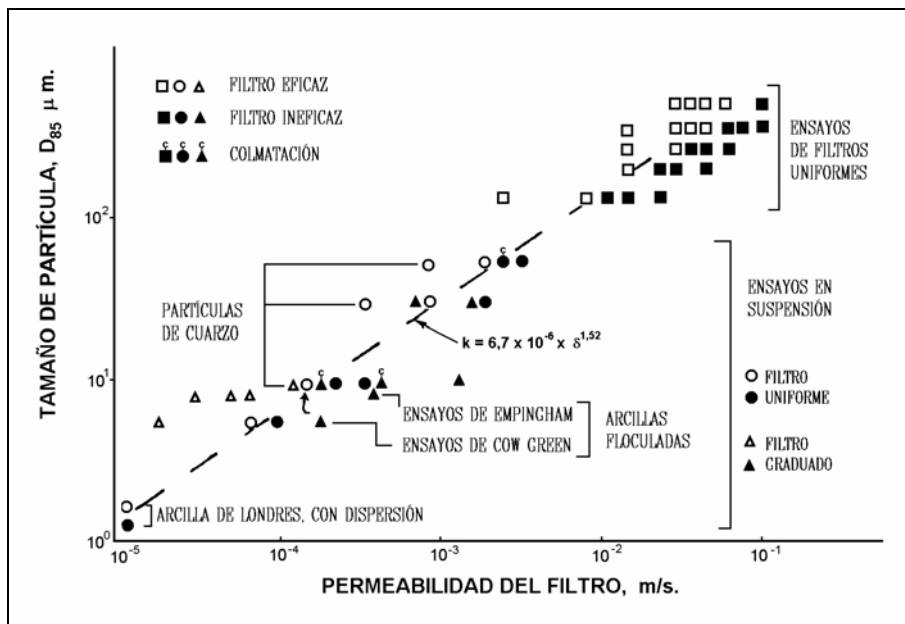


Figura 16.- Resultados de Vaughan y Soares (1982)

que cumple la siguiente ecuación:

$$k_F = 6.1 \times 10^{-6} \times \delta^{1.42} \quad \text{Ecuación 28}$$

o bien:

$$k_F = 6.7 \times 10^{-6} \times d_{85B}^{1.52} \quad \text{Ecuación 29}$$

donde: k es la permeabilidad del filtro (m/s), δ el tamaño de flóculo del suelo base (μm) y d_{85B} está también expresado en μm .

Otro punto que merece prestarle atención es tener especial cuidado que al tratar de obtener una permeabilidad reducida gracias a un alto contenido de finos, se puede llegar a desarrollar una cierta cohesión en el filtro que sería perjudicial puesto que supondría la posibilidad de que se abrieran fisuras dentro del propio filtro y estas quedarían abiertas por efecto de la cohesión del mismo. Para comprobarlo proponen un ensayo tan simple como tratar de hacer un castillo de arena como el que hacen los niños en la playa. Al sumergir en agua el castillo, dado que desaparecen las fuerzas capilares, si el castillo se mantiene es porque el filtro tiene cohesión.

Por otra parte, Sherard et al. (1984), han obtenido que la permeabilidad del filtro varía con el cuadrado del D_{15F} según la siguiente expresión:

$$k = a * D_{15F}^2 \quad \text{con } 0.2 < a < 0.6 \quad \text{Ecuación 30}$$

como valor medio toman:

$$k = 0.35 * D_{15F}^2 \quad \text{Ecuación 31}$$

donde k- permeabilidad (cm/s), D_{15F} (mm).

Sin embargo han comprobado que según la compactación y la forma de la curva granulométrica, el valor de la permeabilidad varía considerablemente respecto al expresado en la fórmula anterior, así por ejemplo, la permeabilidad de un filtro de gravas arenosas bien graduadas es sólo un 12% de la permeabilidad de un filtro de arena uniforme con el mismo D_{15F} .

La mayoría de los ensayos se hicieron con filtros compactados entre el 80 y 90% de la densidad relativa máxima, pero también hicieron algunos ensayos con filtros poco compactados observando que éstos permiten el paso de partículas de suelo base de 2 a 3 veces superiores a las que pasan a través del un filtro denso.

También resulta muy interesante el estudio realizado por Giroud (1996) sobre la permeabilidad del filtro, ya que aparte de resultados meramente empíricos, realiza un

cálculo numérico de la permeabilidad teniendo en cuenta las condiciones hidráulicas del flujo y la geometría del filtro.

Giroud (1996) explica con mucha claridad la forma de relacionar la permeabilidad con la granulometría del filtro, considerando un modelo sencillo que representa el suelo como tubos paralelos separados por un material impermeable, la permeabilidad del filtro aumenta al aumentar el tamaño de las aperturas de filtración.

En el caso de flujo laminar a través de un tubo, la ecuación de Poiseuille obtiene el caudal (Q) como:

$$Q = \frac{\pi \cdot \rho_w \cdot g \cdot D^4 \cdot \Delta h}{128 \cdot \eta_w \cdot L} \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde en el numerador aparecen respectivamente la densidad del agua (ρ_w), la aceleración de la gravedad (g), el diámetro del tubo (D) y la pérdida de carga (Δh), mientras que en el denominador aparecen la viscosidad del agua (η_w) y la longitud del tubo (L).

El filtro granular puede ser modelizado por tubos paralelos en los que $D = O_F$, es decir, el diámetro es el tamaño de apertura de filtración. Entonces el coeficiente de permeabilidad del filtro queda definido de la siguiente manera:

$$k = \frac{Q}{A \cdot \Delta h / L} \quad \text{Ecuación 33}$$

donde A es el área de filtro asociada con una apertura. La porosidad (n) de un modelo de tubos paralelos es :

$$n = \frac{(\pi/4)O_F^2}{A} \quad \text{Ecuación 34}$$

combinando las ecuaciones anteriores y considerando: $\rho_w=1000 \text{ kg/m}^3$, $g=9.81 \text{ m/s}^2$, $\eta_w=10^{-3} \text{ kg/(m s)}$, se obtiene:

$$k = 3.1 \cdot 10^5 \cdot n \cdot O_F^2 \quad \text{Ecuación 35}$$

Para un filtro granular, $n=1/3$ y $O_F=0.25 \cdot d_{5F}$, por lo que la ecuación anterior queda de la siguiente manera:

$$k = 6250 \cdot d_{5F}^2 \quad \text{Ecuación 36}$$

ecuación que es similar a la clásica de Hazen (1911) y que coincide en la forma propuesta por otros autores como Sherard et al. (1984).

Se puede obtener una expresión más general que no depende de si el flujo es laminar o turbulento mediante las siguientes ecuaciones:

$$\lambda = \frac{2 \cdot g \cdot D \cdot i}{V_t^2} \quad \text{Ecuación 37}$$

$$R_e = \frac{\rho_w \cdot V_t \cdot D}{\eta_w} \quad \text{Ecuación 38}$$

donde λ = coeficiente de pérdida de carga, i = gradiente hidráulico, V_t = velocidad del agua en el tubo y R_e = número de Reynolds.

En régimen turbulento, el coeficiente de pérdida de carga (λ) es una constante que depende de la rugosidad del tubo.

En régimen laminar se tiene:

$$\lambda = R_e / 64 \quad \text{Ecuación 39}$$

por lo que se puede obtener la siguiente expresión de la ecuación de Poiseuille:

$$V_t = \frac{\rho_w \cdot g \cdot D^2 \cdot i}{32 \cdot \eta_w} \quad \text{Ecuación 40}$$

si a continuación se aplica la ley de Darcy para flujo a través de un medio poroso:

$$V = k i$$

Ecuación 41

a partir de estas ecuaciones y teniendo en cuenta la geometría y forma de las partículas del filtro, se puede llegar a la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\beta \cdot \rho_w \cdot g}{\eta_w} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{1}{S_s^2}$$

Ecuación 42

donde k = permeabilidad, β = factor de forma que es función de la tortuosidad del medio, ρ_w = densidad del agua, g = aceleración de la gravedad, η_w = viscosidad del agua, n = porosidad del medio permeable y S_s = superficie específica de los elementos sólidos del medio permeable.

Gourc (1982) (Ref. en Giroud 1996), ha señalado que en las estructuras geotécnicas, el régimen de flujo es generalmente laminar, siendo el valor del número de Reynolds:

$$R_e = \frac{4 \cdot \sqrt{2 \cdot \beta}}{\eta_w \cdot (1-n)} \cdot \frac{\rho_w \cdot V}{S_s}$$

Ecuación 43

donde se puede tomar con suficiente aproximación $\beta=0.1$, tal y como propone Giroud (1996). En el caso de un filtro granular, la ecuación se transforma en la siguiente:

$$k = \frac{\beta \cdot \rho_w \cdot g}{\eta_w} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{d_{med}^2}{36}$$

Ecuación 44

si en esta ecuación se sustituyen los valores explicados anteriormente, se obtiene la siguiente expresión sencilla:

$$k = 2270 d_{med}^2 \quad k \text{ (m/s)}, d_{med} \text{ (m)} \quad \text{Ecuación 45}$$

en el caso de un filtro granular con granulometría lineal (respecto a ejes $x = \log d$, $y = \% \text{pasa}$), el d_{med} equivale al d_{50} si el coeficiente de uniformidad es $C_u=1$, y al d_{38} en el caso de que $C_u=5$.

En este mismo caso, Giroud (1996) propone las siguientes ecuaciones que emplean el d_5 y el d_{10} respectivamente:

$$\text{Si } C_u = 1 \quad k = 2270 d_5^2 \quad \text{ó} \quad k = 2270 d_{10}^2 \quad \text{Ecuación 46}$$

$$\text{Si } C_u = 5 \quad k = 18497 d_5^2 \quad \text{ó} \quad k = 13406 d_{10}^2 \quad \text{Ecuación 47}$$

También Indraratna et al. (1996) han buscado una expresión para la permeabilidad del filtro en función de la granulometría, para lo cual han comprobado previamente que ésta depende de la granulometría de la fracción más fina y de la porosidad. Han realizado una serie de ensayos de permeabilidad para filtros de diferentes granulometrías: igual C_u y distinto D_{15F} , igual D_{15F} y distinto C_u e igual D_{100F} y distinto C_u ; obteniendo que el D_{15F} es muy representativo de la permeabilidad, pero que además es preciso tener en cuenta diámetros inferiores como el D_{10F} y el D_{5F} , proponiendo la siguiente expresión:

$$k_F = 1.02 (D_{5F} * D_{10F})^{0.934} \quad R^2 = 0.92 \quad k_F \text{ (cm/s) y } D_{10F}, D_{5F} \text{ (mm)}$$

Ecuación 48

En cuanto a la influencia de la permeabilidad del filtro en su comportamiento frente a la erosión interna, han encontrado una relación similar a la previamente obtenida por Vaughan et al. (1982) pero con una expresión matemática diferente:

$$\text{Indraratna et al. :} \quad k_{FL} = 6.5 \times 10^{-4} \delta_{85B}^{1.25} \quad k_{FL} \text{ (cm/s), } \delta_{85B} \text{ (\mu m)}$$

Ecuación 49

$$\text{Vaughan et al.:} \quad k_{FL} = 6.7 \times 10^{-4} \delta_{85B}^{1.52} \quad k_{FL} \text{ (cm/s), } \delta_{85B} \text{ (\mu m)}$$

Ecuación 50

La diferencia encontrada ya la justificaba previamente Vaughan et al (1982) puesto que cada arcilla, en función de su naturaleza, tiene una forma diferente de flocular.

También Fujisawa et al. (1997) han comprobado que los resultados obtenidos en los ensayos coinciden con las predicciones de Vaughan et al (1982) por lo que concluyen que efectivamente, la permeabilidad del filtro se puede usar como un parámetro estándar de diseño. Hay que tener en cuenta que en los ensayos que realizaron, el filtro se colocaba sin compactación, lo cual afecta lógicamente a la permeabilidad.

Incluso Sherard reconoce que la permeabilidad puede ser mejor que el D_{15F} del filtro, sin embargo insiste en plantear sus criterios de diseño sin considerar la permeabilidad.

En cualquier caso es interesante destacar que de nuevo se echa en falta una mayor precisión en los resultados de los investigadores ya que pocos llegan a contabilizar el efecto de la compactación en la permeabilidad y su correspondiente efecto en la retención de partículas del suelo base, aunque todos reconocen su influencia.

2.5.4 Espesor del filtro

Según muestran los numerosos ensayos realizados, para el establecimiento del filtro graduado natural sólo se utilizan los primeros centímetros de espesor del filtro. Lo que normalmente ocurre es que la formación del filtro graduado comienza donde se produce un flujo concentrado; el filtro se impermeabiliza justo en la superficie, de manera que aparece un gradiente muy alto en una distancia muy corta y entonces se produce una rotura local y el filtro tiene que empezar a volver a sellarse, extendiéndose de forma que acaba tupiéndose todo el filtro, de tal manera que sólo acaba siendo filtro graduado un pequeño espesor.

Vaid y Tomlinson (1996) han ideado un nuevo ensayo de erosión en el cual han comprobado la influencia del espesor del filtro. Para ello han ensayo filtros con 2.5 cm y 3.7 cm de espesor. Han comprobado que el menor espesor da lugar a

sifonamiento para gradientes inferiores a los necesarios para el espesor más grueso. Como causa probable señalan que los filtros de menor espesor no son capaces de atrapar suficiente material de suelo base como para establecer una zona de autofiltración.

Lo que ocurre es que en obra hay que contar con la segregación más o menos parcial y con que no hay forma de garantizar que se cumplen las condiciones de filtro en toda la superficie, si se emplean espesores pequeños, pues habría que someter a ensayos y control cada palada de material. Entonces, se suplen estas imperfecciones con un mayor espesor de filtro, que por otra parte da una mayor garantía en caso de fisuración.

En USA (Rocky Mountain Pumped Storage Project) se han empleado anchuras de filtro de 0,80 m., utilizando material procesado con una granulometría muy cuidada y técnicas cuidadosas de extendido y colocación, para evitar la segregación. En Australia son comunes anchuras de 1 m.

Pero en general, los filtros se colocan con espesores de unos tres metros, que es lo que puede colocarse con medios mecánicos sin dificultad, pero este espesor puede incluso aumentarse en casos especiales o en puntos que deban estar localmente más protegidos.

Por tanto, no parece que sea interesante estudiar más en profundidad la influencia del espesor del filtro.

2.6 Influencia de las condiciones de flujo

2.6.1 Dirección del flujo

En general, las condiciones críticas de filtración, es decir aquellas en que la posibilidad de migración de partículas es mayor, incluyen el posible establecimiento de un flujo perpendicular a la interfase. Sin embargo existen casos en que el flujo

puede no tener esa dirección o ser, incluso, paralelo a la interfase y son menores entonces los requerimientos que deben exigirse al filtro.

Bravo (1995) pone los siguientes ejemplos típicos de estas dos condiciones extremas de flujo:

1. Flujo perpendicular o aproximadamente perpendicular a la interfase:

a).- en el contacto de aguas abajo entre el núcleo y el filtro fino en una presa de materiales sueltos.

b).- en el contacto de aguas arriba de un núcleo sometido a fluctuaciones del embalse.

c).- en los contactos entre el filtro fino y el grueso o el dren en el dren chimenea, capas drenantes o drenes en zanja.

d).- en los contactos entre los suelos de cimentación y el filtro fino de fondo de un sistema de drenaje aguas/abajo.

e).- en los contactos entre un espaldón de tierras y el filtro de más arriba de un sistema de drenaje aguas/abajo.

f).- en los contactos entre capas de grava/arena y capas de limo/arcilla dentro de cimentaciones aluviales, en sitios donde la circulación de agua es perpendicular o casi perpendicular a la superficie de las capas.

2. Flujo paralelo o aproximadamente paralelo a la interfase:

a).- en los contactos entre capas filtrantes y el material impermeable de fondo y en los contactos entre el filtro y el material de protección de los taludes de aguas/arriba.

b).- en los contactos entre las protecciones del talud de aguas abajo con material grueso y el material de base de los espaldones.

c).- en los contactos entre capas de grava/arena y capas de limo/arcilla dentro de cimentaciones aluviales, en sitios donde la circulación de agua es paralelo o casi paralelo a la superficie de las capas.

d).- en los contactos entre los filtros finos y gruesos dentro de capas permeables drenantes de gran capacidad de transporte.

Por otra parte, Graauw et al. (1984) consideran cuatro tipos de flujo:

1. flujo estacionario paralelo a la interfase
2. flujo cíclico paralelo a la interfase
3. flujo estacionario perpendicular a la interfase
4. flujo cíclico perpendicular a la interfase

En cada situación se puede determinar el *gradiente hidráulico crítico* (I_{cr}), definido como aquel por debajo del cual no aparece erosión.

En general, el gradiente hidráulico crítico depende de:

1. características del suelo base: granulometría, forma de las partículas, densidad y compacidad
2. características del filtro: granulometría, forma de las partículas, densidad y compacidad
3. tipo de flujo: función de la velocidad del flujo y de las propiedades físicas del agua. El flujo puede ser caracterizado por el número de Reynolds (Re). Siendo el flujo laminar para $Re < 4$, (y la ley de Darçy es lineal) y turbulento para $Re > 600-1000$.

2.6.2 Efecto de las condiciones del flujo en la erosión interna

Trabajando sobre el problema de los suelos cohesivos, *R. Davidenkoff* (1955) desarrolló una fórmula que relacionaba el tamaño del material del filtro con la cohesión del suelo base y con el gradiente hidráulico. Posteriormente *Zweck y Davidenkoff* (1957) demostraron experimentalmente que, aumentando la finura de la base, podía también aumentarse la relación D_{50}/d_{50} recomendada por el USBR. Sin embargo, no experimentaron con materiales menores de 0,1 mm.

En 1965, *Zaslavsky y Kassif* presentaron un análisis teórico del mecanismo de "embutido" de suelos cohesivos en los poros de los suelos granulares, tomando en consideración los gradientes reales de salida que se producen en este caso. En un informe posterior presentaron, junto con *Zeitlen* la aplicación de esta teoría al proyecto de filtros para materiales cohesivos. En este informe se hacía un estudio experimental, protegiendo unos suelos arcillosos con filtros granulares y con placas perforadas. Para dar una idea de sus resultados, para la placa de 15 mm. de diámetro de perforaciones se producía la rotura para un gradiente medio de 686 con una sobrecarga de sólo 0,1 kg/cm². Con sobrecarga cero, se producía la rotura con gradiente 20.

Es interesante observar que los ensayos se mantuvieron en algunos casos hasta 8 meses y que al producirse la rotura se desprendían los trozos más bien en forma de agregados visibles que de partículas individualizadas.

Como consecuencia de estos estudios, hay que resaltar el hecho de que para un material base arcilloso (con *IP* comprendido entre 38 y 55 y con el 55 a 65% de partículas menores de 5 micras) se ha usado en Israel un material de filtro de tamaño máximo 20 mm. y $D_{15}= 4$ mm.

En el mismo sentido investigaron en Polonia (1970) *Wolski, Furstemberg, Mioduszewski y Reczek* para la construcción de una serie de presas en los Cárpatos, entre ellas la presa de *Tresna*, en la que se utilizaron para el núcleo materiales

cohesivos de origen flisch. Comenzaron considerando las diferentes causas que pueden ocasionar que el gradiente hidráulico real en el contacto del suelo cohesivo con el filtro pueda llegar a ser hasta de 60 veces el gradiente medio (en lo que coinciden con el estudio de *Kassif* et al.) y terminaron proponiendo un ábaco (Fig.2.6.2-I) que relaciona el diámetro D_{17} que debe tener el filtro, con el coeficiente de uniformidad del propio filtro, con el gradiente medio y con el índice de plasticidad del suelo base.

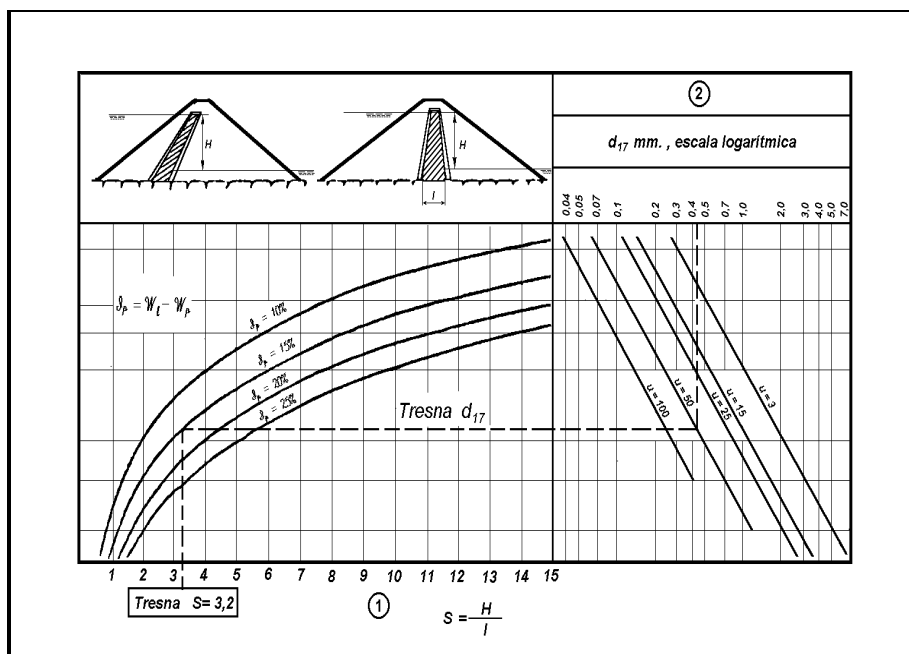


Figura 17 .- Ábaco de Wolski, Furstemberg, Mioduszewski y Reczek (1970)

Prescindiendo de que el ábaco propuesto supone una relación entre el índice de plasticidad y la resistencia a esfuerzo cortante del suelo base que no será exactamente válida más que para el tipo de suelos ensayado, según Bravo (1995), el camino emprendido por estos estudios es atrayente y puede facilitar el proyecto de filtros basado en la experimentación.

Un aspecto interesante de los resultados de los ensayos realizados por Kenney et al. (1985) fue que por debajo de unas condiciones hidrodinámicas mínimas, el gradiente hidráulico no era suficiente para conseguir mover las partículas de la base a través de

los poros del filtro. Se encontró que podían establecerse condiciones hidrodinámicas semejantes para valores iguales de un número, análogo al de *Reynolds*, que podría representarse por R' ,

$$R' = \frac{q \cdot D_s}{n \cdot \theta} \quad \text{Ecuación 51}$$

siendo q el caudal por unidad de superficie de sección transversal, n la porosidad y θ la viscosidad cinemática del fluido. Parece que para poder determinar el valor de D_c^* es necesario un valor mínimo de $R' = 10$ aproximadamente.

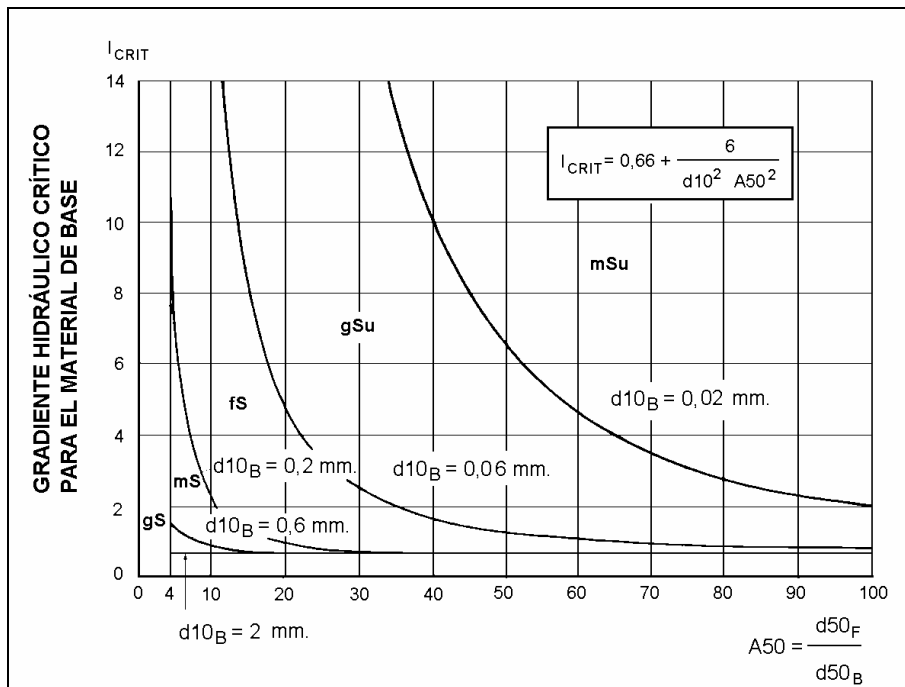


Figura 18 .- Ábaco de Ziems (1968)

En este sentido, *Ziems* (1968), encontró el gradiente crítico, que era necesario para provocar arrastre de partículas, en función de d_{10B} y de la relación $A_{50} = D_{50F} / d_{50B}$, (Fig.2.6.2-II).

Para valores muy altos de A_{50} , el gradiente crítico llega a ser menor que la unidad y para valores de A_{50} próximos a 4 la combinación de base-filtro es estable incluso para

gradientes muy altos. Es decir, que los criterios clásicos de filtración están obtenidos pensando en condiciones hidrodinámicas muy duras y que para condiciones hidrodinámicas menores pueden aceptarse criterios menos restrictivos, aunque parece que la experimentación actual no permite generalizar el uso de criterios para gradientes intermedios.

Por otra parte, Sherard et al. (1984) usaron, en los ensayos preliminares, presiones de 0.14 kg/cm^2 en vez de los 4 kg/cm^2 que han empleado en los ensayos de ranura (“Slot Tests”), sin embargo los resultados no fueron satisfactorios por dos razones:

- Para algunas arcillas el filtro no se estaba ensayando ya que la pared de la ranura no colapsaba, la filtración localizada no tenía la suficiente velocidad para erosionar al suelo base compactado.
- Más frecuentemente, de las paredes de la ranura se desprendían trozos de suelo base que rápidamente taponaban el filtro sin que en realidad se hubiera producido el verdadero fenómeno de la erosión interna

Por ambas razones los autores justifican el empleo de presiones tan altas en los ensayos. Con un gradiente hidráulico aproximado de 1.000, los autores consideran que el resultado de los ensayos es suficientemente conservador en comparación con las condiciones reales de erosión interna.

También Bravo et al (1985) ha estudiado la influencia de las condiciones de flujo ya que en la presa de Canales tenían como material de núcleo una arcilla con límite plástico 28 y límite líquido 67 y un d_{85B} muy pequeño, que quedaba por debajo del gráfico de Sherard para arcillas (1982). Han realizado ensayos siguiendo la técnica de Sherard y encontrando que para un d_{85B} de 9 micras, filtros con D_{15F} igual a 0,4 y 0,6 mm. funcionan perfectamente, mientras que el filtro de $D_{15F} = 0,8 \text{ mm.}$ se comporta bien con gradiente hasta 45 y aceptablemente hasta 130, mientras que con gradiente 260 el filtro acababa taponándose, pero sólo después de haber

experimentado unos aumentos de caudal bastante fuertes con gran pérdida de material de base.

El filtro de $D_{15F} = 1,25$ mm. sólo se comporta bien con gradiente 65, mientras que con presiones mayores sufre las mismas pérdidas de material y aumentos de caudal que se ha comentado antes. Bravo (1995) comenta que da la impresión de que, al crecer la velocidad, va arrancando partículas de arcilla cada vez mayores que se van disgregando en la superficie de contacto, pero que llega un momento en que las partículas que llegan son más que las que se disgregan y el filtro acaba taponándose, al menos en el ensayo.

Queda por tanto clara la enorme influencia del gradiente hidráulico.

Pero no todos los investigadores están de acuerdo con Sherard respecto al empleo de altos gradientes hidráulicos en los ensayos, así por ejemplo, el LNEC de Lisboa ha puesto a punto un ensayo, denominado "Crack Erosion Test", que se describe en las publicaciones de Maranha das Neves y Seco e Pinto de 1987 y 1989. El ensayo está diseñado para simular un flujo a través de una fisura en una presa de núcleo hasta el filtro de aguas abajo. El modelo permite pasar a través de la fisura caudales a las velocidades aproximadas a las que el agua circula en una presa, en contraste con los ensayos de Sherard que emplean gradientes y velocidades mucho más altas.

Los autores critican que, en sus ensayos, Sherard empleaba valores de la velocidad del agua dentro de la fisura, entre 5 y 10 m/s. y estiman que el gradiente empleado por Sherard, se puede deducir del ábaco de Moody, obteniéndose para H/l un valor aproximado de 60 y no de 1000 a 2000, como decía Sherard. La realidad es que, según Bravo (1995), los gradientes medios empleados en las obras son del orden de 1 a 3 y como las concentraciones puntuales de gradiente, son, según Wolski, que coincide en ello con Kassif, del orden de sesenta veces las medias, no estaría tan descaminado el gradiente empleado por Sherard en sus ensayos. El valor de 1000 a 2000 sale de dividir los 40 m. de carga del ensayo por los 25 mm. de espesor de la muestra en el material fino, lo que daría entonces unas velocidades superiores, si es

aplicable el gráfico de Moody en las condiciones del ensayo, pero no está considerando la presión de agua en el propio filtro.

En cualquier caso, las velocidades del agua pueden ser más próximas a las reales en los ensayos del LNEC, pero los gradientes pueden ser muy inferiores a los que resultan aplicados sobre el material de las obras.

El modelo de Maranha Das Neves emplea unas velocidades no muy altas, presenta una superficie filtrante expuesta muy superior a la que correspondería a la fisura y probablemente los gradientes son menores que los reales. Sin embargo los resultados obtenidos, son coherentes con el "No Erosion Filter Test", aunque el ensayo del LNEC admitiría tamaños algo mayores para el D_{15F} del material del filtro.

El modelo puede ser colocado para estudiar fisuras horizontales, verticales e inclinadas. Los resultados del ensayo, parecen confirmar que la inclinación en rampa disminuye, en general, las velocidades iniciales y las erosiones y que la inclinación en pendiente las agrava, aunque estas conclusiones no se pueden obtener en todos los casos.

También en Portugal, Sêco y Santana (1989) han empleado presiones variables en escalones de 50 kPa, (0.5 kg/cm^2) cada 5 minutos hasta una presión máxima de 200 kPa, mientras que en los ensayos que denominan de "orificio" la presión tiene un valor constante de 250 kPa.

Con el suelo base de Santa Catalina han comprobado que para un mismo material de filtro, el fracaso no se produce hasta que no se supera una presión de 150 kPa.

También han realizado ensayos a largo plazo con una presión de agua de 50 kPa durante más de 20 días, comprobando que el agua siempre sale clara y que no hay signos de inestabilidad del suelo base.

Khor y Woo (1989) no han comprobado específicamente la influencia de las condiciones de flujo, sin embargo analizan la velocidad de erosión presente en los

ensayos. Han empleado un ensayo del tipo NEF, con una pastilla de suelo base de 25 mm de espesor y una presión de 4 kg/cm², (0.4 MPa) que según los autores, da lugar a un gradiente hidráulico de 1,600.

En la pastilla de suelo base se practica un orificio de 1.5 mm de diámetro, comprobándose que en todos los casos la velocidad del agua a través de este orificio es superior a 1.41 m/s, lo que supone que un esfuerzo cortante de 97 dynas/cm², por lo que todas las muestras son erosionables en estas condiciones.

Además de los criterios de retención o geométricos, Brauns (1991) propone considerar un “criterio hidráulico” que se debe tener en cuenta en aquellas situaciones en que el cumplimiento del criterio geométrico no está en nuestras manos, como por ejemplo si aparecen en el cimientto capas de suelo geoméricamente inestables.

Sobre este tema Brauns (1991) considera la influencia de la dirección del flujo y para cada caso define un “gradiente hidráulico crítico”, (i_{Fcrit}), que depende del d_{50B} y del D_{wF} , que define como el diámetro medio del filtro, pero obteniendo la media ponderada de cada una de las fracciones que lo componen. Así por ejemplo, para d_{50B} tendiendo a cero, el i_{Fcrit} tiende también a cero, pero para $d_{50B}=0.7\text{mm}$ y $D_{wF}=5\text{mm}$, se tiene $i_{Fcrit}=0.6$.

Otro tema importante que señala Brauns (1991) es que hay que estudiar la validez de la ley de Darçy, que supone una linealidad entre la velocidad y el gradiente hidráulico, puesto que para determinados números de Reynolds no es posible aplicar dicha ley.

La validez de la ley de Darçy está delimitada por una línea de ecuación:

$$I_{crit} \leq 0.2/D_w^3 \qquad \text{Ecuación 52}$$

Donde D_w = diámetro medio del filtro, (haciendo media ponderada de sus fracciones), en mm.

Según esta línea, para valores de $D_{wF} > 6\text{mm}$, la ley de Darçy no es válida, sea cual sea el gradiente, (Fig. 2.6.2- IV).

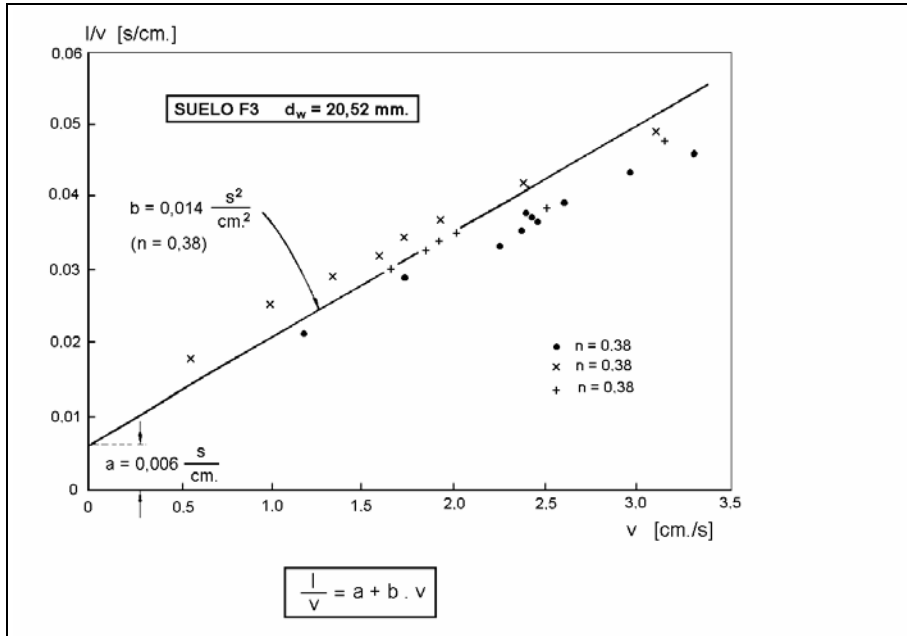


Figura 19.- Ley de flujo no lineal para materiales no granulares

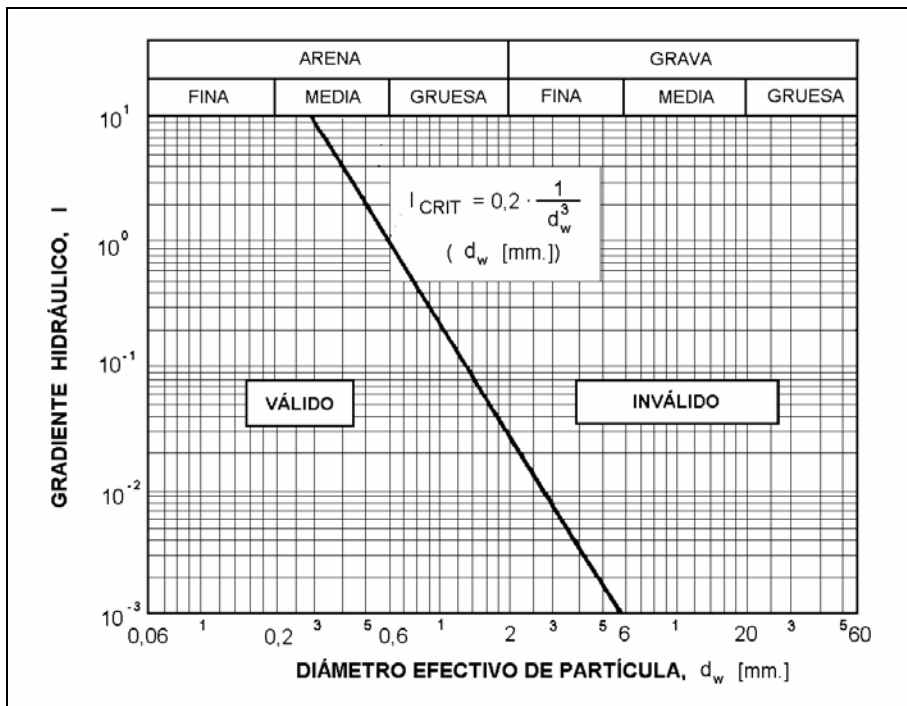


Figura 20 .- Validez de la Ley de Darçy según Brauns (1991)

En los casos en que no se cumpla la ley de Darçy, Brauns (1991) propone un coeficiente de reducción de la permeabilidad de la forma:

$$k = \frac{k^*}{k_f} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + 0.2 \cdot I \cdot D_w^3}} \quad \text{Ecuación 53}$$

Donde D_w = diámetro medio (mm), I = gradiente hidráulico, k^* = permeabilidad real, k_f = permeabilidad teórica, (Fig.2.6.2-V).

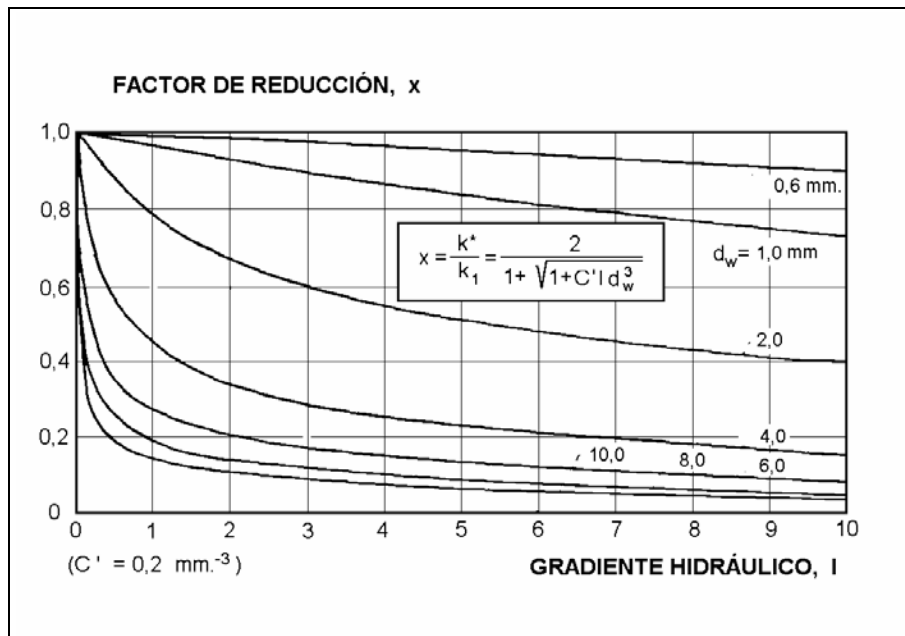


Figura 21 .- Coeficiente de reducción de la permeabilidad (Brauns 1991)

Es por tanto importante conocer el gradiente hidráulico real que se produce en una presa y por ello Leonards et al. (1991) han calculado el gradiente máximo esperado en la presa de Conner Run, dando un valor de 6. Sin embargo en los ensayos de dispersabilidad han empleado gradientes muy superiores, hasta 240, comprobando que una determinada muestra de suelo base que no experimenta sifonamiento con un gradiente de 160, sí la sufre si el gradiente aumenta hasta 240.

Köhler (1992) ha comprobado que las condiciones del flujo tienen una influencia decisiva en el fenómeno de la erosión interna ya que la interacción entre el suelo base y el filtro da lugar a una acumulación de partículas del suelo base en la superficie del filtro de forma que se puede alcanzar un equilibrio, sin embargo este equilibrio puede deshacerse si se modifican las condiciones del flujo. Köhler considera además que el filtro es un sistema compuesto por suelo, agua y aire, de forma que se producen variaciones de la presión de ese aire que pueden dar lugar también a modificaciones significativas del comportamiento del filtro.

En España, Kabasy (1993) ha realizado ensayos con muestras de bases arcillosas empleadas en algunas presas españolas protegidas con filtros de geotextil en vez de filtros granulares, sin embargo las conclusiones obtenidas respecto a la influencia de las condiciones de flujo son destacables:

- al aumentar el gradiente hidráulico aumenta el peso total de suelo base arrastrado, de forma casi lineal
- al aumentar progresivamente la presión durante el ensayo, aumenta la concentración y el peso total filtrado, pero no se llegan a alcanzar los valores iniciales del primer escalón de presión (0.25 kg/cm^2), (0.025 MPa). Esto se debe a que en el primer escalón de presión se ha formado una capa de suelo base sobre la superficie del geotextil que da lugar a un fenómeno de autofiltración. También se ha comprobado que cuanto mayor es la duración del primer intervalo de presión, más estable es la capa formada y menor es el aumento de la concentración con la subida de presión
- con presiones pequeñas hay más concentración de arrastre pero menos caudal, y viceversa
- en algunos ensayos no se perforó la pastilla de suelo base, mientras que otros se varió el número de orificios, observándose que cuantos más orificios se produce

menor peso filtrado, obteniéndose el mayor peso filtrado para el caso de ausencia de orificio

Por otra parte, del estudio de 160 ensayos de filtración realizados por otros autores Fischer y Holtz (1996) concluyen que con gradientes hidráulicos por debajo de 20, la influencia del gradiente hidráulico no es significativa, ni tampoco lo es la dirección del flujo, mientras que Vaid y Tomlinson (1996) han realizado ensayos de erosión en los que se va variando la carga hidráulica y por lo tanto el gradiente, en escalones espaciados regularmente en el tiempo. Como es de esperar, cuanto mayor es el gradiente hidráulico mayor es la erosión del suelo base, pero lo más interesante que han obtenido es que también tiene influencia la velocidad de variación del gradiente, de forma que si el gradiente se varía muy rápidamente da lugar a mayor erosión que si se mantiene un ritmo más lento de subida del gradiente.

Los investigadores creen que esto se debe a que el súbito incremento de las fuerzas de filtración asociado al incremento del gradiente puede no permitir el tiempo suficiente para la formación del efecto arco entre partículas, tan importante para reducir la erosión.

Más recientemente, Locke e Indraratna (2000) han utilizado un ensayo del tipo “pinhole” con algunas modificaciones¹¹, en el cual se ha variado la carga hidráulica desde 0.3 m a 2.2 m, siendo el espesor de la pastilla de suelo base de 200mm y el diámetro del orificio de 3 mm, con lo que se obtienen unas velocidades de flujo entre 0.7 m/s y 3.5 m/s. Se ha medido la erosión producida, la granulometría de las partículas erosionadas y el esfuerzo cortante producido por el agua para distintos escalones de carga hidráulica, obteniéndose que la *ratio de erosión* (peso de las partículas erosionadas por cada segundo y metro cuadrado de superficie), es igual a un coeficiente (α) por la diferencia entre el *esfuerzo cortante* (τ) y la *tensión crítica de arrastre* (τ_c), según la expresión:

$$\text{Ratio de Erosión} = \alpha (\tau - \tau_c) \quad \text{Ecuación 54}$$

¹¹ Ver ficha de ensayo

Sin embargo, como ya se ha comentado anteriormente, para velocidades bajas no han encontrado ninguna relación entre la *velocidad del flujo* y el *tamaño de las partículas erosionadas*, (calculado después de dispersión), aunque reconocen que es lógico pensar que si se emplean velocidades superiores, cuanto mayor sea la velocidad, mayor debe ser el tamaño máximo de las partículas erosionadas.

2.7 Influencia de otras variables

2.7.1 Propiedades fisico-químicas del agua

Los casos históricos y los ensayos de “Pinhole” de Sherard et al (1976) confirman que el principal factor gobernante de la dispersión es el contenido relativo de sodio en el agua intersticial del suelo. Landau et al. (1977) han destacado que cuando se combina un agua de compactación con poca concentración de sales con una humedad por el lado húmedo respecto a la óptima Próctor, se pueden producir erosión interna con mayor facilidad.

En cuanto al agua “externa”, la que actúa como agente erosivo, Landau et al. (1977) han comprobado que probablemente el agua con baja concentración de iones provoca un aumento significativo de la repulsión osmótica y desemboca en la fácil defloculación del suelo agregado, por esa razón, Ryker (1976) recomienda usar agua destilada en los ensayos de dispersabilidad.

Por su parte, Sherard et al (1972) han observado que muchos fallos en presas de todo el mundo se dan entre aquellas que retienen agua pura, con un contenido de sales que varía entre 0.3 y 5.0 meq/l. Esta tendencia ha sido confirmada por Bourdeaux e Imaizume (1977).

En ese mismo año, Coumoulos (1977) sugiere que el catión principal (calcio o sodio) en el agua del embalse de una presa tiene una influencia decisiva, de forma que un alto contenido de calcio del agua filtrante puede reducir la erosión por sifonamiento mientras que se produce todo lo contrario para concentraciones altas de sodio.

Arulanadan et al (1980) han realizado un extenso programa de ensayos de erosión de arcillas en cilindro rotatorio. Este instrumento tiene un cilindro del material arcilloso montado dentro de un cilindro mayor que puede rotar a gran velocidad.

El cilindro exterior está lleno de agua y al girar se puede medir el esfuerzo cortante provocado por el agua sobre la superficie de la arcilla. Al terminar el ensayo se pesa la arcilla y se determina la cantidad de material perdido lo que permite calcular la *ratio de erosión* para cada esfuerzo cortante, resultando ser proporcionales.

Como resultado de estos ensayos, ha encontrado que la resistencia a la erosión superficial de un suelo cohesivo depende fundamentalmente de las fuerzas de enlace entre partículas y por lo tanto, de aquellos factores que se conoce que tienen influencia en estas fuerzas, es decir, que afectan a la dispersabilidad.

Los ensayos muestran que la erosión está fuertemente relacionada con la “*ratio de absorción de sodio*” (SAR) y la concentración iónica del fluido erosivo, influyendo también en la erosionabilidad la composición química del agua intersticial, la presencia de cementantes en el suelo base e incluso el pH y la temperatura.

Por esta razón recomienda emplear en los ensayos de erosión el mismo agua del embalse correspondiente o agua destilada para quedar del lado de la seguridad.

También Vaughan y Soares (1982) han comprobado que el tamaño de flóculo del suelo base aumenta con el contenido de sales hasta un máximo de 10 meq/l. Han ensayado sólo arcillas con Illita como mineral principal por lo que para otros minerales se pueden esperar resultados diferentes, ya que para distintas arcillas han observado que el tamaño de flóculo aumenta al principio muy rápidamente con el contenido de sales permaneciendo constante a partir de los 10 meq/l.

El efecto del agua en el diseño de filtros granulares ha sido también estudiado por Sherard et al., tanto en el “Slurry Test” como en el “Slot Test”, han realizado algunos ensayos con agua destilada y otros con agua del suministro público, con cerca de 8 meq/l de sales disueltas, principalmente cationes de calcio y magnesio. Llegando a la

conclusión de no hay una gran diferencia en el resultado de los ensayos según el agua empleada, pero el D_{15FL} obtenido con agua destilada es aproximadamente 0.1 mm inferior que el valor determinado en los ensayos que emplean agua no destilada.

Locke e Indraratna (2000), han comprobado que al aumentar artificialmente el contenido de sodio en el agua fluyente, se reduce el caudal de sólidos erosionados. Sin embargo, el Na^{++} no tiene efecto en la granulometría de las partículas erosionadas (después de dispersión).

En cuanto al contenido de Na^{++} en el agua intersticial del suelo base, se observa que éste hace aumentar la ratio de erosión, aunque de nuevo no se aprecia influencia alguna en la granulometría después de la dispersión de las partículas erosionadas.

2.7.2 Condiciones geométricas

Zhu y Anderson (1996) han realizado ensayos de erosión en los que han variado la geometría del orificio practicado en la pastilla de suelo base, empleando orificios de forma cilíndrica y en forma de ranura. Han comprobado que la resistencia frente a la erosión es mayor en las muestras que tenían un orificio cilíndrico que en aquellas con orificio en forma de ranura. La razón que exponen es que el efecto arco se ve más favorecido en el orificio cilíndrico.

2.7.3 Presión de confinamiento

Vaid y Tomlinson (1996) han ideado un nuevo ensayo en el que toda la probeta está sumergida en un tanque de agua que permite la saturación completa de los materiales y además puede controlar la presión de confinamiento.

Los investigadores han observado que una alta presión de confinamiento parece actuar como una fuerza desestabilizadora, causando la erosión del suelo base con gradientes bajos, aunque para ratios D_{15F}/d_{85B} muy altos, el efecto de la presión de confinamiento es menos significativo.

2.8 Criterios actuales para el diseño de filtros granulares

2.8.1 Introducción

Los primeros criterios para el dimensionamiento de filtros granulares se remontan casi a principios del siglo XX, en particular al año 1923, en el que Prinz establece la condición $D_{50F} / d_{50B} < 4$, si bien es muy probable que hubiese criterios anteriores aunque no se han encontrado referencias.

A partir de ese momento han ido apareciendo nuevos criterios, generalmente de expresión muy sencilla, en los que básicamente se comparan dos diámetros característicos del filtro y del suelo base. Con el tiempo y los avances conseguidos en la investigación, estos criterios se han ido perfeccionando y lógicamente complicando.

Puesto que sería inviable describir detalladamente cada uno de estos criterios se ha realizado una división, necesariamente arbitraria, entre los criterios anteriores a 1980 y los posteriores a esa fecha, para enumerar simplemente los primeros y describir, con un poco más detalle, los segundos.

La elección de esta fecha como frontera, 1980, se debe a dos razones principales:

- Abarcar los estudios más recientes, (ver que se incluyen resultados hasta junio de 2000)
- Incluir el gran impulso realizado por J.L. Sherard, posiblemente el más importante investigador mundial sobre la cuestión, que fundamentalmente tuvo lugar en la década de los ochenta.

2.8.2 Criterios empíricos anteriores a 1980

A continuación se incluye a modo informativo una tabla con los criterios empíricos para el diseño de filtros, anteriores a 1.980. Cada columna contiene la siguiente información:

- nombre del autor
- fecha
- breve descripción de las condiciones del criterio
- D_F .- diámetro de comparación del filtro
- d_B .- diámetro de comparación del suelo base
- “SIG.”.- signo de la desigualdad, ejemplo: $D_{15F} / d_{85B} \leq 9$
- “RAT. I”.- valor inferior del ratio D_F/d_B
- “RAT. S”.- valor superior del ratio D_F/d_B

Las referencias completas de la mayoría de estos criterios se pueden encontrar en Schuler y Brauns (1992), aunque se han incluido algunos criterios nuevos.

CAPÍTULO 2 .- REVISIÓN DE LOS CONOCIMIENTOS

CRITERIO	AÑO	CONDICIONES	DF	dB	SIG	RAT.I	RAT.S
Prinz	1923	Suelo Unif	D50	d50	<		4
Bertram 1	1940	Arenas Unif	D15	d15	<	8	15
Bertram 2	1940		D15	d85	<	6	11
Newton y Hurley 1	1940	Filtr Grav Base WS	D15	d15	<		32
Newton y Hurley 2	1940	Filtr Grav Base WS	D15	d85	<		15
USCE.	1941	Filt Grad	D15	d85	=		5
Taylor	1948	Suelo Unif	D50	d50	=		7
Therzaghi y Peck 1	1948		D15	d85	<		4
Therzaghi y Peck 2	1948		D15	d15	>		4
Sichardt 1	1952	Suelo Unif (Est. denso)	D50	d50	<		6
Sichardt 2	1952	Suelo Unif (Est. Suelto)	D50	d50	<		2
Karpoff 1	1953	D100F<7,5mm Gran Paral Filtros Unif.	D50	d50	<	5	10
Karpoff 2	1953	D100F<7,5mm Gran Paral Well Graded	D50	d50	<	12	58
Karpoff 3	1953	D100F<7,5mm Gran Paral	D15	d15	<	12	40
USCE. 1	1953	Suelo Unif. Curvas Paralelas	D15	d85	<		5
USCE. 2	1953	Suelo Unif. Curvas Paralelas	D50	d50	<		25
Leatherwood y Peterson 1	1954	Fil Unif y Grad. Gravas y arenas	D15	d85	<		4
Leatherwood y Peterson 2	1954	Fil Unif y Grad. Gravas y arenas	D50	d50	<		5
Mallet y Pacqant	1954	Esferas	D15	d15	=		9
Mayer	1954	Suelo Unif Esferas	D50	d50	=	6	10
Aristovki-Beger	1955	CuB<5-10, CuF<5-10	D60	d60	<	8	10
Grisin	1955	Suelos Unif. Granul Paral	Df	db	<	8	10
Zweck y Davidenkoff 1	1956	Arenas Unif	D50	d50	<	5	10
Zweck y Davidenkoff 2	1956	Arenas Finas	D50	d50	<	5	16
Zweck y Davidenkoff 3	1956	Filtro WG	D50	d50	<	5	25
Istomina 1	1957	Arenas y Gravas CuF=1	D50	d50	<		13
Istomina 2	1957	Arenas y Gravas CuF=10	D50	d50	<		46
Moskva Channel Criteria	1957	CuB<5, CuF<5	D10	d60	<		5
Pravednyj	1959	Suelos finos sufusivos					
USBOR 1	1960	Graduado, arenas finas y limos CuB>4	D50	d50	<	12	58
USBOR 2	1960	Graduado, arenas finas y limos CuB>4	D15	d15	<	12	40
USBOR 3	1960	Suelo Grano Grueso.Base Unif. Arena Fina. CuB=3-4. Gran Paral	D50	d50	<		5
USBOR 4	1960	Suelo Grano Fino.Base Unif. Arena Fina. CuB=3-4. Gran Paral	D50	d50	<		10
USBOR 5	1960	Base Graduada. CuB>4	D50	d50	<	9	30
USBOR 6	1960	Base Graduada. CuB>4	D15	d15	<	6	18
Kawakami y Esashi	1961						
Quasi	1961	Filtros para drenes..... S= Desv. Estand. del filtro	D50	d50	<		S
Des Bouvrie	1962	Filtros para drenes..... S= Desv. Estand. del filtro	D50	d50	<		S
Hydroprojekt (Lubockov)	1963	CuB<10..... A=9+0,9*(CuB-1)	D50	d50	<		A
Vniig (Lubockov)	1963						
Cistin	1964	Suelo Base:::Arena Fina:di=d40;Arena Media y Gruesa:di=30;Ar.Grue	diF	diB	<		(7 a 8)*di
Pavcic	1964	Suel Suffusivos. nF=Porosid Filtro. A=3*((1-nF)/nF)*1/CuF^(1/6)	D17	d10	<		A
Geisler	1966	Arena Unif. Y Grad...Re=Reynolds, v=pore velocity, V=viscosidad	D50	d50	<		¿?
Cistin	1967						
Davidenkoff	1967	BasAreUnif. Fil Unif..K=4 si d50B=1,5mm;K=19 si d50B=0,1mm	D50	d50	=		K
Moskva Channel Criteria	1967	Cu=CuF=CuB<=5	D50	d50	<		5*Cu
Ziems	1968	CuB<20, CuF<18	D50	d50	=		f(Cu)
Belyashevskii	1972	D50F/d50B<=2,4*CuF+8	D50	d50	<		5,9*CuF
Thanikachalam	1974	CuB<20, CuF<32	D10	d10	=		f(Cu)

Tabla 2 .- Criterios de diseño de filtros granulares anteriores a 1980

2.8.3 Criterios posteriores a 1980

2.8.3.1 *Vaughan y Soares (1982)*

Como ya se ha comentado al hablar de la permeabilidad del filtro, Vaughan y Soares (1982) proponen el diseño de un “filtro perfecto” capaz de retener los flóculos del suelo base para lo cual debe tener la siguiente permeabilidad:

$$k_F = 6.1 \times 10^{-6} \times \delta^{1.42} \quad \text{Ecuación 55}$$

o bien:

$$k_F = 6.7 \times 10^{-6} \times d_{85B}^{1.52} \quad \text{Ecuación 56}$$

donde: k es la *permeabilidad* del filtro (m/s), δ el *tamaño de flóculo* del suelo base (μm) y d_{85B} está también expresado en μm .

A pesar de la claridad del concepto del “filtro perfecto” se creó una interesante discusión publicada en 1982 en el Journal of Geotechnical Engineering de la ASCE de la cual se resumen a continuación algunas opiniones:

Kenney opina que si bien inicialmente su opinión era totalmente contraria, poco a poco se ha vuelto más abierto a la idea. Por ello dice algunas cosas a favor y otras en contra:

- la postura de Vaughan y Soares es inicialmente radical porque supone que las presas construidas hasta ahora están mal hechas... pero cómo se puede realmente saber cuales de ellas han tenido que luchar contra la erosión interna
- parece improbable que con las bajas velocidades de flujo el agua sea capaz de “desintegrar” las partículas hasta el tamaño flóculo... pero existen evidencias geológicas de que esto ha ocurrido en Canadá, luego por qué no va a poder ocurrir en una presa

Por otra parte, **Ripley** critica en primer lugar la peligrosidad de dar la sensación de que la técnica presística ha estado equivocada hasta ahora cuando se ha confirmado la capacidad de filtros de arenas lavadas sin cohesión para detener la migración de finos incluso en presas fisuradas. Además señala que el añadir de 5 a 15% de finos al filtro para reducir la permeabilidad es muy peligroso porque puede generar cohesión.

Más bien considera que el problema de la segregación durante la construcción de la presa puede ser la causa de algunos fallos, sin haberse encontrado ningún caso en que un filtro de arena lavada sin cohesión halla fallado habiendo tenido el cuidado necesario para evitar la segregación de los materiales durante la construcción

Sherard opina que el concepto de “*filtro perfecto*” es excesivamente conservador y que parece claro que la erosión interna de Balderhead fue causada por fracturación hidráulica. También está de acuerdo en que la permeabilidad del filtro es mejor medida de su capacidad como tal más que el D_{15F} , sobre todo para bases impermeables. Pero señala que existe bastante experiencia de presas que han funcionado sin tener “filtros perfectos”.

Además, Sherard hace las siguientes observaciones:

- describe el mecanismo de sellado diciendo que se van formando tapices en la interfase que provocan un aumento del gradiente hidráulico hasta que se destruye produciéndose nueva circulación, arrastre y nuevo tapiz y así sucesivamente esto sirve para justificar el por qué de emplear gradientes hidráulicos tan grandes en el NEF
- las partículas arrastradas por el agua son del tamaño de limos (30-70 micras) y no flóculos
- los ensayos de laboratorio con muestra de arcilla con un orificio sí son válidos y sus resultados no dependen de la velocidad del flujo

- con un D_{15F} de 0.4 mm se puede retener casi cualquier arcilla por fina que sea, teniendo ese filtro una permeabilidad de 0.1 cm/s

Finalmente destaca las siguientes conclusiones :

- La experiencia en Balderhead no supone la necesidad de un filtro perfecto
- para núcleos ampliamente graduados basta con un $D_{15F} = 0.5$ mm
- los ensayos de laboratorio confirman que con $D_{15F} = 0.5$ mm es válido para arcillas de grano fino
- puesto que lo que se arrastra es del tamaño limos, no es preciso un filtro perfecto para retener flóculos de 10-20 micras

En cuanto a **Truscott**, ha realizado un ensayo a gran escala con tamaños de hasta 75 cm y con una fisura de 15mm y los resultados concuerdan sensiblemente con los de Vaughan y Soares, pero considera que la plasticidad sí influye en el tamaño del flóculo

Wilson y **Melvill** consideran que Balderhead es un caso excepcional ya que la arena fina es suficiente para retener la mayoría de las arcillas, siendo el único problema son las arcillas dispersivas. Además no están de acuerdo con Vaughan y Soares en que los ensayos con permeámetros y orificios en muestras de arcilla no son válidos.

Como era de esperar, **Vaughan** y **Soares** contestan resaltando el general acuerdo sobre la relación entre la permeabilidad del filtro y el tamaño de las partículas retenidas, pero consideran que el concepto de *filtro perfecto* es aplicable a suelos internamente inestables. Por otra parte mantienen que el mecanismo de erosión interna es tan complejo que no se puede representar en el laboratorio con ensayos sencillos y que el criterio de filtro perfecto es sólo un poco más conservativo que el típico de $D_{15F}=0.4$ mm, por lo que es el proyectista el que debe decidir si aplica este criterio y en qué medida.

Más recientemente, en sus clases en el Imperial College de Londres (1995), **Vaughan** señala que no todas las interfases requieren una protección completa con filtros y que el fallo es a menudo una inestabilidad local debida a una combinación de circunstancias desfavorables. Este tipo de fallo no se puede modelizar mediante ensayos simplificados de laboratorio y por lo tanto el ensayo de filtros sin erosión (NEF) de Sherard y Dunningan (1985), si bien es generalmente aceptado, no cumple las leyes de escala, es un caso especial cuyos resultados no pueden ser generalizados e impide especialmente la segregación.

2.8.3.2 Arulanandan y Perry (1983)

Tras el estudio de la erosionabilidad de suelos empleados como núcleos de presas de materiales sueltos, recomiendan el siguiente procedimiento:

1. Asumiendo que el núcleo de la presa va a fisurarse, determinar la erosionabilidad del suelo base calculando la *tensión crítica* (τ_c) en la superficie de la fisura
2. Empleando distintas granulometrías de filtro, examinar la retención en el filtro del material erosionado y la variación de la permeabilidad
3. Determinar el *potencial de fisuración* del filtro mediante el sencillo ensayo del “castillo de arena” propuesto por Vaughan (1982)
4. Seleccionar el material que satisfaga las siguientes condiciones: (i) posee la granulometría precisa para impedir el paso de partículas del suelo base, (ii) posee las características precisas para que no se produzca fisuración del filtro

2.8.3.3 Sherard y Dunningan (1985)

Partiendo de los resultados de todos sus ensayos, Sherard y Dunningan (1985) dan unas recomendaciones concretas para el proyecto de filtros para prácticamente todas las bases.

Dividen los suelos bases en cuatro grupos, según el porcentaje de finos, de la muestra original o ajustada (menor de 4,75 mm.), que pasa por el tamiz 200:

Grupo I: Limos finos y arcillas.

Para limos finos y arcillas que tengan más de un 85% en peso de partículas que pasen por el tamiz 200, recomienda Sherard un D_{15F} de proyecto

$$D_{15F} \leq 9.d_{85B} \quad \text{Ecuación 57}$$

con la limitación de que si D_{15F} sale menor de 0.2 mm, se use esta última cifra.

Grupo 2: Limos y arcillas arenosas y arenas arcillosas y limosas.

Para suelos impermeables arenosos (o con grava) con un 40 a 85% en peso (de la fracción más fina que el tamiz nº 4) de partículas más finas que el tamiz 200, el filtro de proyecto debe ser igual o menor de 0.7 mm. Para esto suelos la influencia de las partículas finas domina el ensayo y los resultados no están afectados por la existencia de las partículas de arena.

Este criterio ha cambiado sensiblemente desde las recomendaciones que hizo el mismo Sherard anteriormente. Con los ensayos de 1982 aparecía como conservador para suelos con d_{85B} comprendido entre 0.1 y 0.5 mm. el criterio de $D_{15F} \leq 5.d_{85B}$. El uso del ensayo sin erosión ha demostrado que es conveniente en estos suelos no pasar de $D_{15F} = 0.7$ mm. puesto que para que se sellen filtros más gruesos con estos suelos es necesaria una erosión excesivamente grande.

Grupo 3: Arenas y gravas arenosas con pequeño contenido de finos.

Para arenas y gravas arcillosas y limosas con un 15% o menos en peso (de la fracción que pasa por el tamiz nº 4) menor del 200, el tamaño de filtro de proyecto debe ser

$$D_{15F} \leq 4.d_{85B} \quad \text{Ecuación 58}$$

donde d_{85B} corresponde al tamaño del 85% del material incluidas las gravas. Para suelos de esta categoría se han ensayado filtros hasta de $D_{15F}=30$ mm. y creía Sherard que la regla es válida para combinaciones base-filtro aún mayores.

Grupo 4: Suelos intermedios.

Para suelos gruesos impermeables intermedios entre los grupos 2 y 3, con un 15 a 40% pasando por el tamiz 200, el filtro de proyecto debe ser inversamente proporcional al contenido de finos y puede calcularse por interpolación lineal:

$$D_{15F} \leq \frac{40-p}{40-15} (4 \cdot d_{85B} - 0.7)$$

Ecuación 59

siendo - p - el porcentaje que pasa por el tamiz 200. (Si $4 \times d_{85B} < 0,7$ mm. usar 0,7mm.)

En la figura siguiente se puede ver la forma de determinar el D_{15F} para suelos del grupo 4:

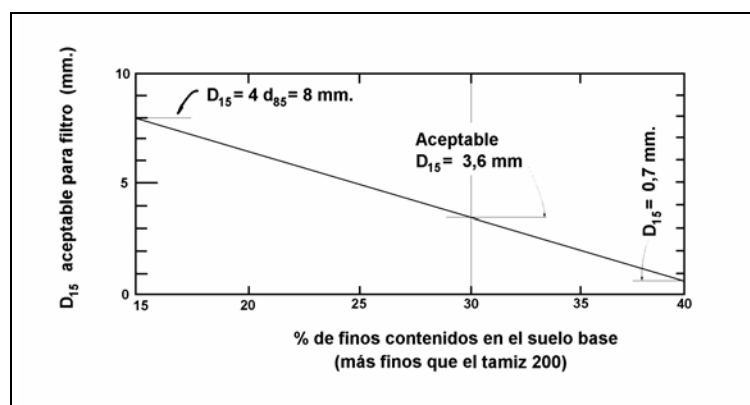


Figura 22.- Diseño del filtro para bases del grupo 4 (Sherard y Dunningan 1985)

Los criterios de diseño de Sherard et al. (1985) se resumen en el siguiente gráfico (Bravo 1995):

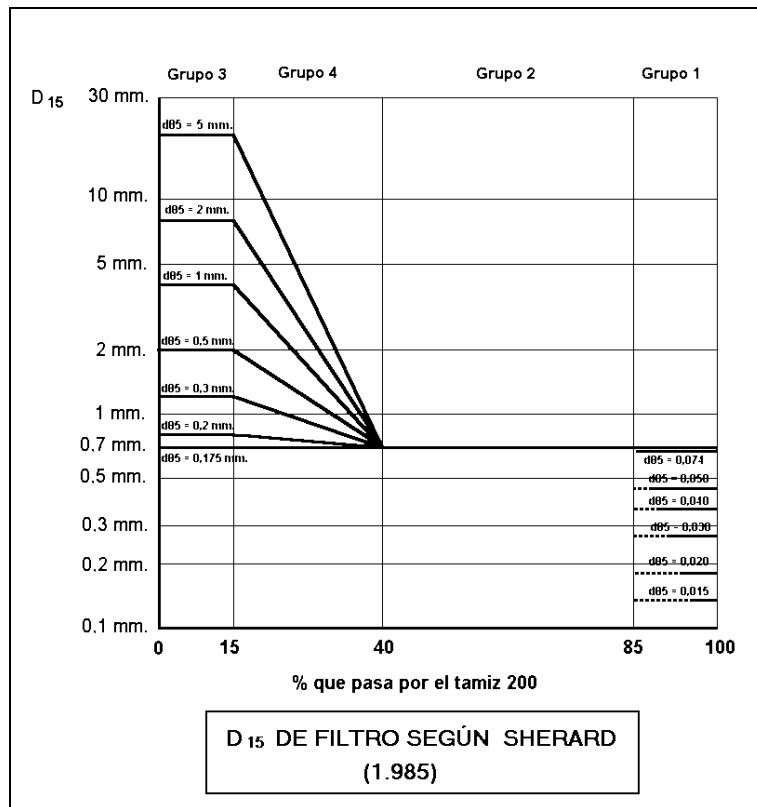


Figura 23.- Resumen de los criterios de Sherard y Dunningan (1985)

2.8.3.4 *Lafleur et al (1989)*

Lafleur et al (1989) después de experimentar sobre una serie de suelos no cohesivos de la Bahía de James, usando ensayos de tamices (bases contra tamices) y ensayos de compatibilidad (bases contra filtros) analizaron la influencia de varios parámetros sobre la filtración y su aplicabilidad sobre el proyecto de filtros. Encontraron que el criterio usual de filtración no puede usarse en suelos ampliamente graduados; que el uso del diámetro de poro correspondiente a la fracción más fina del suelo no era práctico y que el uso del d_{85} como indicador del tamaño de la base podía conducir a grandes pérdidas de suelo. Los ensayos indicaron que alguna migración de partículas sí era necesaria para establecer un estado de equilibrio en la interfase base/filtro.

Como resultado de sus ensayos de laboratorio, concluían:

"La selección de filtros granulares, para suelos ampliamente graduados, debe tener en cuenta el proceso de autofiltración que tiene lugar en la interfase base/filtro. No es práctico escoger, como diámetro de poro del filtro, el correspondiente a las partículas más finas, ni es adecuado usar el diámetro d_{85} como límite superior del suelo base, pues la cantidad de partículas arrastrada por el agua será grande.

El programa del ensayo de compatibilidad ha demostrado que el diámetro de poro del filtro debe compararse con un tamaño indicativo de la base, que suponga una mínima migración de partículas. Para suelo de **granulometría amplia y lineal**, el valor del tamaño mínimo indicativo de la base es el d_{50} , que conduce a un equilibrio del proceso de filtración en la interfase. Se ha encontrado también que para las **granulometrías discontinuas**, el diámetro característico de las partículas de la base capaces de iniciar el proceso de autofiltración, d_{sf} , debe corresponder a la fracción menor de la discontinuidad, puesto que la fracción mayor no interviene en el proceso de autofiltración."

Y proponen el siguiente esquema de decisión:

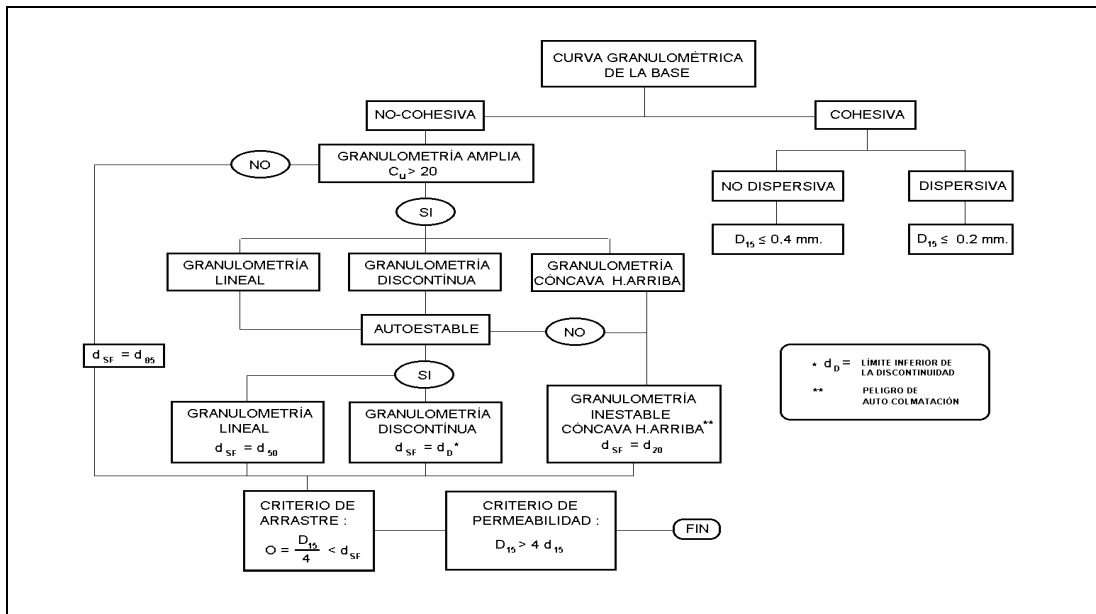


Figura 24.- Diseño de filtros según Lafleur et al (1989)

El Prof. *Jean Lafleur* sugiere en la Fig.24 un esquema de la secuencia que, según él, es necesario seguir para el proyecto de filtros granulares. El dato básico es la curva granulométrica de la base. El esquema separa en primer lugar los materiales susceptibles de fisurarse de los materiales sin cohesión. Considerando éstos últimos, el primer paso sería determinar si su curva granulométrica es bastante extendida ($C_u > 20$). Si no lo es, el *diámetro de autofiltración* d_{sf} es igual a d_{85} , de acuerdo con el criterio tradicional de *Terzaghi*. Si es extendida, su curva granulométrica pertenece a uno de estos tres grupos:

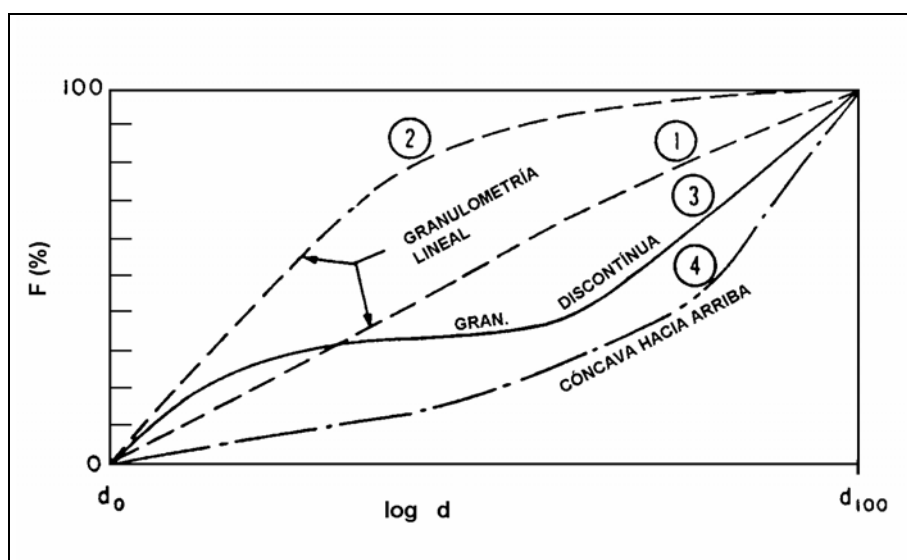


Figura 25.- Clasificación de curvas granulométricas de suelos muy ampliamente graduados, Lafleur et al (1989 y 1992)

- 1).- En un suelo de curva lineal, d_{sf} sería igual al diámetro medio d_{50} .
- 2).- Con una granulometría discontinua, d_{sf} correspondería al tamaño inferior a la discontinuidad.
- 3).- Con una curva granulométrica con concavidad hacia arriba, d_{sf} sería igual a d_{20} ; debe tenerse en cuenta entonces, el peligro de colmatación del filtro, pues la zona adyacente a él puede ser menos permeable que el suelo base.

El tamaño de autofiltración se compara pues, al tamaño de apertura permisible de un filtro,

$$O_f = \frac{D_{15}}{4} \quad \text{Ecuación 60}$$

en relación con el criterio de filtración. Finalmente comprueba que el criterio usual de permeabilidad de comparar el d_{15B} de la base con el D_{15F} del suelo es conforme.

Más recientemente, en 1992, Lafleur et al proponen un criterio para suelos no cohesivos bien gradados en el que el esquema de decisión establece la separación para un valor del coeficiente de uniformidad del suelo igual a 6, de forma que el diámetro de comparación del suelo base, que denomina d_I es:

$$d_I = 85, \text{ si } Cu_B \leq 6$$

$$d_I = 50 \text{ si } Cu_B \geq 6 \text{ y es internamente estable y de granulometría lineal}$$

si además de estable, la granulometría es discontinua, emplea el menor tamaño de la discontinuidad

$$d_I = 30 \text{ si } Cu_B \geq 6 \text{ y es internamente inestable con granulometría cóncava}$$

En todos los casos exige dos criterios:

$$\text{Retención:} \quad D_{15F} / 5 < d_I$$

$$\text{Permeabilidad:} \quad D_{15F} < 5 d_{15B} \quad ; \quad k_F < 20 k_B$$

2.8.3.5 Honjo y Veneciano (1989)

Han realizado un doble estudio: por un lado desarrollan un modelo físico para entender el fenómeno de la erosión-interceptación en la interfase base-filtro y por otro lado analizan los resultados de 287 experimentos realizados por otros autores,

sometiéndolos a un completo análisis estadístico para determinar las variables granulométricas del filtro y la base que mejor predicen su comportamiento.

Este estudio es válido en el caso de suelos no cohesivos con $d_{95B}/d_{75B} < 7$.

Las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- el ratio D_{15F}/d_{85B} es el que mejor predice el comportamiento del sistema base-filtro, además tiene una clara interpretación física ya que el D_{15F} es representativo del tamaño de los poros del filtro y el d_{85B} es un tamaño del suelo base tal que si el filtro retiene las partículas de este tamaño, la base completa se estabiliza por la formación del fenómeno de autosellado
- el ratio d_{95B}/d_{75B} , denominado “índice de autosellado”, es menos importante pero aun es un parámetro significativo. Este ratio está relacionado con la capacidad del suelo base de formar una capa de autosellado satisfactoriamente. El criterio convencional $D_{15F}/d_{85B} < 4$ ó 5 , está basado en experimentos que emplean bases relativamente uniformes y no es seguro cuando el suelo base tiene una fracción gruesa ampliamente graduada
- Propone el siguiente criterio:

$$(D_{15F}/d_{85B}) \leq 5.5 - 0.5*(d_{95B}/d_{75B}) \quad \text{para } d_{95B}/d_{75B} \leq 7$$

Ecuación 61

- Este criterio proporciona una seguridad uniforme, (probabilidad de fallo de 0.1), para un amplio rango de bases
- El uso del ratio D_{50F}/d_{50B} no puede ser justificado ni por el estudio estadístico ni por el experimental. Tampoco se sostiene el tradicional criterio de que “la curva granulométrica del filtro debe ser aproximadamente paralela a la del suelo base”

2.8.3.6 *Brauns (1991)*

Aunque en este artículo no propone ningún criterio de diseño en concreto, hace un interesante repaso a los criterios ya existentes obteniendo la conclusión de que es imposible hacer una comparación directa cuantitativa de los criterios de distintos autores por las siguientes razones:

- cada autor ha definido de diferente manera las condiciones de “fracaso”
- se han escogido diferentes diámetros de comparación, (D_{15F} , d_{50B} , d_{85B} , etc.)
- algunos autores han introducido en sus criterios coeficientes de seguridad, mientras que otros se sitúan en estados límite
- algunos autores han realizado ensayos en laboratorio mientras que otros han realizado análisis teóricos

Brauns (1991) comenta el resultado de Witt (1986) según el cual es posible establecer una equivalencia entre el resultado de Vaughan y Soares (1982) y Shrerard et al. (1985) de forma que si Sherard propone un ratio $D_{15F}/d_{85B} < 9$, el de Vaughan supone una continuación pero con ratio variable que oscila entre 11, para $d_{85B}=0.05$ y 17 para $d_{85B}=0.006$, (aproximadamente).

Esta observación es muy interesante porque todos los autores proponen ratios constantes o variables pero en escalones, cuando posiblemente se podría pensar en ratios variables.

Con carácter general, Brauns (1991) hace las siguientes observaciones:

1.- el filtro debe tener un gradación y espesor tales que no pueda aparecer una migración continua de las partículas del suelo base, (este se puede denominar el *criterio de estabilidad*)

2.- cumplido el criterio nº1, la cantidad de suelo base perdido debe ser tolerable con respecto a la zona donde se encuentre y el riesgo de sifonamiento existente. Este se llama el *criterio de sifonamiento*.

3.- Cumplidos los criterios 1 y 2, la profundidad de la penetración de las partículas de suelo base en el filtro debe ser tolerable con respecto al propósito del filtro, por ejemplo, la profundidad de infiltración en el filtro no debe ser tanta que la reducción de la permeabilidad del filtro comprometa su comportamiento como dren.

2.8.3.7 *Schuler y Brauns (1992)*

No hacen una propuesta concreta de diseño, pero realizan un interesante repaso de los distintos criterios de filtración, distinguiendo entre los criterios basados en **características teóricas de empaquetamiento**, los **criterios empíricos** y los **criterios derivados de estudios probabilísticos**.

- Sobre los criterios basados en **características teóricas de empaquetamiento** señalan el inconveniente de la excesiva simplicidad del modelo.
- Sobre los **criterios empíricos** destacan que se han desarrollado en la mayoría de los casos para suelos uniformes de grano fino, teniendo el problema de que cada autor emplea unas condiciones de flujo diferentes y además el criterio entre éxito o fracaso puede ir desde exigir una erosión nula hasta admitir que el filtro sea capaz al cabo de un cierto tiempo de controlar la erosión. Por esta razón estos criterios son difícilmente comparables y sería conveniente calcular el coeficiente de seguridad que encierra cada uno de ellos.
- En cuanto a los **criterios** derivados de aproximaciones **probabilísticas**, en las cuales se tiene en cuenta la naturaleza estocástica de las masas granulares, los investigadores han tratado de emplear modelos fenomenológicos y probabilísticos del proceso de filtración. Todos coinciden en la importancia del espesor del filtro y algunos señalan que no influye el Cu_F .

Del repaso de los criterios anteriores, Schuler y Brauns (1992) obtienen las siguientes conclusiones:

1. En cualquier caso, el tamaño de apertura del filtro está controlado por la fracción más fina del mismo
2. Si el material de suelo base es autoestable, es suficiente retener la parte más gruesa del mismo por el filtro
3. Para activar al filtro es imprescindible un cierto movimiento de partículas del suelo base
4. Aumentando el espesor del filtro, el tamaño de apertura del filtro se puede caracterizar con un valor característico
5. Ya que es precisa un cierto movimiento de las partículas de suelo base, el espesor de las capas de filtro y las dimensiones geométricas de las zonas con material de base juegan un papel importante en las relaciones de seguridad en filtración.

2.8.3.8 Okita y Nishigaki (1992)

Han ensayado filtros granulares y bases también granulares, formadas por arena silícea.

Lo novedoso de su investigación es el empleo de rayos γ para registrar la variación de la densidad seca del filtro conforme se produce la entrada de partículas del suelo base. Han obtenido los siguientes resultados:

- | | | |
|----|----------------------------------|--|
| Si | $D_{15F}/d_{85B} \leq 7$ | ninguna erosión |
| Si | $7 \leq D_{15F}/d_{85B} \leq 10$ | alguna erosión pero con autofiltración |
| Si | $10 \leq D_{15F}/d_{85B}$ | erosión importante |

2.8.3.9 *Indraratna et al. (1996)*

Obtienen las siguientes conclusiones:

δ_{85B} (45 a 60 μm)	D_{15F}/δ_{85B} 5.5 a 5
δ_{85B} (60 a 90 μm)	D_{15F}/δ_{85B} 5 a 4

Tabla 3.- Criterio de Indraratna et al (1996)

Por lo tanto, al igual que Sherard et al (1985), proponen una ratio variable en función del tamaño de las partículas del suelo base.

También han obtenido una relación del tipo empleado por Vaughan y Soares (1982), aunque con distintos coeficientes:

$$k_{FL} = 6.5 \times 10^{-4} \delta_{85B}^{1.25} \quad k_{FL} \text{ (cm/s), } \delta_{85B} \text{ (\mu m)}$$

Ecuación 62

2.8.3.10 *Yamaguchi et al. (1996)*

Los criterios empleados actualmente en el diseño de filtros para presas de materiales sueltos en Japón son los siguientes:

1. $D_{15F} > 5 d_{15B}$
2. $D_{15F} < 5 d_{85B}$
3. La curva granulométrica del filtro debe tener aproximadamente la misma forma que la del suelo base
4. Donde el suelo base tenga un alto porcentaje de gravas, el filtro debe ser diseñado basado en la curva granulométrica del suelo base inferior a 25.4 mm

5. Los filtros deben de contener menos de un 5% de finos (tamaño menor del tamiz 0.075mm)

Pero reconocen que estos criterios son conservadores, incluso demasiado para suelos base arcillosos o suelos gruesos con alto contenido de finos arcillosos que tienen una resistencia inherente al sifonamiento gracias a su cohesión, por lo que en estos casos se adoptan criterios menos estrictos.

2.8.3.11 Fischer y Holtz (1996)

Tras el estudio de 158 ensayos de 9 investigadores diferentes han encontrado correlaciones razonables entre D_{15F}/d_{15B} y D_{15F}/d_{85B} frente al Cu_B , de forma que al aumentar el Cu_B , la ratio D_{15F}/d_{15B} disminuye, mientras que la ratio D_{15F}/d_{85B} aumenta, sin embargo consideran que este resultado no es lógico ya que si el d_{85B} es adecuado, éste no cambia con el Cu_B .

La novedad del estudio realizado es que concluyen que la ratio D_{15F}/d_{75B} es la que mejor define el funcionamiento del sistema base – filtro.

2.8.3.12 Vaid y Tomlinson (1996)

Ensayando bases y filtros fabricados con partículas esféricas han verificado las recomendaciones de Sherard et al (1984) obteniendo que para ratios $D_{15F}/d_{85B} < 8$, no se produce sifonamiento, mientras que si la ratio es mayor de 12, el sifonamiento se produce de forma espontánea.

2.8.3.13 Giroud (1996)

Propone un criterio de retención y otro de permeabilidad.

Criterio de retención:

Para el caso de suelos no cohesivos internamente autoestables, Giroud (1996) propone que el tamaño de la apertura de filtración sea menor que el d_{85B} del suelo base, es decir:

$$O_F < d_{85B} \quad \text{Ecuación 63}$$

Para poder emplear directamente el D_{15F} , Giroud (1996) propone una ratio variable que depende del coeficiente de uniformidad del filtro y el de la base, que oscila entre $D_{15F}/d_{85B} = 5.8$, para un $C_{uB}=5$ y $D_{15F}/d_{85B} = 10$ si $C_{uB}=1$.

Criterio de permeabilidad:

Giroud (1996) ratifica el clásico criterio de permeabilidad según el cual se debe cumplir:

$$D_{15F} < 5 d_{15B} \quad \text{Ecuación 64}$$

2.8.3.14 Fujisawa et al. (1997)

Obtienen los siguientes resultados:

Bases $d_{100B} = 0.074 \text{ mm}$	$D_{15F} / d_{85B} \leq 5.1 \text{ a } 7.6$
Bases $d_{100B} = 2 \text{ mm}$	$D_{15F} \leq 0.38 \text{ mm}$

Tabla 4.- Criterio de Fujisawa et al (1997)

2.8.3.15 Foster y Fell (1999)

Distinguen dos condiciones, el *criterio de no erosión*, que es asimilable al del ensayo NEF de Sherard y Dunningan (1985) y el *criterio de erosión continua*, menos restrictivo ya que permite cierta erosión siempre que se alcance un equilibrio.

Criterio de no erosión:

(El filtro es capaz de impedir cualquier tipo de erosión en la base)

Grupo del suelo base	% < 0.074 mm	Rango de D_{15FL} Mm	D_{15FL} propuesto Mm
1	≥ 85	$(6.4 - 13.5) d_{85B}$	$D_{15F} \leq 9 D_{85B}$
2	35 - 85	0.7 - 1.7	$D_{15F} \leq 0.7 \text{ mm}$
3	< 15	$(6.8 - 10) d_{85B}$	$D_{15F} \leq 7 d_{85B}$
4	15 - 35	$(1.6 - 2.5) * D_{15} \text{ Sherard}$	$D_{15F} \leq 1.6 D_{15Fd}$

Tabla 5.- Criterio de no erosión (Foster y Fell 1999)

Criterio de erosión continua:

(Se admite cierta erosión de la base siempre que al final se selle el filtro)

Suelo Base	Criterio
$d_{95B} < 2 \text{ mm}$	$D_{15F} \leq 9 d_{95B}$
$d_{95B} > 2 \text{ mm}$	$D_{15F} > 2.5 D_{15Fd}$

Tabla 6.- Criterio de erosión continua (Foster y Fell 1999)

Donde:

$$D_{15Fd} = \frac{(36 - \% < 0.075mm) \cdot (4 \cdot d_{85B} - 0.7)}{20 + 0.7}$$

Ecuación 65

Como se puede ver, el criterio de erosión continua es mucho menos exigente que el de no erosión, por lo que consideran demostrado que filtros mucho más gruesos que los propuestos por Sherard et al. (1989) son capaces de sellar fugas localizadas. Esto da una tranquilidad respecto a presas antiguas que no emplearon estos criterios. Sin embargo, resaltan expresamente que eso no quiere decir que en presas nuevas se

pueda relajar el cuidado con los filtros, ya que en este caso es aconsejable ser muy exigentes.

2.8.3.16 *Locke e Indraratna (2000)*

Confirman la validez de las recomendaciones de Sherard et al. (1989) aunque observan una buena relación entre el D_{15F} y el $d_{85BERdisp}$ (d_{85} de las partículas de suelo base erosionadas, calculado después de la dispersión) de la forma:

$$D_{15F} < 5 d_{85BERdisp} \quad \text{Ecuación 66}$$

Sin embargo, llaman la atención sobre el hecho de que en dos de las muestras ensayadas, en las que $d_{98}/d_{85} < 2.5$, no se cumple esa relación al tratarse de bases muy uniformes, tal y como Sherard y Dunningan advirtieron.

2.9 Limitaciones del estado actual de la técnica

Como se ha podido observar en los apartados anteriores, en los últimos años se ha realizado un enorme esfuerzo investigador para tratar de profundizar en el fenómeno de la erosión interna así como para poder diseñar adecuadamente los filtros necesarios para proteger a las bases cohesivas.

El **mecanismo de la erosión interna** se conoce bastante bien, así como los mecanismos de erosión y transporte de partículas de **suelos no cohesivos**, sin embargo aun hoy no hay un modelo unificado y de sencilla aplicación para el caso de los **suelos cohesivos**.

Respecto a la **fracturación hidráulica** hay que decir que todavía quedan algunos aspectos no explicados correctamente, así por ejemplo la teoría de Bravo (1999) sobre las vías preferenciales de filtración abriría un nuevo campo de estudio si se pudieran verificar in situ sus hipótesis.

En lo que se refiere a la **interacción entre el suelo base y el filtro** en una situación de erosión interna, parece claro que la **modelización mediante ensayos de laboratorio** ha dado resultados aceptables que permiten diseñar filtros adecuados como se refleja en el escaso número de incidentes debidos a la erosión interna ocurridos en las presas o sus cimientos con filtros adecuadamente diseñados. Sin embargo esto se ha conseguido a costa de renunciar en cierta medida a un conocimiento más profundo del fenómeno.

Ha quedado claro también la gran diversidad de **métodos de ensayo** disponibles que indican el hecho de que aun no se ha conseguido uno que sea completamente satisfactorio. Por ello sería recomendable unificar y normalizar un único ensayo y tratar de estudiar a fondo la influencia de todas las variables que intervienen en el fenómeno de la erosión interna.

En lo que respecta a la **modelización numérica**, hay que decir que efectivamente éste es el mejor camino para profundizar en el conocimiento científico, sin embargo aun hoy está muy limitado y sigue precisando de comprobación con ensayos de laboratorio. Otro aspecto fundamental es que los métodos numéricos no son capaces todavía de resolver el estudio de las bases cohesivas.

También es importante resaltar en este capítulo los temas que quedan sin aclarar respecto a las variables que influyen en el funcionamiento del sistema base-filtro.

Aunque la mayoría de los investigadores coinciden en emplear únicamente como variable de comparación la **granulometría**, representada por el D_{15F} y el d_{85B} , está claro que es insuficiente en muchos casos:

- además del D_{15F} se debe considerar la **porosidad**, la **forma de la curva granulométrica**, la **fracción fina** y la **permeabilidad del filtro**
- además del d_{85B} se pueden emplear **otros diámetros de comparación** y considerar otras variables que influyen en la erosionabilidad como la **mineralogía**, la **plasticidad**, la **humedad** e incluso el empleo de **aditivos**

Por ejemplo, Sherard y Dunningan (1985) afirman que con **gradientes hidráulicos** elevados, todas las arcillas se comportan igual, sean o no **dispersivas**, y que la **plasticidad, mineralogía y resistencia a la erosión** no tienen ninguna influencia, sin embargo, ¿cómo se puede explicar entonces que el contenido de sales del agua afecte al resultado de los ensayos?

Si el empleo de aditivos al suelo base modificaran el diseño del filtro necesario, quedaría en evidencia que tales afirmaciones pueden ser cuestionadas.

Algo similar sucede con las **condiciones de flujo**, no existe un acuerdo unánime sobre su influencia, por lo que es muy importante estudiarla más detenidamente.

En cuanto a la **ratio D_{15FL} / d_{85B}** , todos los autores dan valores diferentes según la forma de la curva granulométrica o el porcentaje de finos del suelo base, pero ¿por qué necesariamente hay que buscar la relación en forma de cociente?, ¿no es posible encontrar una relación del tipo potencial, por ejemplo, en vez de una lineal quebrada?

También casi todos los autores admiten que la **permeabilidad del filtro** es una variable fundamental, incluso más importante que la granulometría, ¿por qué a continuación casi todos vuelven a proponer relaciones con el D_{15F} , sin mencionar ni la porosidad ni la pendiente de la curva granulométrica?

Es lógico que siempre se trate de buscar expresiones muy sencillas y de hecho, cuando algún autor ha propuesto algún método de diseño de filtros más complejo suele ser casi “ignorado” por los demás, pero quizás un tema de tal importancia como el diseño de filtros, por las consecuencias sobre la seguridad y también la economía de una presa, no pueda ser reducido a expresiones simples.

Quedan por tanto muchos interrogantes por contestar y además relativos a cuestiones de enorme importancia que justifican el interés por continuar investigando en el caso concreto de los filtros granulares para bases cohesivas.

2.10 Conclusiones (título de la Tesis Doctoral)

Dada la complejidad del fenómeno de la erosión interna, es preciso realizar algunas simplificaciones en su estudio, tratando de abordarlo desde dos perspectivas que se complementan perfectamente: la modelización mediante ensayos de laboratorio y la modelización numérica. No se puede decir que una vía sea mejor que la otra, ya que ambas tienen sus ventajas e inconvenientes, así como sus limitaciones.

El empleo de **métodos numéricos** para el estudio de la erosión interna en presas de materiales sueltos está experimentando un fuerte auge en los últimos años. La mayoría de ellos, a partir de las curvas granulométricas del filtro y del suelo base, tratan de obtener la distribución de poros y canales por donde las partículas de suelo base pueden ser arrastradas. A partir de ahí, se lleva a cabo una comparación estadística entre el tamaño de partícula del suelo base y el del poro del filtro.

Entre las **ventajas** de este método se puede destacar que los métodos numéricos son la única manera de estudiar la erosión interna empleando leyes científicas de validez universal, además permiten conocer lo que ocurre en el interior de la interfase base-filtro, algo muy complicado en la experimentación directa. Por otra parte, dada la creciente capacidad de los ordenadores, es previsible un enorme desarrollo y mayor precisión en los próximos años.

Sin embargo presentan algunos **inconvenientes** como su gran complejidad, que obliga a llevar a cabo simplificaciones que restan validez a sus resultados, además la mayoría sólo realiza comparaciones geométricas entre partículas y huecos, sin considerar las fuerzas de atracción entre partículas, ni la resistencia a la erosión y por ello no son válidos para suelos cohesivos, (actualmente se está investigando en Australia sobre este tema, pero aun no hay resultados) y tampoco suelen considerar la influencia de la compactación del filtro. Parece claro que pueden dar buenos resultados para bases no cohesivas de grano grueso, pero pierden precisión en el caso

de arcillas muy plásticas, en las que la forma de la partícula y la posible presentación en agregados no se tiene en cuenta.

También hay que destacar su difícil aplicación práctica en el diseño de filtros granulares ya que son muy complicados de manejar y todavía no tienen una presentación informática de fácil acceso a la mayoría de los interesados y además, por ahora, siguen precisando de la experimentación directa para comprobar el ajuste del modelo.

Por todas estas razones se puede **concluir** que los métodos numéricos representan el futuro del estudio de la erosión interna aunque sería interesante que cada autor de un modelo numérico ofreciese todo el proceso operativo o incluso implementara un programa informático para permitir que cualquier investigador o proyectista pueda comprobar su aplicabilidad al caso concreto. Por ello, actualmente son más interesantes desde el punto de vista del estudio del fenómeno que del diseño práctico de filtros.

La **modelización mediante ensayos de laboratorio** permite simular en el laboratorio el fenómeno de la erosión interna y comprobar si un determinado filtro granular es eficaz frente a una muestra de suelo base.

La experimentación directa puede ser muy útil en las distintas fases del proyecto, construcción y explotación de una presa de materiales sueltos, y por supuesto para la investigación. Según sea el objetivo de la experimentación, puede ser diferente el método de ensayo a seguir así como las exigencias del mismo:

- **En fase de diseño:**

Actualmente es frecuente que en la fase de proyecto de una presa, los filtros granulares se diseñen empleando exclusivamente reglas empíricas, a partir de los datos del estudio de materiales para el cuerpo de presa. Esto puede ser suficiente en aquellos casos en que se vaya a emplear un filtro granular procedente del procesamiento de áridos, ya que su curva granulométrica es perfectamente

controlable en el proceso de fabricación. Sin embargo hay que señalar que los filtros granulares procesados suelen tener un coste muy elevado, sobre todo si es preciso un lavado enérgico para cumplir las limitaciones al contenido de finos y si al exigir una curva granulométrica concreta se obliga a desechar ciertas fracciones obtenidas en la planta de procesamiento de áridos.

También en el caso de que sea posible emplear áridos naturales para la fabricación de filtros, bien directamente o con un ligero procesado, la experimentación directa queda plenamente justificada ya que por lo general las reglas empíricas, dado su margen de seguridad, pueden desechar el empleo de unos materiales que resulten plenamente satisfactorios tras los convenientes ensayos de filtros.

Por último, en el caso de que el suelo base de la presa tengan características especiales como dispersabilidad o elevada plasticidad, los ensayos de filtros resultan imprescindibles.

Como **conclusión** se puede decir que siempre es recomendable empezar el diseño de los filtros empleando reglas empíricas, para obtener una idea del problema, pero por lo general es preciso recurrir a la experimentación directa en la fase de proyecto, si bien no sería necesario realizar un programa de ensayos excesivamente amplio, sino que bastaría con seleccionar las muestras de material de base más conflictivas y comprobar el filtro necesario.

Comparando los resultados de estos ensayos con los de otros autores y reglas empíricas, se puede detectar si los filtros suponen un problema especial, que requiere mayor atención en esta fase, o si se pueden diseñar con las reglas empíricas y comprobarlos en fase de construcción, cuando las canteras se hayan fijado definitivamente.

- **En fase de Construcción:**

En esta fase la experimentación directa debería emplearse siempre, por distintas razones:

1. los ensayos suelen ser sencillos y no muy costosos
2. la experimentación directa permite adaptarse a las condiciones y suelos reales
3. proporciona una fuente de datos muy interesante para futuros trabajos
4. es imprescindible en casos especiales, como arcillas dispersivas o muy plásticas

▪ En **Investigación:**

Como ya se ha indicado anteriormente, a pesar de que los modelos numéricos representan una vía muy interesante para investigar el comportamiento de los filtros granulares, aun hoy es imprescindible acudir a la experimentación directa por ser el método más adecuado dada la complejidad de los suelos reales y porque siempre será precisa para comprobar la fiabilidad del modelo numérico. Es posible hacer unas breves *recomendaciones*:

- el método de ensayo debe ser muy versátil para que sea válido para distintos tipos de suelos y condiciones de ensayo.
- es conveniente disponer de piezómetros que permitan medir las condiciones del flujo a través de la pastilla de suelo base y el filtro.
- Okita y Nishigaki (1992) han empleado rayos gamma para tomar medidas de la variación de la densidad y humedad del filtro durante el ensayo. Gracias a estas medidas se puede conocer cómo se va produciendo el fenómeno de interceptación de partículas del suelo base dentro del filtro. Aunque compleja, esta es una herramienta muy útil para comparar los resultados de los modelos numéricos con el comportamiento real.

- Es muy interesante tomar muestras del agua de salida del ensayo y obtener la granulometría de los sólidos mediante rayos láser. De esta forma se puede conocer el tamaño real de las partículas que logran atravesar al filtro en función de las distintas variables.

En cuanto al empleo de los **criterios empíricos** a la hora de diseñar filtros granulares, con fines únicamente prácticos, (se excluye la investigación), se pueden hacer las siguientes consideraciones:

Tienen la **ventaja** de que la sencillez de estos criterios empíricos permite obtener un orden de magnitud del problema concreto y enmarcarlo dentro de unos límites, aunque generalmente sean en principio difusos. Además, algunos criterios empíricos han sido empleados en muchas presas de todo el mundo, obteniéndose resultados satisfactorios, por lo que quedan sancionados por la práctica.

En el caso de que los filtros en estudio cumplan sobradamente los criterios empíricos, puede no ser preciso emplear otro método, ya que estos criterios suelen incluir un cierto margen de seguridad.

Pero también tienen algunos **inconvenientes** importantes ya cada criterio ha sido obtenido empleando un determinado método de ensayo, así como diferentes muestras de suelo base y filtro, lo que reduce su campo de aplicación. Además, el criterio de “Éxito” adoptado por cada autor puede ser muy diferente, desde el muy riguroso de Sherard y Dunningan (1985) en el ensayo NEF, en el que se exige la ausencia total de erosión con gradientes hidráulicos muy elevados, hasta el de Maranhã Das Neves (1989) que emplea gradientes muy reducidos y permite cierta erosión siempre que se alcance un estado de equilibrio. Por ello es muy difícil comparar directamente criterios distintos.

A esto hay que añadir que hay muy pocos criterios específicos para bases cohesivas y tampoco se resuelven problemas como las arcillas dispersivas, muy plásticas o la necesidad de emplear filtros naturales que no cumplan estos criterios.

Por estas razones se pueden obtener las siguientes **conclusiones** sobre el empleo de criterios empíricos:

- Emplear siempre estos criterios en una fase previa
- Son suficientes en caso de que el filtro disponible cumpla sobradamente estos criterios y la base no presente problemas especiales
- Sería interesante que cada autor que proponga un criterio, lo acompañara de una “ficha técnica” que incluyera método de ensayo, bases y filtros ensayados, criterios de “éxito/fracaso” y comparación con otros criterios anteriores. Nunca debería emplearse ningún criterio si se desconocen estos datos
- son insuficientes en casos de frontera o problemas especiales
- son insuficientes para objetivos de investigación

A la vista de las limitaciones del estado actual de la técnica y de las conclusiones obtenidas sobre las distintas vías de estudio del proceso de erosión interna parece claro que los métodos actuales de diseño de filtros, aunque sancionados por la práctica, no llegan a definir con precisión el fenómeno de erosión interna ni son capaces de fijar el grado de seguridad de un filtro frente a situaciones quizás no previstas en principio como puede ser una mayor humedad de la base o distinta permeabilidad del filtro, etc. por lo que se considera interesante llevar a cabo un amplio programa de investigación basado en la experimentación directa.

Para ello se realizará en laboratorio una simulación del fenómeno de erosión interna mediante el ensayo conocido como No Erosion Filter Test (Ensayo de Filtros Sin Erosión), ideado por Sherard y Dunningan (1985) y que hoy en día es el más extendido en el ámbito mundial.

Con este ensayo se estudiarán todas las variables posibles para determinar la influencia de cada una, tanto de manera cualitativa como cuantitativa, en la erosión interna de bases cohesivas y su protección mediante el empleo de filtros granulares.

Por todo ello se ha elegido como título de la presente tesis doctoral el siguiente:
“VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA EFICACIA DE UN FILTRO GRANULAR FRENTE A LA EROSIÓN INTERNA DE BASES COHESIVAS“.

Aunque el título inicialmente propuesto en el Proyecto de Tesis Doctoral era “Simulación en Laboratorio del Fenómeno de la Erosión Interna en Presas de Materiales Suelos para la determinación de las Variables que Influyen en la Eficacia de un Filtro Crítico para Bases Cohesivas”, se ha modificado para tratar de ser más escueto y de forma que incluya las “palabras clave” que permitan localizar fácilmente esta Tesis Doctoral en las distintas bases de datos. Se ha suprimido del título la alusión a las presas de materiales sueltos por la misma razón de brevedad y porque el fenómeno de erosión interna no es exclusivo de las presas de materiales sueltos ya que puede aparecer, por ejemplo, a través del cimiento de presas de fábrica.

3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Introducción

En el capítulo anterior se ha puesto de manifiesto que a pesar del enorme esfuerzo investigador que se ha desarrollado en los últimos años sobre el estudio de la erosión interna en presas de materiales sueltos y su protección mediante filtros granulares, aun quedan bastantes cuestiones por aclarar que animan a seguir investigando sobre la cuestión.

Por supuesto que es inviable tratar de dar respuesta de una vez a todos estos interrogantes por lo que necesariamente se tiene que acotar el campo de estudio y por lo tanto especificar unos objetivos concretos y viables, aun a costa de renunciar al estudio de algunas temas que también son de gran interés.

A continuación se expone en primer lugar el objetivo general de la Tesis Doctoral y los objetivos principales y secundarios.

3.2 Objetivo General

El objetivo general y más amplio de la presente investigación está expresamente contenido en el título de la Tesis Doctoral, es decir, se pretende realizar una simulación en laboratorio del fenómeno de la erosión interna en presas de materiales sueltos, mediante el ensayo NEF, para determinar las variables que influyen en la eficacia de un filtro granular frente a la erosión interna de bases cohesivas.

Se renuncia a la simulación mediante otros ensayos de laboratorio precisamente para evitar la dispersión de datos y resultados existente que dificulta su comparación y la obtención de conclusiones adecuadas.

También se renuncia a la simulación empleando métodos numéricos porque se está colaborando con investigadores australianos, (Locke e Indraratna 2000), que están desarrollando un modelo numérico válido para bases cohesivas que necesita expresamente las conclusiones obtenidas de la simulación en laboratorio.

3.3 Objetivos Principales

Además del Objetivo General, se persiguen los siguientes Objetivos Principales:

1. Determinar qué variables correspondientes al **filtro granular**, (granulometría, porosidad, permeabilidad, etc.), influyen en su capacidad para retener las partículas erosionadas del suelo base e intentar cuantificar su efecto
2. Determinar las variables correspondientes al **suelo base**, (granulometría, humedad, densidad, plasticidad, dispersabilidad, erosionabilidad, cohesión, composición y mineralogía, empleo de aditivos y otras), que influyen en la forma en que éste puede ser erosionado y cómo éstas condicionan el diseño del filtro adecuado
3. Determinar de qué manera las **condiciones del flujo** pueden influir en el fracaso o éxito de un filtro granular a la hora de proteger a un determinado suelo base en caso de producirse erosión interna
4. Determinar la influencia de **otras variables** como el agua del ensayo, condiciones geométricas, etc.
5. Comprobar, mediante la experimentación directa, la **validez de los actuales criterios de diseño** de filtros granulares para el caso específico de las bases cohesivas y realizar una selección de los criterios más adecuados, señalando en cada caso el coeficiente de seguridad que contienen
6. Elaborar unas **nuevas normas de diseño** de filtros granulares específicas para bases cohesivas

3.4 Objetivos Secundarios

1. Comprobar la **validez del actual método de ensayo** de filtros sin erosión ideado por Sherard y Dunningan en 1985 y tratar de perfeccionarlo
2. **Contribuir con un amplio número de ensayos** de filtración a aumentar la base de datos existente en la actualidad y permitir a futuros investigadores o proyectistas disponer de mayor información sobre la cuestión
3. Tratar de **unificar las teorías** que emplean por separado la granulometría o la permeabilidad del filtro como variables de diseño
4. **Diseñar o comprobar el diseño**, mediante experimentación directa, de los filtros granulares más apropiados para algunas presas de materiales sueltos de la provincia de **Granada** y **Cádiz** de forma que sirva de referente a futuras construcciones con un entorno geológico similar

4 METODOLOGÍA

4.1 Introducción

En el presente apartado se expone la metodología seguida en la investigación: en primer lugar se justifica el método de ensayo empleado y se describen las variantes que se han realizado a partir del ensayo NEF “original” de Sherard, así como los parámetros de medida.

Finalmente se explica la metodología general de toda la investigación, estructurada en distintas fases.

4.2 Método de ensayo

4.2.1 Selección del método de ensayo

Una de las primeras y más importantes decisiones que hay que tomar a la hora de emprender una investigación con una gran carga experimental es el método de ensayo.

Ya se ha comprobado, gracias a la revisión de los conocimientos, que existe una gran variedad de ensayos posibles, cada uno de ellos trata de representar fielmente el fenómeno de la erosión interna y de la interacción base-filtro, pero lógicamente es preciso realizar una serie de hipótesis de partida y simplificaciones que pueden hacer perder validez a los resultados obtenidos.

Un inconveniente importante que supone esta variedad de ensayos es la gran dificultad existente a la hora de comparar los resultados de distintos investigadores para poder sacar conclusiones generales. En la actualidad no existe un ensayo unificado de filtros ni unas normas estandarizadas de realización, no habiéndose llegado a un acuerdo general sobre el método de ensayo a emplear, es más, una

variable tan importante como es el gradiente hidráulico, difiere de unos ensayos a otros en valores muy elevados, como por ejemplo ocurre entre el “No Erosion Filter Test” de Sherard y Dunningan (1985) y el “Crack Erosion Test” de Maranhã Das Neves (1989).

En la actualidad es frecuente que los nuevos investigadores se decanten por emplear ensayos diferentes e incluso por idear ensayos nuevos, lo que siempre impedirá la extrapolación de resultados, aunque quizás permita finalmente diseñar un ensayo realmente eficaz, que sea generalmente aceptado y a ser posible susceptible de normalización.

En este orden de cosas pareció aconsejable emplear el método de ensayo que más difusión mundial ha alcanzado como es el “No Erosion Filter Test” ideado por Sherard en 1.985.

Gracias a este ensayo, los resultados pueden ser comparados con los obtenidos en cualquier parte del mundo donde este ensayo se emplea con asiduidad o por lo menos es perfectamente conocido gracias a la enorme y merecida proyección internacional que alcanzó J.L. Sherard.

Otra razón de peso para elegir el ensayo NEF¹² fue que la investigación que se ha realizado supone una continuación de la realizada por Bravo y Maeso (1985) para poder diseñar correctamente los filtros de la Presa de Canales, la más alta de España de materiales sueltos. En esta investigación se empleó el “Slot Test” también ideado por entonces por Sherard (1982), cuya diferencia fundamental con respecto al NEF es el empleo de una ranura en vez del orificio de 1 milímetro de diámetro. De esta forma se ha contado con todo el material de laboratorio preciso así como la experiencia acumulada lo cual ha servido para evitar numerosas dificultades que aparecieron en su día y gozar de un óptimo ritmo de trabajo.

¹² A partir de ahora, para simplificar, se emplearán las siglas “NEF” para referirse al “No Erosion Filter Test”, (Ensayo de Filtros sin Erosión), ideado por Sherard y Dunningan 1985)

4.2.2 Variantes del ensayo

El ensayo NEF de Sherard y Dunningan (1985) se ha descrito en el capítulo “Revisión de los conocimientos”, donde se ha preparado además una ficha resumen con las condiciones del ensayo, materiales empleados, criterios de “éxito” o “fracaso”, etc.

Para mayor comodidad, a continuación se vuelve a adjuntar dicha ficha de ensayo.

REFERENCIA

SHERARD J., DUNNIGAN L. (1985) "Filters and Leakage Control in Embankment Dams" Proceedings, Symposium on Seepage and Leakage from Dams and Impoundments, R.L. Volpe and W.E. Kelly eds., ASCE 1985, pp 1-30.

TIPO DE ENSAYO

"No Erosion Filter Test" (Ensayo de filtros sin erosión): NEF

FILTRO

Procedencia: varias

Granulometría: varias

Compactación: por vibración con sobrecarga de 10 kg

Espesor: 100 mm

Otros: material lateral de arena o arcilla de modelar

SUELO BASE

Procedencia: bases naturales

Granulometría: varias

Espesor: 25 mm para suelos finos y 100 mm para suelos gruesos

Compactación: no especificado

Humedad/Concentración: humedad óptima

Aditivos: no procede

Otros: no procede

CONDICIONES DEL ENSAYO

Orificio: 1 mm para bases finas y 5-10 mm para bases gruesas

Presión/Gradiente Hidráulico: 4 kg/cm²

Otras: no procede

PARÁMETROS DE CONTROL

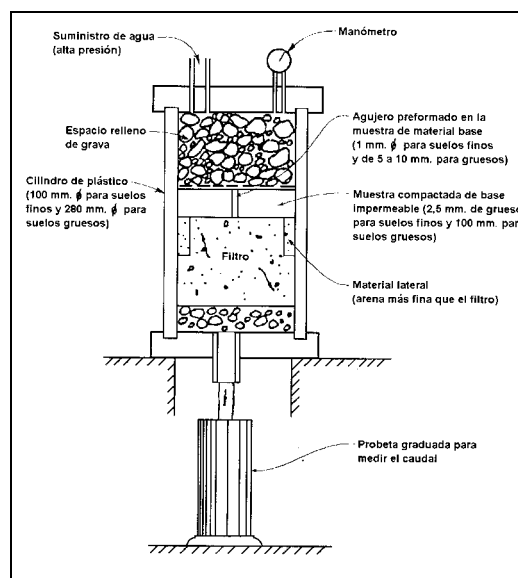
caudal, turbidez, inspección visual del orificio

CRITERIO ÉXITO/FRACASO

Filtro efectivo: si el filtro es capaz de retener las partículas del suelo base de forma que al final del ensayo el orificio no presenta signos de erosión.

Filtro no efectivo: si al final del ensayo el orificio ha aumentado de tamaño por efecto de la erosión o incluso han aparecido orificios nuevos.

FIGURA



OBSERVACIONES

El tamaño límite definido por este ensayo (D_{15FL}) es conservador, pero razonable, que puede ser usado directamente en el proyecto, en la mayor parte de los suelos de grano fino. Incluye un coeficiente de seguridad, pues los filtros de ese tamaño funcionan sin ninguna erosión en las severas condiciones del laboratorio, mientras que filtros más gruesos se sellan con muy poca erosión. El tamaño D_{15} es sólo del 20 al 40% de los tamaños definidos en los ensayos de 1982 para este tipo de suelos.

En la presente investigación se han realizado distintas variantes del ensayo para tratar de poner en manifiesto las variables influyentes en el proceso de erosión interna de las bases cohesivas y el funcionamiento del filtro granular, denominando ensayo “Estándar” al ensayo NEF que reproduce las mismas condiciones que en el ensayo original de Sherard, es decir:

- *Ensayo NEF tipo “Estándar”*

Filtro :

4 tongadas de 2.54 cm (1”) de espesor

Humedad : 3% aproximadamente

Compactación : 60 seg. de vibración por tongada con sobrecarga de 9.07 kg, (20 libras).

Suelo Base:

2 tongadas de 1.27 cm (0.5”) de espesor

Humedad : la óptima del ensayo próctor normal más 1%

Compactación : 25 golpes con maza tipo Army por tongada

Orificio perforado de 1mm de diámetro

Condiciones del ensayo:

presión : 4 Kg/cm² (0.4 MPa)

duración : 20 minutos

A continuación se describen las distintas variaciones realizadas, y los tipos de ensayos a que han dado lugar

4.2.2.1 Agua

El efecto del agua sobre el arrastre de partículas del suelo base es ya conocido tal y como expresan Sherard y Dunningan (1985), de forma que un alto contenido de sales en el agua aumenta el D_{15FL} del filtro necesario. Esto se debe a los fenómenos de atracción molecular y de intercambio iónico. Por esta razón en el caso de ensayos de dispersabilidad de arcillas es preciso utilizar agua destilada y así se ha hecho a la hora de determinar ésta característica en cada una de las bases empleadas en la

investigación. Sin embargo, en lo que se refiere al ensayo NEF, es muy importante reproducir las circunstancias reales que aparecen en el núcleo de una presa de materiales sueltos, para lo cual se ha creído conveniente emplear el agua procedente del propio embalse. Lógicamente no se ha podido usar el agua de cada uno de los respectivos embalses, por lo que ha habido que conformarse con tomar siempre el agua del río Castril, que alimenta el embalse del Portillo, (Castril, Granada), por ser allí donde estaba situado el laboratorio.

De esta manera, aun siendo conscientes de que se ha tenido que fijar la variable “agua de ensayo” y por lo tanto se ha perdido la posibilidad de cuantificar su influencia, se ha conseguido una mayor homogeneidad y simplicidad dado el elevado volumen de agua empleado en la investigación lo que hacía prácticamente inviable la utilización de agua destilada.

A continuación se adjuntan algunos resultados de los análisis del agua empleada en los ensayos:

Bicarbonatos	463.6 mg/l	Nitritos	0 mg/l
Calcio	64.13 mg/l	Potasio	0.30 mg/l
Carbonatos	0 mg/l	Sodio	2.50 mg/l
Cloruros	3.55 mg/l	Sulfatos	1.85 mg/l
Magnesio	9.72 mg/l	Sulfuros	0 mg/l
Nitratos	0.55 mg/l	pH	8

Tabla 7.- Análisis químico del agua empleada en los ensayos NEF

Por lo tanto, en la presente investigación se ha renunciado a la posibilidad de estudiar el efecto de la naturaleza y composición química del agua.

4.2.2.2 *Muestra de Material Base*

Como se ha visto en el capítulo 2, la influencia de la granulometría del suelo base en la interacción base-filtro es uno de los puntos de general acuerdo entre todos los investigadores, también parecen coincidir con respecto al efecto de la cohesión, de forma que muchos autores (Lafleur et al 1989) dividen sus resultados según esta variable.

Lo que ya no queda tan claro es si alguna de las otras propiedades de los suelos como puede ser la plasticidad, mineralogía, etc. repercuten de manera significativa en este comportamiento.

□ *Procedencia*

Aunque algunos investigadores han empleado bases artificiales (Vaughan y Soares 1982), como por ejemplo partículas de cuarzo, lo cierto es que resulta interesante poder comprobar el comportamiento de los suelos reales, lo que supone una elevada complejidad a la hora de discriminar el efecto por separado de cada una de sus propiedades.

La mejor forma de abordar este problema es ensayar una amplia gama de suelos base de forma que exista una variación significativa de sus propiedades. En la presente investigación se han empleado arcillas de siete presas españolas: Canales (Río Genil, Granada), Barbate (Río Barbate, Cádiz), Francisco Abellán (Río Fardes, Granada), Jesús del Valle (Río Darro, Granada), Portillo (Río Castril, Granada), San Clemente (Río Guardal, Granada) y Zahara (Río Guadalete, Cádiz) con un total de 22 muestras diferentes.

El elevado número de muestras empleadas permite obtener resultados muy valiosos no sólo para poder extraer conclusiones de carácter general, sino que llega a caracterizar casi por completo el abanico de posibilidades de todas las presas de materiales sueltos de la provincia de Granada, teniendo en cuenta que sólo han

quedado sin ensayar la Presa de Colomera, por encontrarse inundadas las antiguas canteras de arcilla, y la Presa del Cubillas que no tiene núcleo impermeable sino que es homogénea.

El empleo de las muestras de las presas gaditanas de Barbate y Zahara se debe al interés de ensayar algunas arcillas muy plásticas y con mayor carácter dispersivo, que no se encuentran en las presas granadinas, consiguiéndose además ampliar el ámbito de estudio fuera de la provincia de Granada.

Cada una de las muestras de suelo base ensayadas se ha caracterizado mediante la obtención de su granulometría por tamizado y sedimentación, tanto utilizando dispersante como sin él; límites de Atterberg, densidad máxima y humedad óptima por el método Próctor Normal; cohesión y ángulo de rozamiento por el ensayo triaxial, mineralogía por difracción de rayos-x, permeabilidad, peso específico, dispersabilidad por el “Pin-hole”, presión de preconsolidación y Cv por el ensayo edométrico y por último, fotografía en microscopio electrónico. Todos los ensayos de caracterización, salvo la mineralogía, se han realizado en los laboratorios de Mecánica de Suelos de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir situados en las Presas de Canales y del Negratín.

La clave empleada para denominar cada muestra de suelo base ensayada contiene las siglas del tipo de muestra, (base), la presa de procedencia y el número de muestra correspondiente. Así por ejemplo, la clave **BP-C3** indica que se trata de una muestra de suelo **B**ase, de la presa del **P**ortillo y que es la **C**ata número **3**.

Siguiendo el orden anterior se tienen las siguientes muestras de suelo base: **BCA**, (Canales), **BBA**, (Barbate), **BFA**, (Francisco Abellán), **BJV**, (Jesús del Valle), **BP**, (Portillo), **BSC**, (San Clemente) y **BZA**, (Zahara).

□ *Granulometría*

Como se acaba de comentar, las muestras ensayadas son naturales y por lo tanto la granulometría no es controlable a voluntad. Sin embargo, al tener muchas muestras diferentes se podrán obtener conclusiones sobre la influencia de la granulometría.

Pero para tratar de observar la influencia de la granulometría del suelo base a igualdad de las otras propiedades del suelo, se ha tratado de tamizar una muestra de arcilla y recomponer su granulometría de forma artificial tratando de “crear” el d_{85B} a voluntad.

Así por ejemplo, a partir de la muestra BP-C2, se han preparado las muestras BP-C2-1.25, BP-C2-0.63 y BP-C2-0.32; en las cuales se ha buscado obtener un d_{85B} igual a 1.25, 0.63 y 0.32 mm respectivamente.

Efectivamente hay ciertas dudas de que esta alteración sea viable y de lugar a resultados interesantes, pero no deja de ser un intento más para profundizar en el estudio del comportamiento de las bases cohesivas.

□ *Compactación*

Para estudiar la influencia de la compactación del suelo base, se han diseñado distintas variantes del ensayo NEF “Estándar” en las cuales se ha variado la energía de compactación o la humedad de la muestra.

Precisamente, en el capítulo 2 se ha señalado el desacuerdo existente entre los distintos investigadores sobre la influencia de la humedad, ya que algunos opinan que la erosionabilidad de la arcilla es menor para la humedad óptima y otros piensan que la humedad no tiene una influencia significativa.

Para comprobar esta influencia se han diseñado las siguientes variaciones:

- *Ensayo tipo “Lado Seco”*

Filtro :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Suelo Base :

Humedad : por debajo de la óptima del ensayo próctor normal

Resto igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Condiciones del ensayo :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

- *Ensayo tipo “Lado Húmedo”*

Filtro :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Suelo Base :

Humedad : por encima de la óptima del ensayo próctor normal

Resto igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Condiciones del ensayo :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

- *Ensayo tipo “ 50 Golpes ”*

Filtro :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Suelo Base :

Compactación : 50 golpes con maza tipo Army por tongada

Resto igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Condiciones del ensayo :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

□ *Aditivos*

Kabasy (1993 y 1999) ha comprobado que al añadir algunas sustancias químicas a la arcilla como sulfatos o cal viva, se modifica su dispersabilidad; sin embargo no se ha estudiado si también estos aditivos modificarían el diseño del filtro granular preciso para proteger a dicha arcilla.

Sherard et al. (1989) afirman que no hay diferencias entre arcillas dispersivas y no dispersivas en los resultados de los ensayos NEF, por lo que de ser cierto, el empleo de aditivos tampoco debería de alterar estos resultados.

Para comprobar este efecto se han diseñado una variante de ensayo en el que se le añade una cierta cantidad de bentonita a la arcilla y otra variante del ensayo en que se le añade un cierto porcentaje de sulfato de aluminio.

Se ha escogido la bentonita para tratar de aumentar la plasticidad del suelo base con un material fácil de mezclar, en cuanto a la elección del sulfato de aluminio como aditivo, se debe a su gran poder para reducir la dispersabilidad, (Kabasy 1993), así como su solubilidad en agua y facilidad de manejo.

Estas variantes han dado lugar a los siguientes tipos de ensayos:

- *Ensayo tipo "Bentonita"*

Filtro :

Igual que en el ensayo "ESTANDAR"

Suelo Base :

A la muestra de suelo base se le añade un cierto porcentaje de Bentonita

Resto igual que en el ensayo "ESTANDAR"

Condiciones del ensayo :

Igual que en el ensayo "ESTANDAR"

- *Ensayo tipo "1% Sul. Al." ó "3% Sul.Al"*

Filtro :

Igual que en el ensayo "ESTANDAR"

Suelo Base :

Se le añade al suelo base un 1% ó 3% respectivamente de sulfato de aluminio potásico

Resto igual que en el ensayo "ESTANDAR"

Condiciones del ensayo :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

4.2.2.3 *Muestra de Material Filtro*

Respecto al material de filtro, han sido muchos los autores (ej. Lafleur et al 1989) que han empleado tamices en vez de filtros granulares a la hora de realizar sus ensayos. Otros investigadores emplearon pequeñas esferas de vidrio. De cualquiera de estas formas se consigue un perfecto conocimiento de los diámetros de paso lo que permite calcular el tamaño de constricción de control y su efectividad frente a cada base.

Sin embargo, en la realidad, el sistema de canales de filtración que aparecen entre los poros de un filtro granular real es sumamente complejo y de hecho es hoy en día uno de los puntos de mayor controversia e interés en la investigación sobre este tema.

Respecto al filtro, las variantes realizadas en la presente investigación han sido:

□ *Procedencia*

Se decidió usar siempre filtro granular de áridos de machaqueo, para así poder representar con fidelidad en fenómeno de interacción base-filtro aun a costa de una mayor complejidad a la hora de conocer la estructura interna del filtro.

En cuanto a la procedencia del mismo, en un principio se pensó en emplear arena silíceo dada sus buenas propiedades de resistencia y durabilidad. A pesar de realizar distintas gestiones para tratar de localizar un suministrador, siempre se encontró con importantes dificultades como la carestía del material y la dificultad de encontrarlo en los tamaños precisos para poder reconstruir las granulometrías a emplear en la investigación.

De nuevo se optó por emplear el filtro que realmente se ha usado en la Presa del Portillo. Este es un filtro granular, de machaqueo, procedente del procesado de roca caliza de la cantera de “Los Aviones”, a menos de 1 kilómetro aguas arriba de la

presa. Esto supone por lo tanto que la procedencia pasa a ser una constante y no una variable.

□ *Granulometría*

A partir del filtro original, mediante lavado y tamizado se separa en distintas fracciones para posteriormente recomponer la curva granulométrica precisa.

Para ello se ha decidido emplear siempre granulometrías lineales definidas fijando el D_{100F} y el D_{15F} , (tamaño del tamiz por el que pasa el 100 % y el 15 % respectivamente). De esta forma se consigue un amplio abanico de granulometrías con diferentes coeficientes de uniformidad ($C_u = D_{60}/D_{10}$) y D_{15F} , que son los parámetros más frecuentemente utilizados para caracterizar a un filtro.

En cuanto al tamaño máximo del filtro, se han usado filtros con $D_{100F} = 20$ mm, $D_{100F} = 10$ mm ó $D_{15F} = 5$ mm.

No se han utilizado tamaños máximos mayores porque el diámetro de la probeta de ensayo, (8cm), no permitiría su colocación sin el peligro de una exagerada segregación y falta de uniformidad. Tampoco se han empleado valores del D_{100F} inferiores a 5 mm porque existe el riesgo de falta de autoestabilidad del filtro.

Todos los filtros ensayados han sido lavados eliminando la fracción que pasa por el tamiz de 0.08 mm. Al eliminar la fracción fina se consigue un mayor control de la granulometría ya que toda ella se hace por tamizado ganándose en simplicidad y repetitividad de los resultados, sin embargo se pierde la posibilidad de conocer el comportamiento e influencia de la fracción fina en el fenómeno de interacción base-filtro.

Esta eliminación de la fracción fina ha sido frecuentemente realizada por la mayoría de los investigadores, así por ejemplo, Sherard y Dunningan (1984) afirman que los resultados de su investigación, al quitar la fracción fina del filtro, quedan del lado de

la seguridad ya que está comprobado que esta fracción disminuye la permeabilidad y por tanto, para un mismo D_{15F} del filtro, aumenta la eficacia del mismo.

El tipo de filtro empleado en cada ensayo se identifica por las siglas “FP- $(D_{100F})/(D_{15F})$ ”, así por ejemplo, la clave **FP-10/0.4** quiere decir “**F**iltro procedente del **P**ortillo, con $D_{100F}=\underline{10}$ mm y $D_{15F}=\underline{0.4}$ mm”.

□ *Compactación*

En el ensayo NEF “original” el filtro se compacta en cuatro tongadas de 2.54 cm de espesor cada una, mediante una sobrecarga de 9.07 kg, (20 libras) y sometida a vibración durante un cierto tiempo.

Está claro que para una misma granulometría, la compactación reduce la porosidad y disminuye también la permeabilidad y por lo tanto el funcionamiento del filtro no depende sólo del D_{15F} sino que es interesante comprobar el efecto de estas otras dos variables.

En el capítulo 2 se ha visto que la experiencia de Vaughan y Soares (1982) e Indraratna et al (1996) demuestran que la permeabilidad es una propiedad del filtro que influye de manera decisiva en su comportamiento frente al arrastre de partículas del suelo base, hasta tal punto es así, que de hecho es más apropiado emplear la permeabilidad que la propia granulometría para tal fin. Sin embargo, el empleo de la permeabilidad como variable de diseño no se ha extendido por la dificultad de medirla in situ.

Pero el problema es complejo y requiere una mayor atención: muchos autores han encontrado relaciones entre la granulometría y la permeabilidad (Sherard, Bertram, Hazen, Indraratna et al., etc.¹³), generalmente basadas en el D_{15F} y/o el coeficiente de uniformidad o el de curvatura. Para obtener dichas relaciones basta con realizar un programa de ensayos de permeabilidad con distintas granulometrías. El problema es

¹³ Ver capítulo 2, “Revisión de los conocimientos”

que a la hora de realizar en ensayo cabe la posibilidad de compactar el filtro en mayor o menor medida y esto puede cambiar radicalmente los resultados obtenidos.

Por esta razón, en la presente investigación se ha considerado interesante tratar de determinar la influencia exacta de la permeabilidad, propiedad que está íntimamente ligada a la granulometría pero que además depende en gran medida de otras variables como la porosidad, grado de compactación de un suelo y la pendiente de la curva granulométrica.

Por otra parte, al ser el filtro un material granular y no cohesivo, no es posible emplear la técnica del ensayo Próctor para definir la compactación del filtro, ya que el choque de la maza sobre las partículas de filtro da lugar a fenómenos de rebote elástico que impiden la homogeneidad de los resultados. Para este tipo de suelos, el *Manual de Tierras del Bureau of Reclamation (1980)*, especifica que el mejor método para controlar la compactación es el de la *Densidad Relativa de Suelos Sin Cohesión, (Norma E-12)*.

La densidad relativa se define como el estado de compactación de un suelo respecto a los estados más suelto y más compacto en que puede colocarse con los procedimientos de laboratorio, y se expresa como una relación en tanto por ciento, de la diferencia entre el índice de huecos en su estado más suelto y el índice de huecos del suelo “in situ”, a la diferencia entre los índices de huecos en los estados más sueltos y más compacto.

En este ensayo el suelo se compacta mediante vibración y por lo tanto es este procedimiento el que se ha empleado en la presente investigación. Así pues, en cada ensayo NEF, el filtro se compacta en cuatro capas de 2.54 cm espesor cada una, mediante la colocación de una sobrecarga de 9.07 kg, (20 libras) y compactación en mesa vibrante durante un tiempo determinado por tongada.

Para poder tener en cuenta la influencia de la compactación y de la permeabilidad, se ha optado por emplear tres tiempos diferentes de vibración: 15 segundos, 60

segundos y 120 segundos respectivamente. De esta forma se trata de poder determinar por ejemplo, si es posible conseguir que un filtro que se ha compactado un cierto tiempo se comporte igual que otro, que siendo más fino, ha sido sometido a una compactación inferior. Esto permitiría introducir la densidad relativa o la porosidad, como una de las variables fundamentales a la hora de caracterizar la red de poros de un suelo granular.

Estas variaciones dan lugar a los siguientes tipos de ensayos:

- *Ensayo tipo “ 15 Seg. Vibr. ”*

Filtro :

Compactación : 15 seg. de vibración por tongada con sobrecarga de 9.07 kg, (20 libras).

Resto igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Suelo Base :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Condiciones del ensayo :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

- *Ensayo tipo “ 2 Min. Vibr. ”*

Filtro :

Compactación : 120 seg. de vibración por tongada con sobrecarga de 9.07 kg, (20 libras).

Resto igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Suelo Base :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Condiciones del ensayo :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

4.2.2.4 Material Lateral

Al realizar el NEF de Sherard y Dunningan (1985), en la última tongada de filtro, la que está en contacto con el material de base, se debe colocar un material lateral (“side material”), para evitar que el agua encuentre un camino preferencial en el contacto del filtro con las paredes de la probeta.

Según el propio Sherard, este material puede ser arena más fina que el filtro o arcilla de modelar. En los ensayos realizados en la Presa de Canales (Bravo y Maeso 1985), emplearon un disco de arcilla de modelar para tal fin, pero en los demás ensayos referidos en las distintas publicaciones se ha empleado un cordón de arena.

Por esta razón, en la presente investigación se decidió emplear como material lateral arena muy fina que se coloca en la última tongada de filtro mediante un sencillo encofrado de P.V.C. que se retira una vez rellenado el interior del material de filtro. Esto se hizo así pensando que si se empleaba arcilla de modelar o plastilina, se podía producir una contaminación del filtro y una diferencia en la compactación del mismo. Al ser la arena de la misma naturaleza que el filtro, su comportamiento frente a la compactación por vibración es de esperar que sea similar.

Sin embargo, en aquellos casos en que el filtro es muy fino resulta difícil conseguir una arena más fina que éste y por ello se pensó que lo mejor era en estos casos emplear arcilla de modelar o plastilina, tomando la precaución de evitar la contaminación del filtro y haciendo el anillo de arcilla lo más pequeño posible para que no perturbe la compactación.

Ante la duda de si era posible que esta diferencia de material lateral, aunque es una variable propia del método de ensayo y no del fenómeno que se quiere estudiar, diera lugar a una alteración de los resultados; se decidió estudiar el posible error instrumental repitiendo el mismo ensayo con distintos tipos de material lateral: arena, arcilla y plastilina.

El material empleado como “material lateral” no distingue el tipo de ensayo, sino que aparece especificado en el apartado de “observaciones” de la hoja de resultados, es decir, no supone en sí una variante del ensayo “Estándar”, pero su efecto sí se está teniendo en cuenta.

4.2.2.5 *Condiciones del flujo*

El fenómeno de erosión interna en las presas de materiales sueltos viene claramente determinado por las condiciones del flujo. Dentro de estas condiciones es quizás el gradiente hidráulico la más determinante de todas ya que el proceso por el cual una partícula de arcilla es arrancada y arrastrada por el flujo, viene determinado entre otras variables, por la velocidad del flujo y ésta a su vez, por la sección y rugosidad del conducto y por el gradiente hidráulico.

En el ensayo NEF se emplea una pastilla de arcilla de una pulgada (2.54 cm) de espesor y una presión de agua de 4 Kg/cm^2 , (0.4 Mpa), lo que en primera aproximación equivaldría a un gradiente hidráulico de 1000 a 2000. En realidad este gradiente no es tan fuerte si se tiene en cuenta que las velocidades en la fisura son del orden de 5 a 10 m/s lo que aplicando el ábaco de Moody equivaldría a un gradiente 60.

Sin embargo, son muchos los autores que no están de acuerdo en emplear gradientes hidráulicos tan fuertes, así por ejemplo Vaughan, en una conferencia en el Imperial College de Londres en 1995, argumenta que el gradiente empleado por Sherard es imposible que se de en la realidad y por ello llega a descalificar los resultados obtenidos por este autor.

En el LNEC de Lisboa, Maranhã Das Neves , en su “Crack Erosion Test”, emplea velocidades más acordes a las que realmente aparecen en las presas en condiciones normales, con gradientes del orden de 1 a 3. Sin embargo, es conocido que es posible

la aparición de vías preferenciales de filtración que den lugar a concentraciones puntuales de gradiente¹⁴.

En cualquier caso queda claro que el gradiente hidráulico, y por lo tanto, la presión de ensayo; son variables de suma importancia en el fenómeno que se pretende estudiar. Por esa razón se ha decidido realizar los ensayos NEF con dos presiones diferentes, de 2 y 4 Kg/cm², (0.2 y 0.4 Mpa), respectivamente.

Por otra parte, al tomar medidas de caudal y variación del diámetro del orificio se puede calcular la velocidad de filtración en la fisura y su correspondiente gradiente hidráulico, de forma que de antemano parece posible que se llegue a caracterizar las condiciones de flujo en los ensayos y su influencia en el éxito o fracaso de los mismos.

Además de la presión, también se ha modificado la sección y longitud del conducto a través de la pastilla de suelo base, de forma que si bien en los ensayos “Estándar” el espesor de la base es de 25.4 mm y el diámetro del orificio de 1 mm, se han realizado variantes del ensayo en las que el espesor es de 50.8 mm y el orificio de 2mm, respectivamente, es decir, una u otra variante, pero no las dos a la vez.

En cuanto a la dirección del flujo con respecto a la de la gravedad, aunque algunos autores como Das Neves (1989) señalan claramente su efecto, en la presente investigación se ha optado por realizar todos los ensayos con el flujo en dirección vertical ya que es la situación más desfavorable.

Las variantes mencionadas dan lugar a los siguientes tipos de ensayo:

- *Ensayo tipo “2 Kg. Pres.”*

Filtro :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Suelo Base :

¹⁴ Ver capítulo 2, “Revisión de los conocimientos”

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Condiciones del ensayo :

Presión de 2 Kg/cm²

Resto igual que en el ensayo “ESTANDAR”

- *Ensayo tipo “ Base 5cm ”*

Filtro :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Suelo Base :

4 tongadas de 1.27 cm (0.5”) de espesor

Resto igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Condiciones del ensayo :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

- *Ensayo tipo “ Broca 2mm ”*

Filtro :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Suelo Base :

Orificio perforado de 2 mm de diámetro

Resto igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Condiciones del ensayo :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

4.2.2.6 Tiempo de Ensayo

En los ensayos realizados por Bravo y Maeso en la Presa de Canales (1985), el ensayo se mantenía en funcionamiento hasta que finalmente se taponaba por completo la salida de agua o se llegaba a una estabilización del caudal de salida de agua limpia. Sherard et al (1985) no especifica cuánto tiempo hay que mantener el ensayo en funcionamiento, pero si habla (1982, conferencia en Madrid sin publicar), de que la erosión más significativa se produce en los primeros instantes.

Dado que el criterio entre “Éxito” o “Fracaso” en los ensayos NEF es muy estricto ya que no permite erosión visible del orificio practicado en la muestra de arcilla, parece claro que una vez que éste se ha agrandado, no repercute sobre la clasificación final del ensayo si al cabo de un cierto tiempo el filtro acaba con tapizarse y consigue frenar la erosión, fenómeno que en la literatura inglesa se denomina “clogging”. Queda la incógnita de que si en una presa real, la pérdida de material sufrida es posible que sea inaceptable.

En la presente investigación se ha decidido realizar la mayoría de los ensayos con una duración de veinte minutos como resultado de la fase de puesta a punto del ensayo, pero también se ha optado por repetir determinados ensayos manteniéndolos durante un período de tiempo más largo, de varias horas, hasta que se produzca el taponamiento o la estabilización del caudal.

Esta variante ha dado lugar al siguiente tipo de ensayo:

- *Ensayo tipo “Larga Duración”*

Filtro :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Suelo Base :

Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

Condiciones del ensayo :

Duración del ensayo : durante varias horas, hasta que cesa el flujo de agua o este se estabiliza.

Resto : Igual que en el ensayo “ESTANDAR”

4.2.2.7 *Tabla resumen de las variantes del ensayo NEF*

A continuación se adjunta una tabla resumen que contiene todas las variantes realizadas en el ensayo de filtros sin erosión, (NEF):

VARIANTES DEL ENSAYO NEF						
	ESTANDAR	Lado Seco	Lado Hum.	Bentonita	Sul. Al.	Larga Dur.
FILTRO						
Espesor	4 x 2.54 cm.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.
Compactación	4 x 60 seg.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.
Humedad	3% aprox.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.
BASE						
Espesor	2.54 cm.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.
Compactación	2 x 25 golp.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.
Humedad	Hopt. + 1%	<<Hopt.+1%	>>Hopt.+1%	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.
orificio	1 mm.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.
aditivos	ninguno	ESTAND.	ESTAND.	Bentonita	Sulf. Alumin.	ESTAND.
COND. ENSAYO						
Presión	4 Kg/cm2	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.
Duración	20 min.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	Hasta Estab.

VARIANTES DEL ENSAYO NEF					
	15 Seg.Vibr.	2 Min.Vibr.	Base 5cm	Broca 2mm	50 Golpes
FILTRO					
Espesor	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.
Compactación	4 x 15 seg.	4 x 120 seg.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.
Humedad	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.
BASE					
Espesor	ESTAND.	ESTAND.	5.08 cm.	ESTAND.	ESTAND.
Compactación	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	2 x 50 golpes
Humedad	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.
Orificio	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	2 mm.	ESTAND.
Aditivos	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.
COND. ENSAYO					
Presión	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.
Duración	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.	ESTAND.

Tabla 8.- Variantes del ensayo NEF

4.2.3 Parámetros a analizar

A la hora de determinar los parámetros que se han de medir en cada uno de los ensayos NEF, se ha tomado como referencia la experiencia adquirida en el programa de ensayos llevados a cabo en la Presa de Canales, (Bravo y Maeso 1985), y en la Presa de Beninar, (Bernal, Nevot y Vizcaino 1993), así como las alusiones que a este respecto realiza Sherard en sus publicaciones.

4.2.3.1 Agua de Salida

El agua de salida del ensayo se recoge en una probeta graduada de cristal y en un emplazamiento debidamente iluminado a ser posible con luz solar o blanca para evitar coloreados engañosos.

Los parámetros relativos al agua de salida del ensayo que se controlan son los siguientes:

□ Caudal

El caudal de salida del ensayo es uno de los parámetros más relevantes ya que está determinado por la permeabilidad original del filtro y por el proceso de arrastre-retención de las partículas de suelo base. Resulta difícil e incluso desaconsejable medir el caudal instantáneo, ya que para ello habría que disponer de un caudalímetro lo que sería muy complicado y además podría perturbar el flujo. Por ello se ha decidido tomar medidas de volumen acumulado cada cierto tiempo y calcular el caudal medio del intervalo considerado.

Tal y como se explica en el apartado correspondiente a la puesta a punto del ensayo, en los primeros ensayos se ha comprobado que el fenómeno de erosión-retención tiene lugar preferentemente en los primeros minutos del ensayo, por esa razón se ha decidido tomar las medidas más frecuentes al principio del mismo y así poder definir mejor la curva de variación de caudal en su parte más significativa.

La medida de caudal se realiza mediante la recogida del agua de salida en una probeta de cristal transparente graduada con 10 ml de precisión ó 1ml de precisión en función del caudal efluente. Se toman lecturas a intervalos regulares, cada 30 segundos los cinco primeros minutos, cada minuto los cinco siguientes; y cada dos minutos los diez restantes. Anotando en cada caso el volumen acumulado se obtiene el volumen parcial y dividiendo por el tiempo entre lecturas, se calcula el caudal medio de cada intervalo, expresado en cm^3/s .

□ ***Turbidez***

Al poner en marcha el ensayo y darle presión al agua, se establece el flujo a través de la fisura por lo que, generalmente, las partículas de arcilla de las paredes del orificio son arrastradas por la corriente. De esta forma llegan al filtro y en caso de que éste tenga unos poros de tamaño superior al de las partículas, éstas pueden escapar con lo que el agua de salida del ensayo sale turbia debido al contenido de partículas de suelo en suspensión. Conforme el filtro comienza a funcionar, ciertas partículas quedan retenidas con lo que además reducen a su vez el tamaño libre de los poros y por ello cada vez es posible retener partículas más finas. Esto suele dar lugar a una reducción de la turbidez del agua y del caudal.

Por esa razón, resulta fundamental medir la turbidez del agua en cada momento ya que ésta viene determinada por la cuantía de los arrastres. Por supuesto que lo realmente interesante sería conocer exactamente la concentración de sólidos en suspensión en cada momento, lo que nos permitiría definir una especie de “caudal sólido” y cuantificar la cantidad total de suelo erosionada.

Respecto a este punto, tanto la experiencia de Canales, Beninar y la propia de Sherard, indican que la turbidez se ha medido de forma visual. Para ello lo mejor es fabricar unos patrones que permitan definir los términos de “clara”, “casi clara”, “algo turbia”, “turbia” y “muy turbia”.

Así se ha realizado en la presente investigación, y a esa escala responden las medidas contenidas en las hojas de ensayos. Sin embargo, a pesar de la sencillez de este método, no deja de ser una apreciación cualitativa e incluso a veces algo subjetiva y afectada por las condiciones lumínicas de la zona de ensayo así como la naturaleza y color de cada uno de los suelos base ensayados.

Por esta razón se ha decidido adoptar un método que permitiese cuantificar el contenido real de sólidos en suspensión.

Sobre este tema cabe destacar la experiencia de Kabasy (1993) que empleó un turbidímetro para analizar esta propiedad. En la presente investigación se ha optado por un nuevo método basado en la nefelometría, elaborado en colaboración con D. Francisco Lamas, de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Esta técnica consiste básicamente en medir la absorbancia de la muestra y establecer una curva patrón entre este valor y la concentración de sólidos en suspensión. Es preciso realizar una curva patrón para cada suelo estudiado e incluso tener precaución con el intervalo de medida, ya que aquellos valores que se salgan de dicho intervalo pierden fiabilidad. (Más detalles del método en el ANEJO 12.2).

Así pues, cada intervalo de lectura, que ya se ha comentado que es variable, se toma una muestra de agua en un frasco de 10 ml de capacidad, que cerrado herméticamente se manda a laboratorio para tomar las lecturas por nefelometría.

□ Residuo Seco

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, para poder medir cuantitativamente la turbidez y la concentración de sólidos en suspensión, para cada suelo ensayado se hace un calibrado previo en el cual se toman varias muestras de agua turbia y se calcula su residuo seco por secado en estufa lo que permite correlacionar la turbidez obtenida por nefelometría y la concentración y por lo tanto, el residuo seco.

Como cada muestra es representativa del intervalo de tiempo de medida correspondiente, conocido el volumen de salida en cada intervalo y su concentración, se puede calcular la cantidad de suelo arrastrada.

4.2.3.2 Muestras de Material Base

□ Antes del Ensayo

La muestra de suelo base se introduce en la probeta de Ensayo con la humedad especificada en dos tongadas mediante 50 golpes de la maza tipo “Army”. Midiendo el espesor final de la muestra mediante al menos cuatro medidas con calibre, se calcula el volumen de la misma. La humedad se determina mediante desecado en estufa del material sobrante en el ensayo.

De esta manera se determina la humedad de la muestra antes de ensayar, y sus densidades húmeda y seca.

□ Después del Ensayo

• *Inspección visual*

Una vez finalizado el ensayo, se desmonta cuidadosamente la probeta retirando en primer lugar la grava colocada para tranquilizar el agua, luego se invierte la posición de la probeta y por su parte inferior se va retirando el material de filtro observando la existencia o no de material de suelo base atrapado. Una vez cerca de la pastilla de suelo base, el resto del filtro se retira mediante un suave chorro de agua de forma que no se dañe a la pastilla de arcilla. Aun con la pastilla en el interior de la probeta, se observa el orificio practicado y la existencia o no de erosión lateral. Cualquier observación de interés se anota en la hoja de ensayo.

Posteriormente se introduce por la parte anterior de la probeta los discos y la pesa empleada como sobrecarga para que, ejerciendo una leve presión, la pastilla de suelo base se desprenda lo menos alterada posible.

De nuevo se lleva a cabo una inspección visual de la pastilla en la que se presta especial atención al orificio, del cual se mide con calibre el diámetro de entrada y el de salida. También es interesante observar, si el diámetro del orificio lo permite, las paredes del interior de la fisura, para comprobar si la erosión ha sido uniforme o si el suelo ha sido arrastrado en agregados, lo cual se aprecia por las irregularidades en la superficie de la fisura.

Todas estas observaciones se llevan a cabo dotados de lentes de aumento para percibir con claridad los detalles. La pastilla se conserva en la mayoría de los casos, pero algunas veces se le practica una sección cuidadosamente por la mitad de la fisura y así se puede observar el interior de la misma con claridad.

- *Humedad final*

En todos los ensayos se mide la humedad con que se ha colocado el material de suelo base, pero también resulta interesante tomar algunas medidas de la humedad final de la pastilla de arcilla.

Para evitar el efecto de la mayor humedad de la superficie libre, se desprende a la pastilla de ésta y se calcula la humedad final del interior de la pastilla. Dado la corta duración del ensayo, no hay tiempo suficiente para llegar a una mayor saturación, sin embargo, se ha observado que ciertas bases adquieren una humedad significativamente mayor.

- *Diámetro del orificio*

Tal y como se ha indicado en el apartado de “Inspección Visual”, el diámetro del orificio de entrada y el de salida se miden con calibre para determinar si ha habido aumento debido a la erosión. Hay que tener en cuenta que con cierta frecuencia se puede taponar o reducir el orificio de entrada al presionar para sacar la pastilla de arcilla, pero eso tiene menos importancia porque lo más significativo es el orificio de salida y por ello precisamente se toma la precaución de no alterarlo.

La medida del diámetro final del orificio de salida así como los signos de erosión lateral y el volumen de agua recogido son empleados para decidir la clasificación de “ÉXITO” o “FRACASO”. En aquellos casos en los que no queda claro, se atiende también a los caudales de salida y/o se adopta la clasificación de “INTERMEDIO”.

4.2.3.3 Muestras de Material de Filtro

□ Antes del Ensayo

El filtro se coloca en la probeta en cuatro tongadas que se compactan por vibración, manteniendo una sobrecarga de 9.07 kg, (20 libras). Durante un tiempo de vibración específico para cada tipo de ensayo.

Se determina el espesor del filtro con calibre y el material sobrante se introduce en estufa para determinar su humedad. Al igual que se procede con el suelo base, se determina la humedad y la densidad húmeda y seca del filtro.

Independientemente se realizan una serie de ensayos de densidad relativa empleando distintas granulometrías de filtro para poder determinar en cada ensayo, por correlación, la densidad relativa obtenida.

Por otra parte se realiza un extenso programa de ensayos de permeabilidad de filtros con carga constante, para distintas condiciones de compactación y granulometría.

Con todos estos datos se debe realizar un análisis estadístico que permita identificar y cuantificar relaciones entre distintas variables como por ejemplo: granulometría, porosidad y permeabilidad.

□ Después del Ensayo

- *Inspección visual*

Al finalizar el ensayo, se desmonta la probeta como se ha indicado anteriormente, al ir extrayendo el material de filtro se presta especial atención a observar visualmente si existen signos de pérdida de finos por inestabilidad interna y si aparecen partículas de suelo base atrapadas entre las del filtro. Se debe anotar en la hoja de ensayo las incidencias más significativas como la profundidad a la que empieza a aparecer restos de suelo base o incluso, en aquellos casos en los que se emplea plastilina como material lateral, es posible apreciar fácilmente las zonas de arrastre del mismo.

- *Granulometría final*

En determinados ensayos se toma una muestra de filtro al finalizar el ensayo y se analiza su granulometría para detectar la presencia de finos procedentes de la arcilla o la posible pérdida por arrastre de algunas fracciones del propio filtro.

4.2.4 Criterios de “Éxito” o “Fracaso”

En la presente investigación se ha empleado el mismo criterio de Sherard para clasificar un ensayo como “Éxito” o “Fracaso”.

Al comenzar el ensayo NEF se le da rápidamente presión al agua y comienza a fluir a través del orificio practicado en la pastilla de suelo base de forma que la alta velocidad es capaz de arrancar y arrastrar partículas de éste y transportarlas hasta el filtro.

Normalmente al principio hay siempre un ligero escape de partículas de suelo base que dan lugar a que el agua salga con cierta turbidez, pero si el filtro es efectivo, rápidamente comienza a retener las partículas del suelo base de forma que el agua se aclara y el caudal se estabiliza. Si al desmontar la probeta se observa que el orificio no ha aumentado su diámetro, se debe a que la erosión ha sido prácticamente despreciable.

Este tipo de ensayos que reflejan que el filtro ha sido efectivo se denominan **“Éxito”**.

Sin embargo, si tras comenzar el ensayo y salir agua turbia por los arrastres de suelo base el filtro no es efectivo, se produce un exceso de erosión que se traduce en que el diámetro del orificio al final del ensayo ha aumentado fruto de la pérdida de material de suelo base. Es difícil cuantificar la variación del diámetro a partir de la cual el ensayo se considera **“Fracaso”**, pero se ha establecido en un diámetro superior a 1.6 mm, frente al milímetro del orificio inicial.

Es imprescindible aclarar que en muchas ocasiones el filtro es capaz finalmente de detener la erosión del suelo base de forma que el agua de salida se va aclarando progresivamente hasta terminar saliendo completamente clara y el caudal se estabiliza. Sin embargo, si el diámetro del orificio ha pasado de 1.6 mm se considera que la erosión es inadmisibles y el ensayo también se clasifica como “Fracaso”.

En algunos casos el comportamiento no es tan claro, habiéndose producido la estabilización muy rápidamente y sin embargo el orificio ha aumentado ligeramente entre 1 mm y 1.6 mm, aproximadamente. En estos casos el ensayo se considera **“Intermedio”** y es necesario observar otros parámetros como el caudal máximo instantáneo, el volumen total o realizar nuevos ensayos.

En todos los casos se emplea información adicional como los caudales de salida y la turbidez, datos que permiten decidir en los casos dudosos.

Como se puede ver, los criterios de Sherard son bastante estrictos, sin embargo hay investigadores que definen el éxito o fracaso en función de una cierta cantidad de suelo erosionado por unidad de superficie. Posiblemente esta identificación sea más razonable, pero el cualquier caso es importante mantener los mismos criterios para que los resultados de la presente investigación sean comparables con los de todos aquellos que hayan empleado la misma metodología.

En cualquier caso, aunque en la presente investigación se emplea el criterio de Sherard, en el análisis estadístico de los resultados se incluyen otros parámetros además del diámetro final del orificio, como por ejemplo el caudal máximo y medio

o el volumen total, etc., para poder distinguir entre un “fracaso” leve a un fracaso “agudo”, pero de forma cuantitativa.

4.3 Fases de la investigación

Durante todo el desarrollo de la presente investigación se ha seguido una metodología rigurosa que ha permitido estructurar el proceso en distintas etapas o fases, de forma que cada fase tiene sus objetivos, procedimiento y tareas a realizar, claramente definidos desde el primer momento.

Estas fases de la investigación suelen estar estructuradas y ordenadas de forma cronológica, pero en algunos casos las etapas se simultanean e incluso se alternan puesto que el proceso de la investigación no ha sido una secuencia unidireccional.

Las distintas fases de la investigación han quedado expresamente reflejadas en el índice de la Tesis de forma que cada capítulo representa una fase distinta.

Por lo tanto, la primera fase ha consistido en realizar un primer estudio de la situación actual del tema de las presas y en particular las presas de materiales sueltos, en el que se ha observado que la erosión interna era uno de los grandes problemas de estas construcciones y que se había realizado hasta el momento un importante esfuerzo investigador en todo el mundo. Esta fase se ha denominado de “**Introducción**” porque básicamente trata de centrar el interés investigador general sobre una cuestión más concreta.

Una vez fijado el interés en el estudio de la erosión interna, es preciso pasar a una segunda fase en la cual se pretende profundizar en el conocimiento actual de la ciencia y la técnica sobre esa cuestión, para lo cual es preciso realizar una “**Revisión de los Conocimientos**”, que empieza por los textos más cercanos, como el libro de Bravo (1995), pero rápidamente comienza una profunda investigación bibliográfica mediante el empleo de bases de datos, búsqueda temática en revistas técnicas

especializadas y seguimiento de las referencias bibliográficas contenidas en cada artículo estudiado.

Para esta tarea se ha contado con la colaboración del Servicio de Documentación del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, las bases de datos con acceso a través de la red de la Universidad de Granada, la búsqueda en Internet y los fondos de la biblioteca del CEDEX., así como el intercambio de información con otros investigadores, entre otras fuentes.

Esta fase de “Revisión de conocimientos” ha sido muy dinámica y prácticamente continuada a lo largo de toda la investigación, como lo exige la constante publicación de nuevos artículos especializados sobre la cuestión.

Una vez realizado un profundo estudio del estado del conocimiento actual sobre el tema de la erosión interna en presas de materiales sueltos y su protección mediante el empleo de filtros, se han destacado los puntos de controversia o desacuerdo entre los distintos investigadores así como las cuestiones no resueltas, de forma que se está en situación de poder plantear y concretar el título y el contenido general de la Tesis Doctoral: *“Variables que influyen en la eficacia de un filtro granular frente a la erosión interna de bases cohesivas”*.

Necesariamente esta concreción ha exigido centrarse en unas determinadas cuestiones y desestimar la investigación de otras, como por ejemplo el empleo de geotextiles como material de filtro o la modelización matemática.

La investigación continúa con el planteamiento de unos objetivos, jerarquizados en orden de prioridad, tal y como consta en el capítulo *“Objetivos de la Investigación”*.

Para poder cumplir estos objetivos se ha planteado desde el primer momento la *“Metodología”* a seguir, referida tanto al proceso mental de planteamiento y resolución del problema, como a la selección y organización de los medios empleados para ello. En esta fase se definen las estrategias para la identificación de

las variables influyentes que permiten diseñar el programa de ensayos y el análisis de resultados, así como la toma de decisiones en cada momento.

Una vez establecida esta metodología se pasa a la fase de “*Preparación y Ajuste del Ensayo*” que permite reunir todo el material necesario para los ensayos de laboratorio y realizar algunos ensayos previos con los que fijar los rangos de variación de los parámetros, el sistema de medida, el método operativo, las normas de realización de ensayos, etc. Aunque esta fase es muy breve, es fundamental para el resto de la investigación ya que un buen ajuste desde el primer momento evita cometer muchos errores que pueden dar lugar a la necesidad de desechar aquellos datos que no se han obtenido siguiendo un proceso correcto.

A pesar de esto, es inevitable que este “*Ajuste del Ensayo*” se continúe realizando durante toda la investigación en laboratorio ya que siempre es preciso ir realizando pequeñas modificaciones.

Una vez puesto a punto el método de ensayo y establecido el procedimiento a seguir, comienza la fase de la “*Investigación de Choque*” en la que con un reducido número de muestras se realizan distintas series de ensayos y sus variantes para identificar, inicialmente sólo de forma cualitativa, algunas de las variables influyentes.

De esta forma se puede indicar qué caminos se deben seguir con las demás muestras y cuáles no. Así por ejemplo, sin en la *Investigación de Choque* se observa que la humedad del suelo base tiene una clara influencia en el resultado de los ensayos, a continuación se comprueba con las demás muestras, en caso contrario se desecha dicha variable. Por supuesto que en los casos intermedios siempre se programan más ensayos de verificación.

También en esta fase de *Investigación de Choque* se realiza una caracterización de los filtros y bases a emplear en los ensayos para poder ir estudiando posibles relaciones entre distintas variables y comprobar la validez de los criterios empíricos de diseño de filtros existentes.

Pero el objetivo fundamental de esta fase es de tipo cualitativo, es decir, se pretende ir distinguiendo entre “camino abierto” o “camino cerrado” a la posterior *Investigación de Fondo*.

Finalizada la fase de “*Investigación de Choque*” y analizadas sus conclusiones, se procede a revisar las condiciones de partida por si es preciso realizar alguna modificación, sea de los objetivos o la metodología. Esta fase se ha denominado precisamente “*Modificación de las Condiciones de Partida*” y pretende emplear la información y experiencia obtenida en las fases anteriores para tratar de optimizar la investigación restante.

Una vez revisado y actualizado todo el proceso se puede pasar a la fase que se ha denominado de “*Investigación de Fondo*”, en la que ya se completa el estudio a todas las muestras disponibles y todos los estudios programados.

Es interesante destacar que la *Investigación de Fondo* siempre precede a la de *Choque*, pero ambas se van alternando en el tiempo, es decir, en la *Investigación de Choque* se estudia la influencia de una variable determinada y si es seleccionada, se pasa a la *Investigación de Fondo*. A continuación se escoge otra variable y se estudia primero en la *Investigación de Choque* y después en la de *Fondo*, y así sucesivamente.

Esto permite avanzar progresivamente obteniendo conclusiones parciales y además poder controlar condicionantes externos como plazo y disponibilidad de recursos.

En la fase de *Investigación de Fondo* se busca obtener conclusiones no sólo cualitativas, sino también cuantitativas, para lo cual se realiza un completo análisis estadístico de los resultados de forma que se puedan identificar relaciones entre distintas variables.

Ante la posibilidad, por ejemplo, de que al relacionar unas variables del filtro con otras del suelo base, se esté enmascarando una dependencia entre las propias

variables de cada uno, es preciso realizar previamente un análisis estadístico exclusivo para el filtro y otro para las bases.

Todos estos estudios deben permitir obtener unas *Conclusiones* que se exponen precisamente en el capítulo denominado así, y posteriormente se plantean las posibles *Líneas Futuras de Investigación*, en función de los nuevos interrogantes que siempre se plantean al resolver una cuestión.

5 PREPARACIÓN Y AJUSTE DEL ENSAYO

5.1 Introducción

A pesar de que el ensayo ideado por Sherard y Dunningan (1985) tiene en la actualidad una amplia difusión en el ámbito mundial, no se encuentra aún normalizado por lo que existe una cierta indefinición respecto al procedimiento a seguir, de hecho, en las investigaciones en las que se ha empleado este ensayo no se especifica un método exacto ni siquiera el material necesario.

Por todo ello, como fase previa a la investigación, se ha programado una serie de ensayos de prueba para permitir, entre otras cosas, comprobar el funcionamiento de la instalación necesaria y detectar las posibles dificultades para evitarlas o corregirlas en la medida de lo posible.

Esta puesta a punto se ha llevado a cabo en tres ámbitos:

- 1.- Instalaciones
- 2.- Preparación del ensayo
- 3.- Ejecución del ensayo

Dado que el laboratorio se encontraba en la Presa del Portillo (Castril), en esta primera fase se ha empleado exclusivamente material base arcilloso obtenido de la misma cantera que el utilizado en la construcción del núcleo de esta presa, dada la fácil disponibilidad del mismo y teniendo en cuenta que en esta fase lo que se pretende no es interpretar los resultados del ensayo, sino lo referente a su preparación y ejecución.

5.2 Objetivos

A continuación se exponen de forma esquemática los objetivos parciales de la fase de preparación y ajuste del ensayo.

5.2.1 Respecto a las instalaciones

- Reunir todo el material necesario y montarlo adecuadamente
- Realizar los ajustes necesarios
- Comprobar el correcto funcionamiento

5.2.2 Respecto a la preparación del ensayo

- Conseguir la humedad precisa de las muestras
- Conseguir los espesores precisos
- Conseguir la compactación precisa
- Conseguir la granulometría precisa

5.2.3 Respecto a la ejecución del ensayo

- Fijar el método y precisión necesaria en la medida de caudales en función del rango de variación observado
- Fijar el método y precisión necesaria en la medida de la turbidez en función del rango de variación observado
- Fijar la duración del ensayo así como los tiempos de lectura
- Elaborar unas “normas para la realización de ensayos NEF”

5.3 Resultados

5.3.1 Instalaciones

Se han realizado un total de siete ensayos de prueba en los que no se han medido ni las humedades ni los espesores de las muestras, sino que lo que interesaba era comprobar el material necesario y el funcionamiento de la instalación, (bomba, manómetro, mangueras, etc.). También se han tomado muestras del agua de salida del ensayo con objeto de fijar el método para medir cuantitativamente su turbidez mediante la técnica de la nefelometría. El resultado de estas pruebas ha permitido fijar el diseño de la instalación así como la forma adecuada de manejo de la misma y realizar el esquema definitivo que se recoge en el apartado de “*Conclusiones*”.

5.3.2 Preparación del ensayo

Posteriormente se ha llevado a cabo una serie de diez ensayos en la que se han dado todos los pasos necesarios para obtener el espesor, humedad, densidad y granulometría de la muestra ensayada según las especificaciones fijadas anteriormente.

Así por ejemplo, para conseguir que la pastilla de material de base tenga un espesor de una pulgada después de compactar, es preciso ir tanteando el peso inicial de muestra húmeda. Lo mismo se ha realizado con la muestra de filtro de forma que así se evita tener que retirar material una vez finalizada la compactación lo cual produciría tal distorsión que el ensayo dejaría de ser válido. Por supuesto que estos tanteos previos se repiten cada vez que se ensaya una muestra de material de base diferente.

En la tabla siguiente se puede ver la diferencia entre el valor previamente especificado para cada variable y el realmente obtenido, lo cual permite por un lado perfeccionar el método y por otro, fijar la precisión alcanzable. Como se ve, al principio fue difícil conseguir sobre todo la humedad de la muestra base y su espesor

adecuados, pero en las siguientes series de ensayos se tomaron las medidas oportunas para conseguirlo tal y como se describe en el apartado de *Conclusiones*.

	Humedad Filtro (%)	Humedad Base (%)	Espesor Filtro (cm)	Espesor Base (cm)	Dens. Seca Filtro (gr/cm ³)	Dens. Seca Base (gr/cm ³)
ESPERADO	2,50	14,70	10,16	2,54	N.P.	N.P.
NEF-2	2,67	17,63	10,20	2,30	1,97	2,06
NEF-3	2,56	15,92	9,80	2,30	1,98	1,85
NEF-4	2,35	14,69	10,05	2,40	2,03	1,90
NEF-5	2,88	14,80	10,07	2,44	1,99	1,89
NEF-6	3,48	14,07	10,00	2,35	1,97	2,10
NEF-7	2,76	15,41	10,08	2,37	1,95	1,85
NEF-8	2,57	13,36	10,11	2,29	1,97	2,05
NEF-9	2,48	13,98	10,62	2,51	1,85	1,90
NEF-10	2,31	10,65	11,00	2,72	1,81	1,81
MAXIMO	3,48	17,63	11,00	2,72	2,03	2,10
MINIMO	2,31	10,65	9,80	2,29	1,81	1,81
MEDIA	2,67	14,50	10,21	2,41	1,95	1,93
DESV.TIP.	0,35	1,92	0,37	0,14	0,07	0,11

Tabla 9.- Ajustes de la humedad, espesor y densidad de las muestras

Esta serie de ensayos también ha servido para fijar el instrumental necesario como por ejemplo balanzas, recipientes y demás utensilios, tal y como se especifica en el ANEJO 12.1.

5.3.3 Ejecución del ensayo

Tras realizar los ensayos de la fase de *Preparación y Ajuste del Ensayo* se ha fijado la forma de realizar el ensayo NEF, así como el material necesario, tal y como se describe en el ANEJO12.1, pero además es necesario fijar el criterio de *Éxito/Fracaso*.

Como ya se ha comentado anteriormente, en el ensayo NEF de Sherard y Dunningan (1985) se exige, para considerar que un filtro ha funcionado, la ausencia de erosión, es decir, que el orificio practicado en la pastilla de suelo base se mantenga con el diámetro inicial, 1 mm.

Al realizar los primeros ensayos se ha comprobado que efectivamente el diámetro del orificio representa muy bien el comportamiento del sistema base-filtro. Así por ejemplo, en la FOTO 19 se observa el orificio intacto después de finalizar el ensayo, mientras que en la FOTO 23, (correspondiente al ensayo NEF-PVI con la base BP-C1 y el filtro FP-10/1.3), el diámetro ha aumentado hasta 1.78 mm.

Pero además del orificio final, es interesante comprobar la evolución de los parámetros medidos durante la ejecución de un ensayo NEF, en particular, tiene un gran interés el estudiar de qué forma varía el caudal de salida y la turbidez a lo largo del tiempo y cómo esta variación puede permitir conocer el comportamiento del filtro en cada momento.

Así por ejemplo, en el ensayo NEF-3 se ha empleado la base BP-C1 con el filtro FP-20/1.1, en condiciones “Estándar”. Al final de los 20 minutos que dura el ensayo, el orificio de salida practicado en la pastilla de suelo base fue de 1.78 mm, frente al milímetro inicial, habiéndose recogido un volumen total de 4290 cm³.

Según el criterio de *Éxito/Fracaso*, este ensayo debería considerarse como *Fracaso*, ya que la erosión es significativa, sin embargo es preciso observar la evolución de los caudales y la turbidez del agua efluente.

La forma más sencilla de medir la turbidez es mediante apreciación visual, para lo cual se ha establecido una escala de turbidez mediante muestras de referencia denominadas “muy turbia”, “turbia”, “algo turbia”, “casi clara” y “clara”. Por supuesto que esta clasificación es totalmente arbitraria y sólo sirve como valoración cualitativa.

En la FOTO 16 se observa perfectamente como al comienzo del ensayo el agua sale turbia pero rápidamente se aclara lo que denota el buen funcionamiento del filtro.

Sin embargo, la mejor forma de estudiar el fenómeno de la erosión interna es tomando medidas cuantitativas de turbidez a partir de las muestras del agua de salida.

Esta turbidez se ha medido mediante el método de la nefelometría, descrito en el ANEJO.12.2.

Con esta medición cuantitativa se ha realizado la gráfica siguiente que muestra la evolución del caudal de salida y su turbidez a lo largo del ensayo:

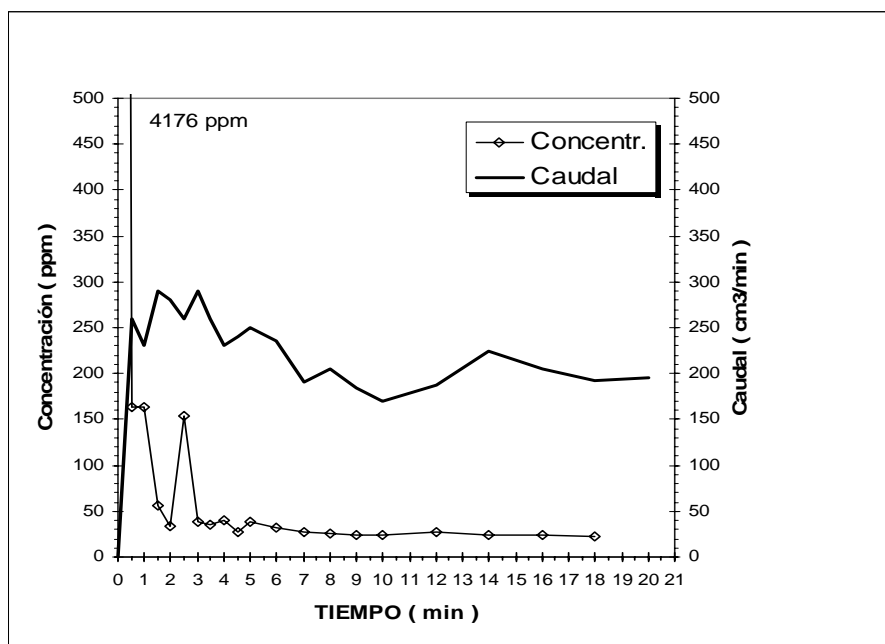


Gráfico 1.- Ensayo NEF-3: Evolución del caudal y la concentración del agua de salida

Como se puede ver, al comenzar el ensayo sale un caudal de 260 cm³/min que tiene una ligera subida para luego bajar y estabilizarse, no sin cierta fluctuación, a modo de onda.

En cuanto a la concentración de sólidos, es muy alta al comenzar el ensayo, con 4176 ppm, de modo que se sale incluso de las curvas de calibrado, (por lo que antes de medir la turbidez hubo que diluir la muestra); sin embargo baja rápidamente a 34 ppm. Esto indica claramente que el filtro ha atrapado a las partículas de suelo base y a detenido la erosión.

A continuación se produce una subida en la concentración para volver a baja hasta quedar prácticamente estabilizada. Esto puede interpretarse como un destaponamiento súbito, con gran arrastre y nueva estabilización.

Por lo tanto, aunque la erosión sufrida es demasiado alta y por tanto el ensayo debe calificarse como *Fracaso*, en realidad el filtro ha funcionado, queda la duda si la erosión sufrida sería admisible en una Presa real.

En cualquier caso, en la presente investigación se va a aplicar el riguroso criterio *Éxito/Fracaso* de Sherard y Dunningan (1985), pero estas gráficas permiten conocer mejor el proceso.

Como ejemplo de "*Fracaso*" se puede mostrar el ensayo NEF-5, en el que se utilizó también la arcilla BP-C1 pero con el filtro 20/1.2, siendo en este caso el diámetro final del orificio de 1.82 mm y el volumen total de 5230 cm³.

También se realizó el ensayo NEF-9, con el filtro FP-5/1.2, por lo que es interesante observar la evolución de la concentración en los tres ensayos de forma conjunta, tal y como se representa en el siguiente gráfico:

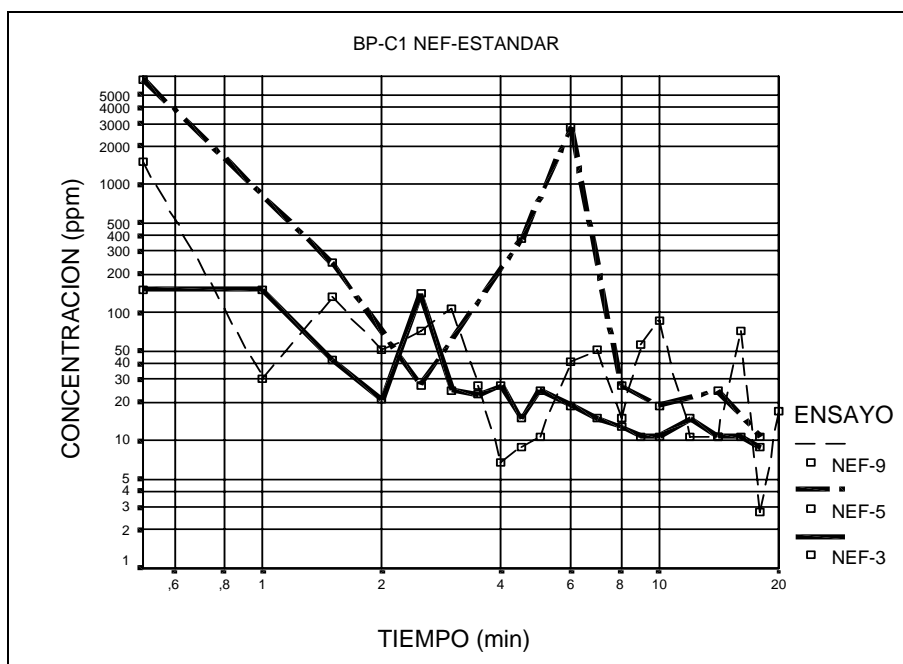


Gráfico 2.- Base BP-C1: Evolución de la concentración con el tiempo

Como se puede ver, se ha empleado en esta ocasión doble escala logarítmica para permitir abarcar el rango de valores completo.

Efectivamente en los tres ensayos se observa una clara tendencia descendente pero con ciertas oscilaciones, siendo llamativo el hecho de que la concentración final es muy similar en todos los casos, lo que refleja que el filtro acaba consiguiendo detener la erosión, aunque si ésta ha sido excesiva, el ensayo debe calificarse como “*Fracaso*”.

En cuanto a la evolución del caudal, se tiene:

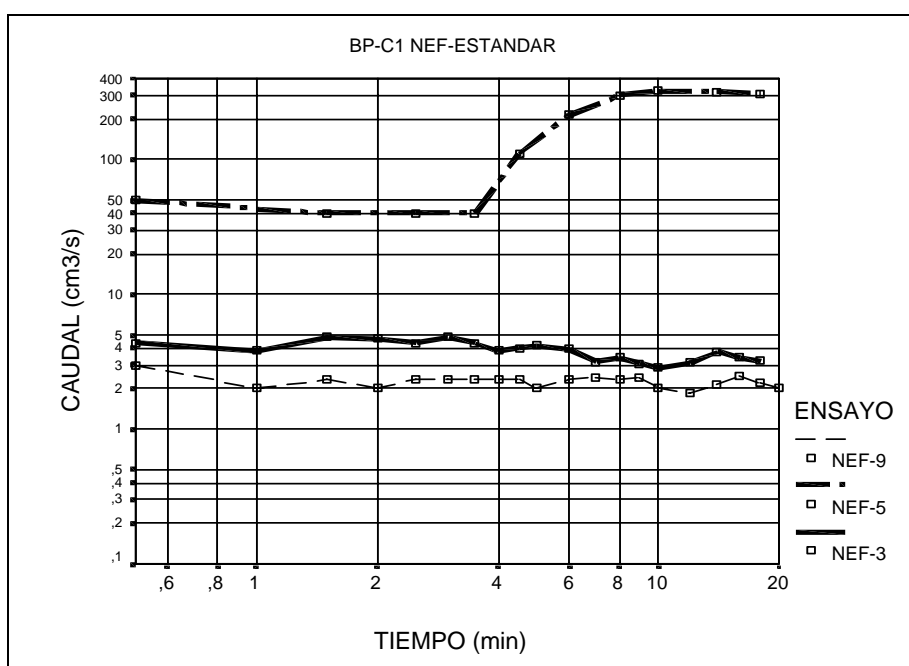


Gráfico 3.- Base BP-C1: Evolución del caudal con el tiempo

Queda por tanto claro que las gráficas de caudal-concentración-tiempo tienen gran utilidad para el estudio del fenómeno de la erosión interna simulada mediante ensayo de laboratorio.

5.4 Conclusiones

A continuación se exponen de forma esquemática las conclusiones de la fase de preparación y ajuste del ensayo, incluidas también en las referencias Delgado et al. (1999 y 2000).

5.4.1 Respecto a las instalaciones

- Es conveniente que la probeta del ensayo NEF se pueda emplear también en los ensayos de permeabilidad. De esta forma la compactación de los filtros en ambos ensayos es idéntica y se puede utilizar el mismo instrumental, (mesa vibrante, sobrecarga, etc.).
- Junto al conducto de entrada de agua en la probeta, es recomendable colocar un conducto con llave para facilitar la maniobra de purgado de aire del interior de la misma.
- Aunque se disponga de suministro de agua corriente, es mejor emplear un depósito graduado de unos 150 litros de capacidad. Esto permite una cierta independencia del suministro ante posibles cortes del mismo, poder tomar muestras del agua empleada en los ensayos, tener un control del volumen consumido en los ensayos de larga duración y prevenir frente a posibles variaciones accidentales de calidad del agua.
- En cualquier caso, la toma de agua debe estar protegida con un filtro para evitar la entrada de sólidos en la probeta de ensayo. (Ha dado muy buen resultado envolver la entrada de la tubería de aspiración de la bomba con un geotextil protegido con una malla de plástico)

5.4.2 Respecto a la preparación del ensayo

5.4.2.1 *Filtro ensayado*

- La muestra de filtro se debe fabricar a partir de las distintas fracciones lavadas por el tamiz 0.08 mm UNE, salvo en el caso de que se ensaye filtros reales puestos en obra. De esta forma se consigue un mejor control de la granulometría del filtro. Está comprobado que un cierto contenido de finos es favorable al funcionamiento del filtro, por lo que quitarlos supone quedar del lado de la seguridad.
- El material de filtro se debe caracterizar mediante su granulometría por tamizado, peso específico, equivalente de arena y naturaleza.
- Es muy importante determinar la permeabilidad del filtro para distintos grados de compactación.
- La compactación del filtro se debe determinar por el método de la densidad relativa propuesto por el “Bureau of Reclamation” (1980), ya que el ensayo próctor no es aplicable a estos materiales. (La mayoría de los autores no especifican claramente el grado de compactación alcanzado por los filtros, con lo cual los resultados no pueden ser comparables).
- Al compactar el filtro por vibración, puede producirse rotura de partículas y por lo tanto variación en la granulometría original. Este efecto es muy peligroso porque puede falsear los resultados. Para controlarlo, se deben realizar granulometrías del filtro después de la compactación y compararlas con la inicial.
- Cuando se vaya a ensayar un filtro de granulometría dada, a partir de la recomposición de distintas fracciones, es muy importante fabricar sólo la cantidad que se va a emplear en un ensayo, más un sobrante para determinarle la humedad. De esta forma se reduce el número de operaciones de cuarteo necesarias y se evita la segregación.

5.4.2.2 Suelo base ensayado

- El suelo base ensayado se debe cortar por el tamiz de 5 mm UNE, ya que la fracción más gruesa no tiene influencia en los resultados.
- Es muy importante realizar una caracterización completa del suelo base, que aparte de los ensayos convencionales, contenga la granulometría por sedimentación con y sin dispersante, para tratar de conocer la tendencia a formar grumos.
- Para conseguir la humedad deseada, es imprescindible mantener en cámara húmeda la muestra hasta que el agua se distribuya homogéneamente. Dado que este proceso es lento (al menos 24 horas), se debe preparar muestra para varios ensayos y cuartearla en cada uno de ellos. En este caso es menos probable la segregación.

5.4.2.3 Preparación del ensayo

- Al compactar el filtro por vibración es frecuente que partículas finas se introduzcan por el contacto del soporte de aluminio que se emplea para sujetar la probeta a la mesa vibrante, con lo que se hace muy difícil retirarlo posteriormente. Para evitarlo da muy buen resultado cubrirlo con un círculo de papel de filtro.
- En la última tongada de filtro hay que tener la precaución de que no aparezcan partículas gruesas coincidiendo con lo que será el orificio de la muestra de suelo base.
- Para poder colocar el material lateral de arena más fina que el filtro en la última tongada, se ha fabricado un pequeño encofrado circular concéntrico respecto a la probeta que se sostiene con un alambre y se rellena de arena fina (0.32-0.16 mm) mediante un pequeño embudo y un tubo. En el espacio interior se introduce posteriormente el material de filtro correspondiente a la última tongada.

- Para evitar la pérdida de finos del filtro adheridos a la pesa de compactar se debe limpiar cuidadosamente con una brocha.
- Para enrasar cada tongada de filtro o de material de base, se utiliza una espátula metálica de cabeza ancha.
- Para realizar el orificio en la muestra de material base y que este esté siempre en la misma posición, se ha fabricado con madera una plantilla que permite adaptar a la probeta el sistema empleado en el ensayo de Pin-hole.
- Para tranquilizar la entrada de agua y evitar corrientes preferentes se coloca grava limpia y esta a su vez se separa de la muestra de material de base mediante un discomalla para evitar un posible punzonamiento.
- Antes de dar presión, se debe llenar de agua cuidadosamente la probeta comprobando que no queden burbujas de aire que puedan distorsionar el régimen hidráulico. Esta operación es complicada y lenta.
- Para disminuir la dispersión en los espesores se calculan las densidades húmedas después de compactar, y a partir de ahí se saca el peso de muestra húmeda que hay que introducir
- Aunque algunos autores realizan el orificio de la muestra de suelo base colocando una aguja antes de introducir la muestra, es más sencillo perforarlo después de compactar. (FOTOS 11 y 12)
- En este caso es muy importante introducir la aguja unos 5mm en el filtro para evitar que la salida quede obstruida.
- Es fundamental colocar un discomalla sobre la superficie de la pastilla de suelo base para evitar el punzonamiento de la grava que se coloca para tranquilizar el agua. (FOTO 14 y 15)

5.4.3 Respecto a la ejecución del ensayo

5.4.3.1 *Durante el ensayo*

- La erosión de la muestra de suelo base se produce en los primeros instantes, por lo que es suficiente con una duración del ensayo de 20 minutos.
- En todos los ensayos realizados se observa que el proceso de erosión de la base e interceptación por el filtro tiene lugar en los primeros instantes, por esa razón se toman las lecturas cada 30 segundos durante los cinco primeros minutos, cada 60 segundos durante los cinco siguientes y cada 120 segundos durante los 10 minutos restantes.
- En cada intervalo se debe anotar el caudal, la turbidez y las observaciones pertinentes
- Es recomendable medir la turbidez mediante turbidímetro, en ese caso es necesario realizar una curva patrón inicial para cada tipo de suelo base, y tomar muestras de agua en cada intervalo.
- En cualquier caso se deben también realizar apreciaciones visuales de la turbidez. Para evitar imprecisiones se debe fabricar previamente una serie de muestras patrón según los grados de turbidez, (ej. muy turbia, turbia, algo turbia, casi clara y clara). También es preciso disponer de buena iluminación e incluso de una pantalla de luz blanca.
- Dado la enorme variación del rango de medida de los caudales efluentes, se debe tener un juego de probetas de distinta capacidad y precisión para adaptarse a cada caso.
- Para la realización del ensayo es suficiente con dos personas, una toma las lecturas y la otra se encarga del llenado y vaciado de probetas de medida de volumen de agua de salida

5.4.3.2 Interpretación de los resultados

- Finalizado el ensayo, se procede a desmontar la probeta. El filtro se recupera inicialmente sacándolo con espátula, pero cuando se está cerca de la pastilla de suelo base es preciso proceder con sumo cuidado para no dañarla. Para conseguirlo se debe extraer la parte final del filtro con un suave chorro de agua. (FOTO 17)
- La pastilla de suelo base se recupera presionando en la superficie de aguas arriba con la sobrecarga empleada en la compactación por vibrado. Esta operación es muy delicada ya que si se deforma el orificio el ensayo queda anulado. (FOTO 23)
- Para medir el diámetro final del orificio es recomendable emplear un calibre y una lupa.
- El ensayo NEF es muy sensible. El paso de ÉXITO a FRACASO tiene lugar con una variación de 0.1 mm en el D_{15F} del filtro. Sin embargo es bastante probable encontrar algunos resultados “erráticos” debidos sobre todo a la posibilidad de que se produzcan fenómenos de obstrucciones debidas al desprendimiento casual de grumos, o coincidencia de varias partículas gruesas junto al orificio de la pastilla de suelo base. Inevitablemente el resultado viene representado por una nube de puntos en la cual a veces se pueden descartar resultados considerados como anómalos.

Todas estas conclusiones han dado lugar a la redacción de unas “*Normas para la Ejecución de Ensayos NEF*”, que se pueden consultar en el ANEJO 12.1.

6 INVESTIGACIÓN DE CHOQUE

6.1 Introducción

Una vez finalizada la puesta a punto del ensayo, se ha programado la siguiente fase de la investigación en la cual se pretende poder enmarcar dentro de unos límites un poco más precisos las posibles conclusiones a obtener para determinar el camino a seguir en la *Investigación de Fondo*.

En esta fase de *Investigación de Choque* sólo se ha empleado la arcilla de la Presa del Portillo, ya que por la ubicación del laboratorio en esta presa, era la que presentaba mayor disponibilidad y además tiene una granulometría y plasticidad con valores medios respecto a las bases de las otras presas seleccionadas.

Se han caracterizado las muestras de suelo base ensayadas así como los filtros que se van a emplear en la presente investigación para poder realizar correlaciones entre las distintas variables.

A continuación, mediante la realización de distintos ensayos con las arcillas del Portillo, se trata de detectar la influencia positiva o negativa de las distintas variables, de forma que en principio sólo se atiende a su influencia **cuantitativa**. Por ejemplo, si en esta fase se comprueba que se obtiene el mismo resultado empleando distintas energías de compactación en la muestra de suelo base, esto permite desechar esta variable y no comprobarla con otras muestras. En caso contrario, si se observa alguna diferencia del resultado en un sentido u otro, se debe programar, en la *Investigación de Fondo*, una serie de ensayos donde se compruebe este comportamiento con otras bases diferentes, y a ser posible, que permita **cuantificar** la influencia relativa de la variable correspondiente.

6.2 Objetivos de la Investigación de Choque

6.2.1 Respecto a las instalaciones

- Comprobar de nuevo el correcto funcionamiento de la instalación

6.2.2 Respecto al ensayo de filtros sin erosión (NEF)

- Ajustar cuantitativamente el criterio “EXITO/FRACASO” de un ensayo
- Estudiar el proceso de erosión interna simulado en el ensayo NEF
- Comprobar la idoneidad de los parámetros seleccionados

6.2.3 Respecto al material de Filtro

- Caracterizar las distintas muestras de material de filtro ensayadas, (granulometría, permeabilidad, peso específico, mineralogía, etc.)
- Realizar un estudio estadístico que permita establecer relaciones de las variables del propio filtro entre sí
- Determinar las variables influyentes y no influyentes en los resultados de los ensayos de filtros sin erosión

6.2.4 Respecto al material de suelo base

- Caracterizar las distintas muestras de material de suelo base ensayadas, (granulometría, permeabilidad, plasticidad, dispersabilidad, peso específico, mineralogía, etc.)
- Comparar los resultados de los ensayos con los criterios de diseño de otros investigadores

- Determinar las variables influyentes y no influyentes en los resultados de los ensayos de filtros sin erosión

6.3 Descripción de las muestras ensayadas

6.3.1 Filtro

Como ya se ha comentado anteriormente, el material granular que se ha empleado como filtro en la presente investigación procede en su totalidad del utilizado en la construcción de la Presa del Portillo, sobre el río Castril, en el norte de la provincia de Granada.

Se trata de un material calizo procedente de la cantera denominada de “Los Aviones”, situada en la margen izquierda del río Castril, unos seiscientos metros aguas arriba de la Presa.

La extracción del material calizo de la cantera se realizó mediante voladura, siendo posteriormente transportado en dumpers extraviales hasta una planta de procesamiento de áridos situada en la margen derecha, a unos trescientos metros de la presa. En esta planta, la escollera caliza fue sometida a varios procesos de trituración, lavado y clasificación hasta obtener el material de filtro fino según las exigencias del Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del Proyecto de Construcción de la Presa del Portillo. El peso específico de las partículas del filtro es de 2.69 gr/cm^3 , con una absorción del 0.86% y un 66.3% de carbonatos. El material obtenido es bastante limpio, con un equivalente de arena del 83.86%.

Partiendo de ese filtro ya fabricado, para la presente investigación se procede al lavado por el tamiz de abertura 0.08 mm de la serie UNE, para eliminar la fracción fina, tal y como especifica Sherard en sus trabajos (1982 y 1985). Posteriormente se tamiza el filtro para descomponerlo en sus distintas fracciones empleando la serie de tamices UNE con las siguientes aberturas: 20.00, 10.00, 6.30, 5.00, 2.50, 1.25, 0.63, 0.32, 0.16, y 0.08 ; estando todas estas cifras expresadas en milímetros.

Se ha analizado la mineralogía por difracción de rayos x de cada fracción del filtro, obteniéndose los siguientes resultados:

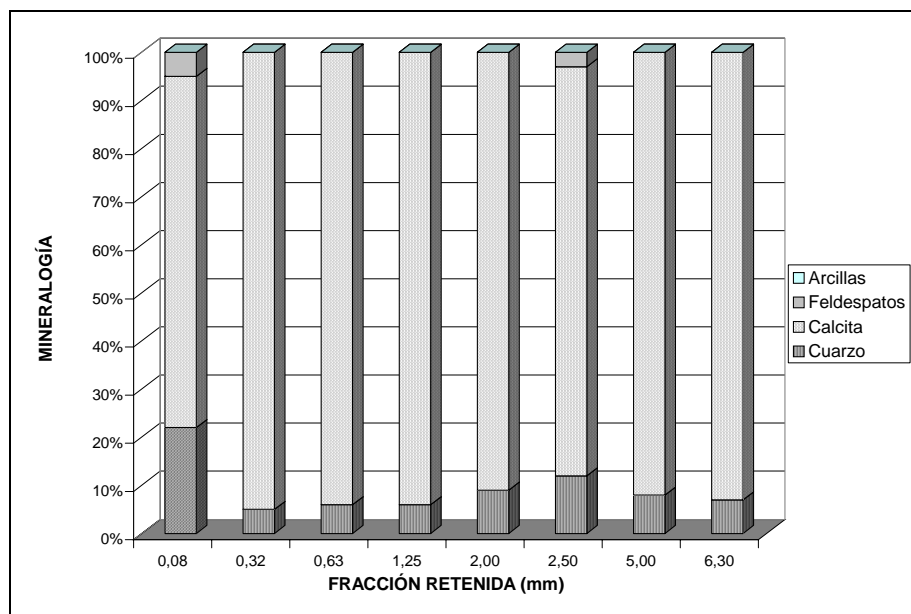


Gráfico 4.- Mineralogía de las fracciones que componen el filtro

Como se puede ver, predomina claramente la calcita en todas las fracciones, apareciendo pequeñas cantidades de cuarzo, mientras que los feldespatos son minoritarios y no aparece nada de arcilla. Salvo en la fracción retenida por el tamiz 0.08 mm, la mineralogía del resto de las fracciones es cualitativa y cuantitativamente análoga, las escasas diferencias porcentuales son, según el Prof. Ortega, autor de los ensayos, inherentes a la precisión del método empleado.

Con las distintas fracciones, se recompone la granulometría deseada, teniendo todas las muestras curvas granulométricas lineales en papel semilogarítmico, definidas por el mayor tamiz por el que pasa el 100% del material, denominado D_{100} , y el mayor tamiz por el que pasa el 15%, en este caso llamado D_{15F} .

Es importante señalar que el emplear siempre granulometrías lineales supone una restricción importante, ya que por ejemplo Lafleur et al (1989), hablan del efecto de la forma de la curva granulométrica del filtro. Sin embargo con esta decisión se ha

pretendido reducir el campo de estudio para tratar de obtener unos resultados menos dispersos, dada la amplitud de variables que se quieren estudiar. Por otro lado, el emplear granulometrías lineales es relativamente frecuente en otros investigadores.

Al ser la granulometría lineal, (en papel semilogarítmico), cada filtro queda definido por el D_{100F} y el D_{15F} , ya que todos los demás diámetros característicos (ej. : D_{5F} , D_{10F}, \dots, D_{xF}) se pueden calcular matemáticamente según la siguiente fórmula de interpolación :

$$D_x = \frac{D_{100}}{10^{\left[\frac{(100-x) * \left(\log \frac{D_{100}}{D_{15}} \right)}{100-15} \right]}} \quad \text{Ecuación 67}$$

También es interesante señalar que el coeficiente de uniformidad viene determinado al fijar el D_{100F} y el D_{15F} , disminuyendo como es lógico, al aumentar el valor del D_{15F} . El coeficiente de uniformidad, Cu , se puede calcular matemáticamente usando la siguiente expresión :

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \left(\frac{D_{100}}{D_{15}} \right)^{\left(\frac{60-10}{100-15} \right)} = \left(\frac{D_{100}}{D_{15}} \right)^{0.5882} \quad \text{Ecuación 68}$$

A continuación se puede ver las granulometrías de algunas muestras de filtro:

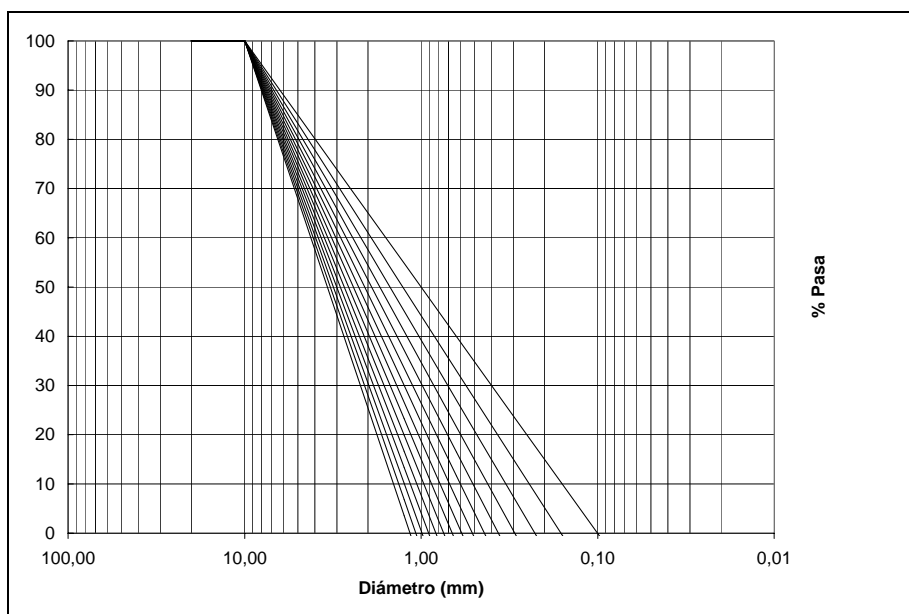


Gráfico 5.- Granulometrías de algunos filtros ensayados: $D_{100F} = 10\text{mm}$

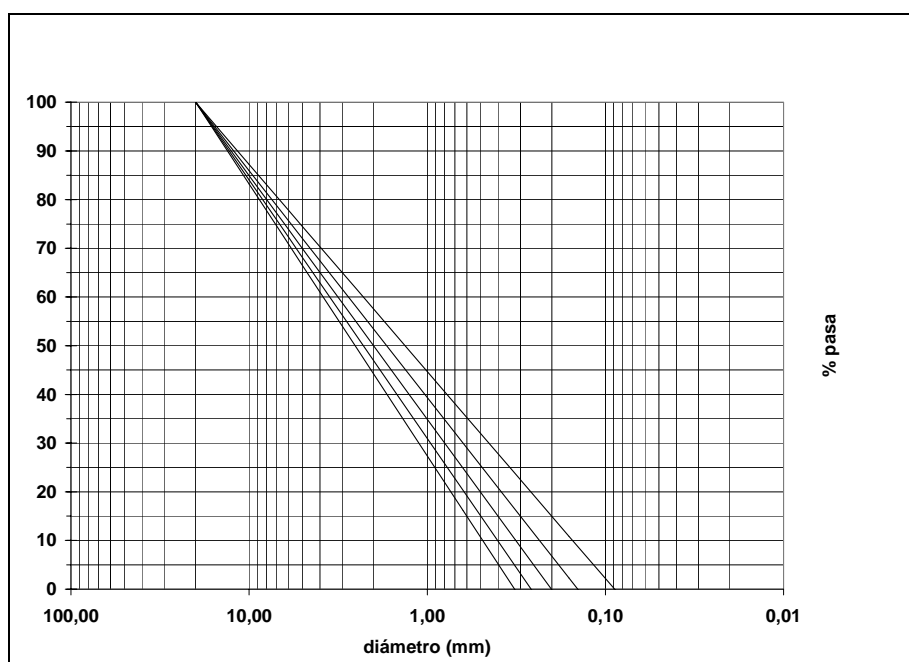


Gráfico 6.- Granulometrías de algunos filtros ensayados: $D_{100F} = 20\text{mm}$

Además de la granulometría, resulta muy interesante conocer la permeabilidad de cada muestra de filtro, ya que algunos autores (Vaughan y Soares 1982) defienden

que es ésta última la que de verdad gobierna el fenómeno de interceptación de partículas de suelo base en el interior del filtro.

Es claro que la permeabilidad depende a su vez de la granulometría, pero es importante destacar que también depende de la compactación del filtro, por lo que en la presente investigación se ha medido para distintas compactaciones: sin compactar, compactado con una sobrecarga de 9,071 kg. vibrando durante 15 segundos por tongada, con 60 segundos de vibración y con 120 segundos, respectivamente. De esta forma se trata de medir la densidad y permeabilidad reales en el ensayo de filtros sin erosión, para posteriormente tratar de sacar conclusiones sobre la influencia de estas variables en el comportamiento de un filtro a la hora de proteger a una determinada muestra de suelo base.

6.3.2 Suelo Base

6.3.2.1 Introducción

En esta fase de la *Investigación de Choque* se ha utilizado como muestra de suelo base el material empleado en la construcción del núcleo impermeable de la Presa del Portillo, puesto que, como ya se ha comentado anteriormente, el laboratorio se encontraba a pié de obra y por tanto la disponibilidad de este material era más abundante. Además hay que señalar que las características del suelo base del Portillo se pueden considerar medias con respecto a la totalidad de las muestras ensayadas en la presente investigación, por lo que los resultados obtenidos en esta primera fase son bastante representativos. Por otra parte, es interesante insistir en que todas las muestras ensayadas en la presente investigación corresponden a materiales reales empleados en la construcción de distintas presas, por lo que, antes de pasar a describir las muestras empleadas en la *Investigación de Choque*, se van a resumir las características medias del material del núcleo impermeable de la presa del Portillo.

La Presa del Portillo, sobre el río Castril, es de materiales sueltos, heterogénea, con espaldones de escollera caliza y núcleo impermeable vertical, con 4 metros de

anchura en coronación y taludes $\frac{1}{4}$ aguas arriba y $\frac{1}{3}$ aguas abajo. La altura total de la presa es de 83 metros, estando el núcleo situado a medio metro por debajo del nivel de coronación.

El material empleado en la construcción del núcleo¹⁵ es una marga con tamaño máximo de 15 mm, un 84.1% de finos inferiores al tamiz 0.08mm UNE y un 26% de fracción arcillosa (tamiz 0.002mm UNE).

La marga tiene una humedad óptima, según el ensayo próctor normal, del 14.9%, con una densidad máxima de 1.84 gr/cm^3 , habiéndose colocado en obra con una humedad media del 15.8%. En cuanto a la plasticidad, el límite líquido es del 32.1% y el plástico del 17.8%, lo que da un Índice de Plasticidad del 14.3%.

Es un material cohesivo, con una cohesión de 0.2 Kg/cm^2 y un ángulo de rozamiento de 26° , ambos valores obtenidos del ensayo triaxial. En cuanto a su composición, este suelo base tiene un 32.85% de carbonatos, 2.1% de sulfatos y 1.41% de sales solubles.

Para terminar con este resumen de características medias, decir que la permeabilidad es de $1.20\text{E}-07 \text{ cm/s}$ y que la muestra no es dispersiva, (según el ensayo “pin-hole”).

Para su puesta en obra, una vez excavado el material de la cantera situada en el propio vaso del embalse, a unos 100 metros aguas arriba de la presa, se procede a la remoción y humectación previa para tratar de romper los terrones y algunos fragmentos de mayor tamaño de marga más resistente.

Con el fin de conseguir la meteorización completa y la homogeneización, la marga humectada se mantiene en acopio intermedio durante una semana y posteriormente se carga y transporta al tajo. Una vez allí, se extiende con bulldozer y se compacta con rodillo “pata de cabra”, en tongadas de 30 cm. de espesor final. La humedad de puesta en obra es la óptima más 1%, salvo en los estribos que se coloca a la humedad

¹⁵ valores medios del material puesto en obra

óptima más 2%, con el objeto de tener mayor deformabilidad en el contacto con el terreno.

Estas condiciones de puesta en obra se han reproducido en la investigación para que los resultados obtenidos sean lo más representativos posible. En este caso, la marga se remueve y humecta previamente, dejándose reposar en la cámara húmeda hasta conseguir la humedad indicada (la óptima más 1% en los ensayos “ESTANDAR”). De esta forma se evita añadir agua en el momento del ensayo, ya que no habría garantías de homogeneidad.

Como ya se ha comentado anteriormente, en la puesta a punto del ensayo se empleó como muestra de suelo base el material obtenido de la cantera del Portillo, cata número 1, denominada con la clave “BP-C1”, (**B**ase del **P**ortillo – **C**ata nº**1**). En cuanto a la *Investigación de Choque*, se han empleado las muestras de las catas número 2 y número 3, denominadas BP-C2 y BP-C3, respectivamente.

Ambas muestras son similares puesto que proceden de canteras muy cercanas, sin embargo el interés de ensayarlas estriba precisamente en detectar si pequeñas diferencias en las características del suelo base tienen o no influencia en el diseño del filtro necesario para protegerlas.

Antes de pasar a describir cada muestra es necesario señalar que en todos los casos, la muestra original de suelo base ha sido fraccionada por el tamiz de 5mm. UNE, a efectos de eliminar la fracción grava gruesa y media. Puesto que la mayoría de las bases ensayadas tienen más del 95% en peso inferior al tamiz 5mm. UNE, esta eliminación de la fracción gruesa no resta representatividad y permite evitar importantes problemas en el ensayo. Esta práctica ya fue recomendada por Sherard en 1982.

6.3.2.2 Muestra BP-C2

El material obtenido de la Cata nº 2 , (**BP-C2**), es una marga con tamaño máximo de 5 mm, un 88.0% de finos inferiores al tamiz 0.08mm UNE y un 21% de fracción arcillosa (tamiz 0.002mm UNE).

La humedad óptima, según el ensayo próctor normal, es del 12.96%, y la densidad máxima 1.886 gr/cm³. En cuanto a la plasticidad, el límite líquido es del 33.2% y el plástico del 19.2%, lo que da un Índice de Plasticidad del 14% y por lo tanto se trata de una arcilla de baja plasticidad, (“CL” según la clasificación de Casagrande).

Respecto a su composición, esta marga tiene un 26.22% de carbonatos, 7.44% de sulfatos y 7.21% de sales solubles. Por último hay que señalar que se trata de una arcilla no dispersiva (ND-1), según el ensayo de “pin-hole”.

6.3.2.3 Muestra BP-C3

El material obtenido de la Cata nº 3 , (**BP-C3**), es una marga con tamaño máximo de 5 mm, un 89.5% de finos inferiores al tamiz 0.08mm UNE y un 30% en peso inferior al tamiz 0.002mm UNE.

La humedad óptima es del 12.83%, y la densidad máxima 1.876 gr/cm³. Por otro lado, el límite líquido es del 33.5% y el plástico del 19.32%, lo que da un Índice de Plasticidad del 14.18% y por lo tanto se trata de una arcilla de baja plasticidad.

En cuanto a su composición, esta muestra tiene un 30.79% de carbonatos, 0.53% de sulfatos y 1.41% de sales solubles. Por último hay que señalar que tiene una permeabilidad de 1.28 E-7 cm/s y que, al igual que todas las muestras procedentes de las canteras de la presa del Portillo, se trata de una arcilla no dispersiva (ND-1).

Por último, el análisis mineralógico por difracción de rayos-x muestra que esta base tiene un 42% de cuarzo, 11% de calcita, 0% de dolomita y 39% de arcilla. En lo que se refiere a la mineralogía de la fracción arcilla, el mineral principal es la esmectita,

con un 53%, le siguen la Ilita (30%), Caolín (12%), y Clorita (5%), no encontrándose presencia significativa de Paragonita.

6.3.2.4 Resumen

En el siguiente gráfico se puede ver la posición de las dos muestras de suelo base en el gráfico de Casagrande:

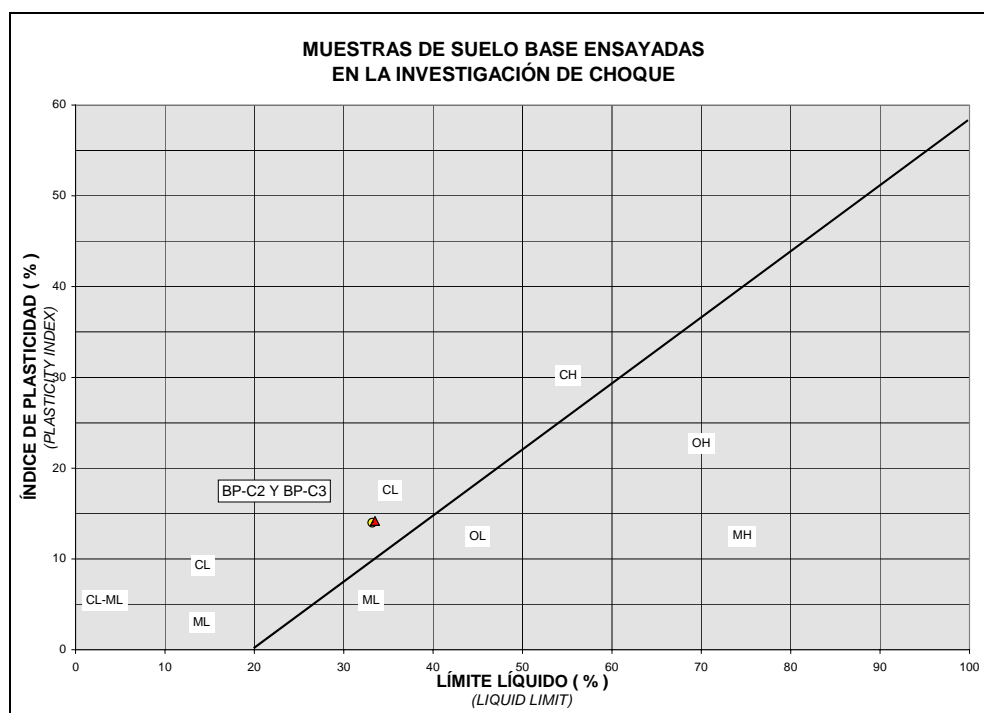


Gráfico 7.- Representación de las muestras BP-C2 y BP-C3 en el gráfico de Casagrande

	d85	d50	<0,08mm	<0,002mm	H.op.	D.Max	Lim. Liq.	Ind. Pla.	Permeab.	Disp.
BASE	Mm	mm	%	%	%	gr/cm ³	%	%	cm/s	
BP-C2	0,0650	0,0095	88,00	21,00	12,96	1,886	33,2	19,2	-----	ND-1
BP-C3	0,0464	0,0068	89,50	30,00	12,83	1,876	33,50	14,18	1,28E-07	ND-1

Tabla 10.- Resumen de características de las muestras de suelo base

6.4 Método Operativo

Como se ha comentado en el capítulo 4 “*Metodología*”, en la fase de *Investigación de Choque* se trata fundamentalmente de realizar un primer avance de la investigación, reducido a sólo dos muestras de suelo base, para poder detectar la influencia cualitativa de las distintas variables y así poder seleccionar o rechazar aquellas que deben ser estudiadas en la *Investigación de Fondo*.

También sería interesante realizar un completo estudio estadístico para obtener relaciones entre las variables de los suelos base entre sí, para tratar de evitar posibles errores en la interpretación final de los resultados.

Esto no es posible aun con las bases ensayadas, dado su reducido número, pero sí se puede hacer con el filtro, ya que al ser procesado, es posible desde el primer momento realizar dicho análisis estadístico.

Por lo tanto, esta fase de la *Investigación de Choque* se subdivide en dos:

1. Filtro: estudio estadístico
2. Ensayos NEF con las bases BP-C2 y BP-C3

6.5 Filtro: estudio estadístico

6.5.1 Introducción

Antes de poder estudiar qué variables relativas al filtro tienen influencia en su eficacia a la hora de proteger a un determinado suelo base frente a la erosión interna, hay que determinar las posibles relaciones de estas variables entre si. No sólo para poder caracterizar correctamente al filtro, sino también para diferenciar entre variables dependientes e independientes y sobre todo, para poder calcular el valor de una variable de difícil cuantificación a partir de relaciones obtenidas respecto a otras variables de medida sencilla.

Así por ejemplo, en el ensayo NEF no es posible determinar la permeabilidad del filtro realmente colocado en la probeta, ya que está presente la pastilla de suelo base compactada, sin embargo sí se puede determinar su densidad y porosidad; y puesto que la granulometría está perfectamente definida, si se obtiene mediante una serie de ensayos de permeabilidad una adecuada relación entre ésta, la granulometría y la porosidad, es posible aplicar esta misma relación para calcular la permeabilidad de forma indirecta.

6.5.2 Objetivos

El análisis estadístico de las variables relativas al filtro tiene los siguientes objetivos fundamentales:

- Caracterizar al filtro
- Detectar datos anómalos
- Detectar relaciones entre distintas variables
- Distinguir entre variables dependientes e independientes
- Obtener, cuando sea posible, modelos de regresión que permitan calcular el valor de una variable dependiente, de valor desconocido, a partir de variables independientes conocidas

6.5.3 Metodología

El presente estudio analiza los datos obtenidos en una serie de ensayos de permeabilidad de filtros bajo carga constante realizados con el mismo material de filtro que se ha empleado en los ensayos NEF.

En los ensayos de permeabilidad la granulometría es perfectamente conocida, ya que ha sido expresamente recompuesta a partir de distintas fracciones granulométricas con la proporción adecuada para obtener granulometrías lineales definidas por el

D_{100F} y el D_{15F} ; también se ha medido la densidad γ , a partir del peso específico de las partículas sólidas, se ha calculado su porosidad. Estos ensayos de permeabilidad se han realizado para distintas energías de compactación con el objetivo de poder determinar su influencia.

La metodología seguida en el presente análisis es la siguiente: en primer lugar se ha hecho un nuevo estudio estadístico de los datos obtenidos en la investigación sobre los filtros empleados en la Presa de Canales (Bravo y Maeso 1.985) para poder obtener unos primeros resultados a modo de antecedentes que permitan situar el nuevo estudio y predecir de alguna manera los posibles resultados a obtener en la investigación principal. A continuación, con los datos obtenidos de los ensayos de permeabilidad de filtros de la presente investigación, se lleva a cabo un primer estudio cualitativo, basado fundamentalmente en gráficos de dispersión, que permite detectar posibles relaciones entre variables e incluso datos que presenten cierta anomalía.

Posteriormente, a partir de los resultados de la investigación bibliográfica y de las relaciones esbozadas en el estudio cualitativo, se lleva a cabo un análisis de regresión entre las variables seleccionadas. Este análisis comienza con el estudio y detección de datos anómalos y la posibilidad de su no inclusión en el modelo general con idea de eliminar la influencia que tienen los mismos en las estimaciones normales del modelo y continúa con un procedimiento de estimación curvilínea para seleccionar el modelo que mejor se ajuste a la tendencia observada.

Seleccionado el modelo y las variables más adecuadas, se procede a calcular la expresión matemática de dicho modelo buscando siempre, en la medida de lo posible, la más sencilla de las expresiones que consiga una adecuada representatividad, (de acuerdo con el principio de simplicidad científica).

Finaliza el estudio proponiendo la expresión más adecuada, con indicación de su campo de aplicación y de la precisión que se le puede atribuir.

Todos los cálculos estadísticos se han realizado empleando el programa SPSS versión 9.0.1 (11 Mar 1999) bajo licencia Campus de la Universidad de Granada.nº7116132.

Por otra parte, para evitar ser reiterativos, hay que señalar que la permeabilidad está siempre expresada en cm/s y los diámetros de la curva granulométrica en mm.

6.5.4 Antecedentes: Investigación en la Presa de Canales (1.985)

La presente investigación tiene como antecedente a la que se llevó a cabo sobre los filtros a emplear en la Presa de Canales en 1.985 (Bravo y Maeso 1985). Allí se ensayaron filtros de kakerita procedente de cantera, la cual, una vez lavada por el tamiz 0,08mm y secada en estufa a 110 °C, se dividía en distintas fracciones granulométricas para luego fabricar las muestras a ensayar con granulometría lineal, definida por un $D_{100F} = 20\text{mm}$ y un D_{15F} variable¹⁶.

Para estudiar la influencia no sólo de la granulometría sino también de la permeabilidad del filtro, se realizaron un total de 14 ensayos de permeabilidad con carga constante, con tres lecturas cada uno; a filtros con D_{15} entre 0.2 mm y 1.25 mm, sometidos todos ellos a compactación mediante vibración con sobrecarga de 9.07 kg, (20 libras) durante un minuto por cada una de las ocho tongadas de una pulgada (2,54 cm) de espesor.

En la siguiente tabla se pueden ver los datos obtenidos en el laboratorio de la Presa de Canales:

¹⁶ En el presente subcapítulo referido al estudio estadístico del filtro, se va a suprimir el subíndice “F” en la nomenclatura de las variables, ej. D_{15F} pasa a ser sólo D_{15} , para evitar continuas reiteraciones y puesto que no es preciso distinguir estas variables de las del suelo base

D15 (mm)	Dens. Seca (gr/cm3)	Porosidad n	K (cm/s)
0,2	2,13	0,255	0,0017
0,2	2,13	0,255	0,0014
0,2	2,13	0,255	0,0021
0,2	2,14	0,252	0,0012
0,2	2,14	0,252	0,0010
0,2	2,14	0,252	0,0015
0,2	2,12	0,259	0,0019
0,2	2,12	0,259	0,0049
0,2	2,12	0,259	0,0049
0,4	2,15	0,248	0,0120
0,4	2,15	0,248	0,0150
0,4	2,15	0,248	0,0290
0,4	2,16	0,245	0,0140
0,4	2,16	0,245	0,0150
0,4	2,16	0,245	0,0160
0,4	2,13	0,255	0,0180
0,4	2,13	0,255	0,0460
0,4	2,13	0,255	0,0410
0,6	2,09	0,269	0,0690
0,6	2,09	0,269	0,0740
0,6	2,10	0,266	0,0450
0,6	2,10	0,266	0,0480
0,6	2,10	0,266	0,0510
0,6	2,12	0,259	0,0580
0,6	2,12	0,259	0,0650
0,6	2,12	0,259	0,0490
0,8	2,04	0,287	0,1600
0,8	2,04	0,287	0,1400
0,8	2,04	0,287	0,1200
0,8	2,05	0,283	0,1300
0,8	2,05	0,283	0,1700
0,8	2,05	0,283	0,1200
0,8	2,08	0,273	0,1800
0,8	2,08	0,273	0,1900
0,8	2,08	0,273	0,1600
1,25	2,02	0,294	0,5200
1,25	2,02	0,294	0,5500
1,25	2,02	0,294	0,5600
1,25	1,99	0,304	0,6400
1,25	1,99	0,304	0,6600
1,25	1,99	0,304	0,6100

Tabla 11.- Ensayos de Permeabilidad de la Presa de Canales (Bravo y Maeso 1985)

Con los resultados de permeabilidad para cada muestra de filtro, encontraron relación entre el D_{15} y k , de la forma:

$$k = 0.289 * D_{15}^3 \quad (k \text{ en cm/s, } D_{15} \text{ en mm})$$

En la presente investigación se han tomado como partida estos datos y se ha realizado un estudio estadístico más profundo, al que también se ha añadido el dato de la porosidad (n) del filtro, calculada a partir de la densidad seca y el peso específico de las partículas sólidas. De esta forma se pretende buscar una relación del tipo propuesta por Zauerbrei.

En el gráfico siguiente, se observa perfectamente una buena relación entre la permeabilidad y el D_{15} , del tipo potencial o exponencial, tal y como era de esperar.

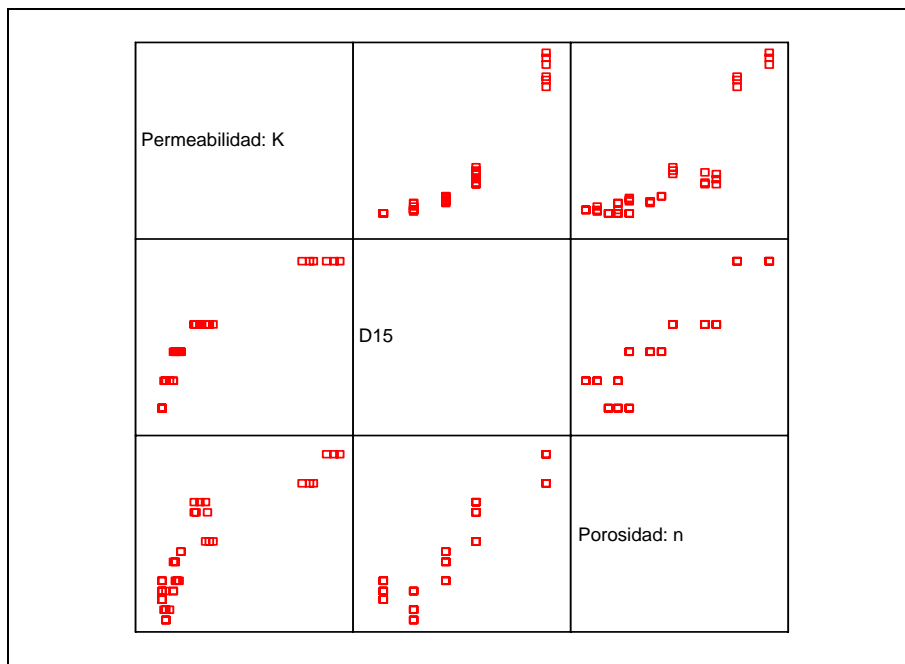


Gráfico 8.- Gráfico matricial de dispersión: Permeabilidad, D_{15} y Porosidad

Por otro lado, también hay una relación directa entre la permeabilidad y la porosidad en la que lógicamente, al aumentar la porosidad es mayor el valor de la permeabilidad. Pero es interesante destacar que también existe relación entre el D_{15} y la porosidad, por lo que ambas no son variables independientes como sería de desear

para obtener la mejor expresión para la permeabilidad. De hecho es lógico que al ser granulometrías lineales con el $D_{100F}=20\text{mm}$, al aumentar el D_{15F} , también lo hace la pendiente de la curva granulométrica por lo que la porosidad aumenta al no haber partículas que puedan rellenar los poros dejados entre las partículas de mayor tamaño.

Para cuantificar esta influencia entre las distintas variables se ha calculado la correlación de Pearson en forma matricial obteniéndose un coeficiente de correlación muy alto entre $k-D_{15}$ y $D_{15F}-n$, (en los dos casos superior a 0.9), pero además un coeficiente de 0,87 para la correlación $k - n$. En todos los casos la significación bilateral¹⁷ es prácticamente cero.

Correlaciones

		K	D15	n
K	Correlación de Pearson			
	Sig. (bilateral)			
	N			
D15	Correlación de Pearson	,910**		
	Sig. (bilateral)	,000		
	N	41		
n	Correlación de Pearson	,870**	,911**	
	Sig. (bilateral)	,000	,000	
	N	41	41	

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Tabla 12.- Correlación: Permeabilidad, D_{15} y Porosidad

Prosiguiendo con el estudio estadístico, se ha analizado la regresión lineal entre la permeabilidad k y las variables D_{15} y porosidad n . Con el objeto de detectar posibles datos anómalos, se han estudiado los residuos tipificados no encontrándose ninguno superior a tres, lo que supone que no hay ningún dato que se pueda considerar claramente anómalo, habiendo un solo dato con un residuo superior a dos (2.040), de los 41 observados.

¹⁷ La correlación se considera significativa cuando la significación es inferior a 0.01

La regresión lineal ha dado como resultado la expresión:

$$k = -0,816 + 0,404 * D_{15} + 2.642 * n \quad (R^2 = 0,838)$$

Realizado el análisis de la varianza (ANOVA) asociado a la regresión se puede concluir que el modelo es un buen ajuste para los valores observados y que, por otra parte, el coeficiente que afecta a la porosidad es poco significativo, incluyendo al cero dentro del intervalo de confianza del 95%, lo cual quiere decir que la variable que realmente está influyendo en la permeabilidad es, en este caso, el D_{15} y no la porosidad.

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1,331	2	,665	98,558	,000 ^a
	Residual	,257	38	6,751E-03		
	Total	1,587	40			

a. Variables predictoras: (Constante), n, D15

b. Variable dependiente: K

Coefficientes

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		t	Sig.	Intervalo de confianza B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad		
	B	Error típico	Beta				Límite inferior	Límite superior	orden	Parcial	semiparcial	tolerancia	FIV	
1	(Constante)	-,816	,421		-1,939	,060	-1,668	,036						
	D15	,404	,092	,694	4,392	,000	,218	,590	,910	,580	,286	,170	5,872	
	n	2,642	1,759	,237	1,502	,141	-,919	6,203	,870	,237	,098	,170	5,872	

a. Variable dependiente: K

Tabla 13.- Regresión no lineal: k-D₁₅F-n

Comprobada la representatividad de los datos y la posibilidad de encontrar una buena correlación entre la permeabilidad k y el D_{15} y la porosidad n , a continuación se proponen varios modelos no lineales. A la vista del gráfico matricial de dispersión se puede observar que la relación esperada es del tipo potencial, por lo que se han ido

ensayando distintos modelos con la doble intención de escoger el más preciso y más sencillo de los posibles. El resultado se muestra a continuación:

- $k = 6.6834 \cdot D_{15}^2 \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2}$ $R^2=0.97917$ **Ecuación 69**
- $k = 18.7647 \cdot D_{15}^{2.58} \cdot n^{3.34}$ $R^2=0.99068$ **Ecuación 70**
- $k = 13.4578 \cdot D_{15}^2 \cdot n^3$ $R^2=0.97247$ **Ecuación 71**
- $k = 0.2981 \cdot D_{15}^{3.059}$ $R^2=0.98540$ **Ecuación 72**
- $k = 0.301 \cdot D_{15}^3$ $R^2=0.98530$ **Ecuación 73**
- $k = 0.3368 \cdot D_{15}^2$ $R^2=0.92880$ **Ecuación 74**

k (cm/s)	D_{15} (mm)
<i>Filtros lavados por tamiz 0.08mm; granulometría lineal: $D_{100}=20mm$, $D_{15}= (0.2 - 1.25) mm$</i>	

Como se puede ver, todas las correlaciones son muy altas, con coeficientes de correlación al cuadrado superiores a 0.9, destacando la expresión nº2, que emplea tanto el D_{15} como la porosidad. Sin embargo hay que resaltar que la precisión obtenida al considerar la porosidad no es mucho mayor que la que se consigue con sólo el D_{15F} , por lo que parece lógico proponer como mejor expresión la nº5, siguiendo el principio de tratar de buscar siempre la expresión más simple de todas las que sean adecuadamente precisas.

6.5.5 Variables relativas al filtro: selección y descripción

Como ya se ha comentado anteriormente, los filtros empleados en la presente investigación se han fabricado a partir del material empleado como filtro en la presa

del Portillo, por lo que no procede considerar como variables a la forma de las partículas, peso específico, composición química, dureza, etc. ya que son iguales en todos los casos.

Por esta razón, se han seleccionado como variables sujetas a estudio la granulometría, permeabilidad y porosidad.

- **Granulometría:** Lineal en papel semilogarítmico, definida por el D_{100} , (20 o 10 mm) y el D_{15} (de 0,2 a 2.5 mm), el resto de las variables se pueden obtener matemáticamente. Se han considerado D_{100} , D_{80} , D_{60} , D_{30} , D_{15} , D_{10} , D_5 , C_u y C_c .
- **Permeabilidad:** Medida en permeámetro de carga constante, para distintas energías de compactación del filtro, (compactación por vibración, en tres tongadas, con 0, 15, 60 o 120 segundos de vibración respectivamente).
- **Porosidad:** Medida a partir de la densidad seca y el peso específico de las partículas sólidas que tiene un valor de 2.69 g/cm^3 .

Aparte de los resultados de la Investigación realizada en la Presa de Canales, se han realizado 34 nuevos ensayos de permeabilidad cuyos resultados se muestran en la tabla siguiente:

Nº	K cm/s	D100 mm	D80 mm	D60 mm	D30 mm	D15 mm	D10 mm	D5 mm	Cu	Cc	TV s	Dsec gr/cm3	n
1	0,0121	10,00	3,98	1,59	0,40	0,20	0,16	0,13	9,99	1,58	0	1,87	0,307
2	0,0083	10,00	3,98	1,59	0,40	0,20	0,16	0,13	9,99	1,58	15	1,84	0,319
3	0,0665	10,00	4,69	2,20	0,71	0,40	0,33	0,27	6,64	1,46	0	1,81	0,330
4	0,0272	10,00	4,69	2,20	0,71	0,40	0,33	0,27	6,64	1,46	15	1,81	0,330
5	0,0186	10,00	4,69	2,20	0,71	0,40	0,33	0,27	6,64	1,46	60	1,88	0,304
6	0,1382	10,00	4,94	2,44	0,85	0,50	0,42	0,35	5,83	1,42	0	1,77	0,344
7	0,0492	10,00	4,94	2,44	0,85	0,50	0,42	0,35	5,83	1,42	15	1,77	0,344
8	0,0310	10,00	4,94	2,44	0,85	0,50	0,42	0,35	5,83	1,42	60	1,86	0,311
9	0,1903	10,00	5,16	2,66	0,99	0,60	0,51	0,43	5,23	1,39	0	1,79	0,337
10	0,1001	10,00	5,16	2,66	0,99	0,60	0,51	0,43	5,23	1,39	15	1,79	0,337
11	0,0360	10,00	5,16	2,66	0,99	0,60	0,51	0,43	5,23	1,39	60	1,86	0,311
12	0,2712	10,00	5,52	3,05	1,25	0,80	0,69	0,59	4,42	1,35	0	1,76	0,348
13	0,0988	10,00	5,52	3,05	1,25	0,80	0,69	0,59	4,42	1,35	15	1,76	0,348
14	0,0577	10,00	5,52	3,05	1,25	0,80	0,69	0,59	4,42	1,35	60	1,85	0,315
15	0,0357	10,00	5,52	3,05	1,25	0,80	0,69	0,59	4,42	1,35	120	1,89	0,300
16	0,4955	10,00	5,82	3,38	1,50	1,00	0,87	0,76	3,87	1,31	0	1,74	0,356
17	0,1755	10,00	5,82	3,38	1,50	1,00	0,87	0,76	3,87	1,31	15	1,80	0,333
18	0,1174	10,00	5,82	3,38	1,50	1,00	0,87	0,76	3,87	1,31	60	1,83	0,322
19	0,0965	10,00	5,82	3,38	1,50	1,00	0,87	0,76	3,87	1,31	120	1,87	0,307
20	0,5490	10,00	6,30	3,96	1,98	1,40	1,25	1,11	3,18	1,26	0	1,70	0,370
21	0,7730	10,00	6,30	3,96	1,98	1,40	1,25	1,11	3,18	1,26	15	1,71	0,367
22	0,2037	10,00	6,30	3,96	1,98	1,40	1,25	1,11	3,18	1,26	60	1,84	0,319
23	0,1456	10,00	6,30	3,96	1,98	1,40	1,25	1,11	3,18	1,26	120	1,88	0,304
24	0,4583	10,00	6,50	4,22	2,21	1,60	1,44	1,29	2,94	1,24	15	1,74	0,356
25	0,2997	10,00	6,50	4,22	2,21	1,60	1,44	1,29	2,94	1,24	60	1,83	0,322
26	0,2143	10,00	6,50	4,22	2,21	1,60	1,44	1,29	2,94	1,24	120	1,88	0,304
27	0,0468	20,00	8,40	3,52	0,96	0,50	0,40	0,32	8,76	1,54	0	1,90	0,296
28	0,0300	20,00	8,40	3,52	0,96	0,50	0,40	0,32	8,76	1,54	15	1,89	0,300
29	0,0324	20,00	8,40	3,52	0,96	0,50	0,40	0,32	8,76	1,54	60	1,94	0,281
30	0,0266	20,00	8,76	3,84	1,11	0,60	0,49	0,40	7,87	1,51	0	1,80	0,333
31	0,0598	20,00	9,09	4,13	1,26	0,70	0,57	0,47	7,19	1,48	0	1,81	0,330
32	0,2393	20,00	9,38	4,40	1,41	0,80	0,66	0,55	6,64	1,46	0	1,80	0,333
33	0,3047	20,00	9,64	4,65	1,56	0,90	0,75	0,62	6,20	1,44	0	1,81	0,330
34	0,7046	20,00	10,11	5,11	1,84	1,10	0,93	0,78	5,51	1,41	0	1,78	0,341

Tabla 14.- Resultados de los ensayos de permeabilidad de filtros

Para proceder con el estudio estadístico primero se ha realizado un gráfico matricial de dispersión en el que se pueden observar todas las relaciones entre cada dos variables, (Gráfico 9).

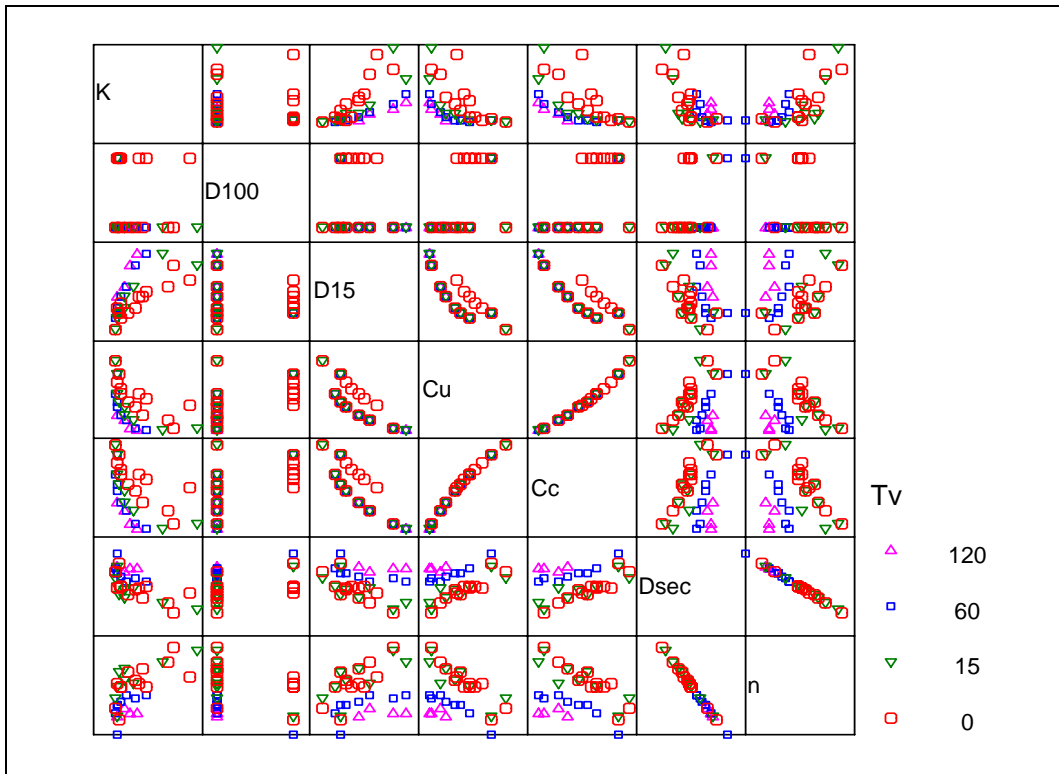


Gráfico 9.- Permeabilidad, Granulometría y Porosidad según tiempo de vibrado

Lo primero que destaca es que hay dos valores de D_{100} : 20 y 10 mm; pero la mayoría de los ensayos corresponden a $D_{100}=10\text{mm}$, que por otra parte es el diámetro máximo empleado en la mayoría de los ensayos NEF. En el Gráfico 10, también se observa claramente la relación existente entre las distintas variables granulométricas.

En cuanto a la relación entre la permeabilidad y las demás variables, se observa una clara tendencia potencial o exponencial con respecto al D_{15} , aumentando la permeabilidad al ser más grueso el filtro, pero dependiendo a su vez del tiempo de vibrado. La relación *permeabilidad – porosidad* es bastante significativa aunque un poco más difusa, sin embargo ahora no parece ser necesario distinguir entre cada tiempo de compactación.

Por último cabe destacar que se aprecia una cierta correlación entre la granulometría y la porosidad, lo cual es lógico, ya que siendo fijo el D_{100} , al aumentar el D_{15} aumenta la pendiente de la curva granulométrica y por ello los huecos dejados por las

partículas de mayor tamaño no encuentran partículas más finas que puedan rellenarlos. Por supuesto que en este caso también se detecta una influencia clara de la compactación, ya que esta hace disminuir la porosidad.

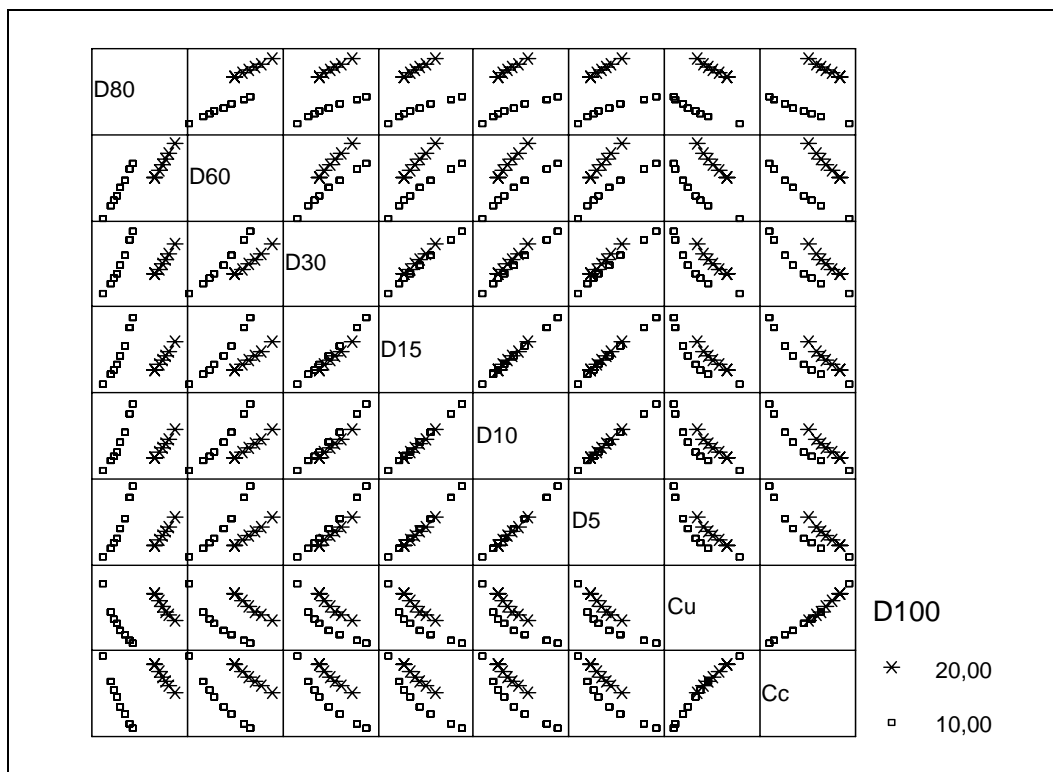


Gráfico 10.- Relación entre las distintas variables granulométricas del filtro

Por lo tanto, para buscar la mejor relación multivariante entre la permeabilidad y la granulometría y porosidad, conjuntamente; se ha realizado el estudio estadístico pertinente, comenzando con localizar correlaciones altas entre distintas variables dos a dos, y posteriormente proponer un modelo de regresión múltiple entre las variables más fuertemente correladas.

6.5.6 Correlación entre permeabilidad y granulometría

6.5.6.1 *Introducción*

En muchas investigaciones se han obtenido buenas relaciones entre la permeabilidad y la granulometría, fundamentalmente en función del D_{15} del filtro, como por ejemplo la que se obtuvo en la Presa de Canales (Bravo y Maeso 1985) o la muy conocida de Sherard et al (1982). También ha tenido gran difusión la expresión de Hazen, aunque en este caso emplea el D_{10} .

En la actualidad hay autores que proponen otro tipo de leyes, que en general emplean el D_5 , D_{10} , D_{15} o un producto de éstos, como por ejemplo Indraratna et al. (1996)¹⁸.

Por ello, para seleccionar la mejor $k - D_x$, se ha calculado el coeficiente de correlación entre la permeabilidad y cada uno de los diámetros de comparación D_x . En la gráfica siguiente se ha representado este coeficiente para cada tiempo de vibrado. Como se puede ver, el coeficiente de Pearson es muy bajo cuando se emplea el D_{100} como diámetro de comparación y va subiendo hasta alcanzar un máximo cuando se emplea como diámetro de comparación entre el D_5 y el D_{15} , luego efectivamente parece adecuado emplear D_{15} para correlacionar permeabilidad y granulometría, ya que, por un lado se consigue el mayor coeficiente de correlación y por otro se ajusta al empleado de forma más frecuente por distintos investigadores.

¹⁸ Ver capítulo de “*Revisión de los Conocimientos*”

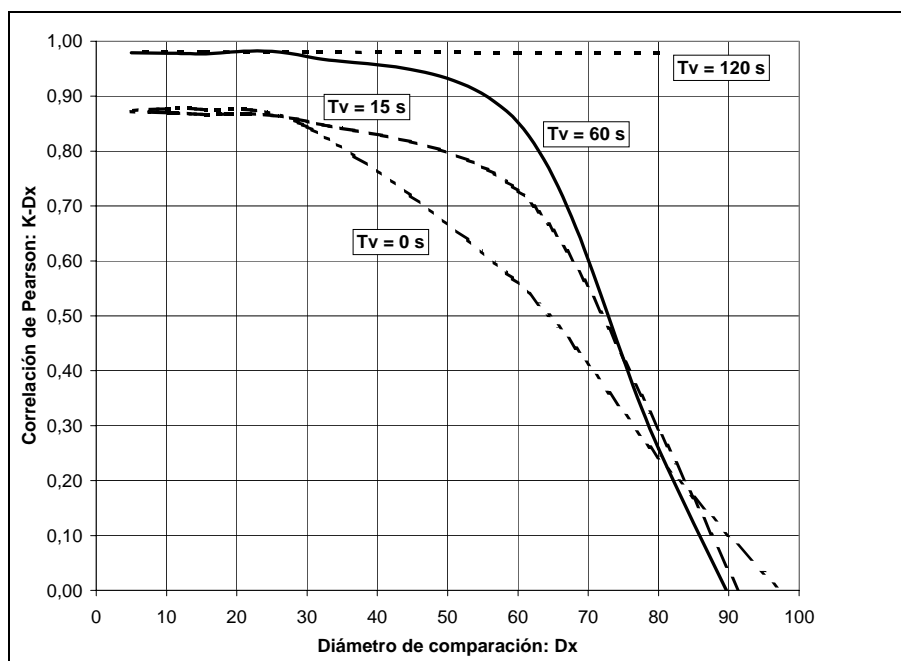


Gráfico 11.- Correlación Permeabilidad-Granulometría según el diámetro de comparación – D_x - para cada tiempo de vibrado

6.5.6.2 Relación $k-D_{15}$ para 0s de tiempo de compactación

Aunque el ensayo de permeabilidad de arenas no está normalizado, en la mayoría de los casos el material se ensaya sin compactar. En todos los ensayos NEF realizados en la presente investigación el filtro se ha compactado con distintos tiempos de vibrado por tongada para poder observar el efecto de la permeabilidad y la porosidad del filtro en su eficacia. Por ello los ensayos de permeabilidad se han realizado para los mismos tiempos de vibrado que en los ensayos NEF y además con el filtro sin compactar para que el resultado sea comparable a los de otros investigadores.

En total se han realizado 14 ensayos de permeabilidad con 0 segundos de compactación, con D_{15} entre 0.2 mm y 1.6 mm. De todos los ensayos, en la mitad el D_{100} es de 20 mm y en la otra mitad es de 10 mm.

En el Gráfico 12 se puede ver cómo la relación entre D_{15} y permeabilidad es muy diferente según el D_{100} , por lo que en primer lugar se ha realizado el estudio considerando $D_{100}=10\text{mm}$.

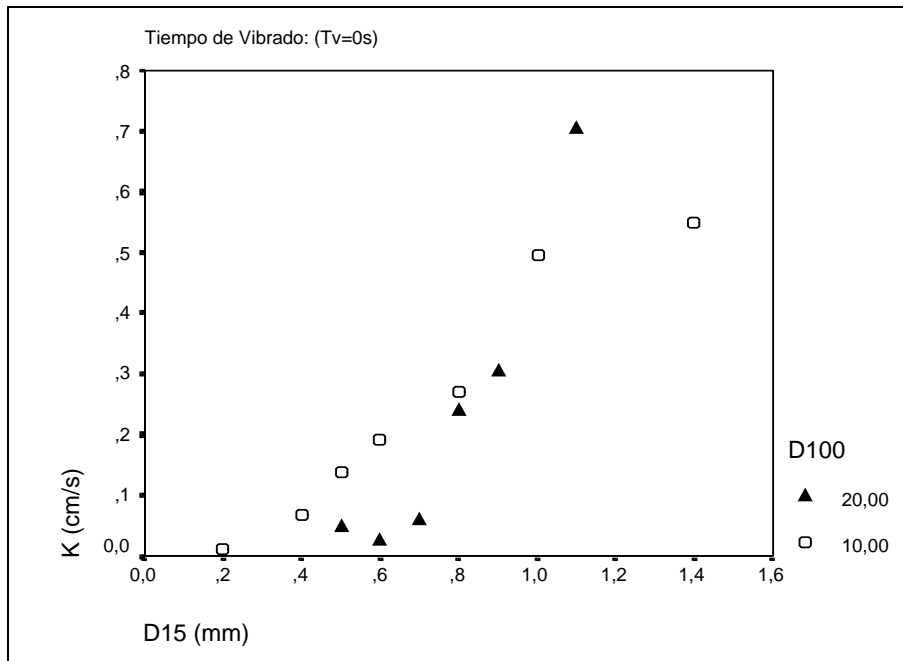


Gráfico 12.- Correlación Permeabilidad- D_{15} para 0 s de compactación

Para $D_{100}= 10 \text{ mm}$ se observa una muy buena relación entre $k - D_{15}$ que puede ser potencial o casi lineal, destacando en el Gráfico 13 que los datos 16 y 20 pueden condicionar mucho el resultado del estudio de correlación.

Por esa razón es imprescindible estudiar previamente los residuos tipificados para tratar de detectar aquellos datos anómalos que puedan suponer un error de lectura o un ensayo mal ejecutado y por tanto deban ser eliminados.

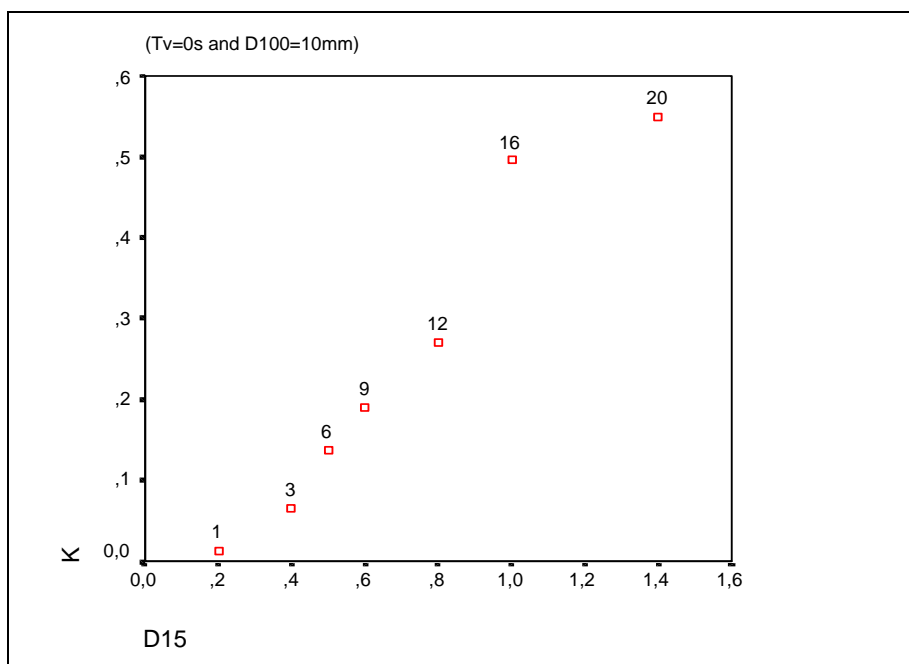


Gráfico 13.- Correlación Permeabilidad-D₁₅ para 0 s de compactación y D₁₀₀=10mm

En primer lugar se ha realizado un modelo de regresión lineal obteniéndose un coeficiente de regresión R² de 0.946, siendo la correlación significativa a nivel 0.0001.

Resumen del modelo^a

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Cambiar los estadísticos					Durbin-Watson
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F	
1	,972 ^a	,946	,935	5,28102E-02	,946	86,944	1	5	,000	2,840

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: K

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,242	1	,242	86,944	,000 ^a
	Residual	1,394E-02	5	2,789E-03		
	Total	,256	6			

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: K

Coefficientes^a

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad		
		B	Error típ.				Beta	Beta	Limite inferior	Limite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia
		1	(Constante)	-,102	,042	,972	-2,411	,061	-,211	,007				
	D15	,497	,053	,972	9,324	,000	,360	,635	,972	,972	,972	1,000	1,000	

a. Variable dependiente: K

Tabla 15.- Regresión Lineal $k-D_{15}$ para $T_v=0$ s y $D_{100}=10$ mm

Como se puede ver, la correlación es muy buena, pero hay que destacar además que dentro del intervalo de confianza del 95%, el coeficiente de D_{15} fluctúa entre 0.360 y 0.635.

Ante la posibilidad que se ha comentado anteriormente de que exista algún dato que se pueda considerar anómalo, se ha realizado un diagnóstico caso por caso de los residuos tipificados, observándose que ningún dato obtiene un residuo superior a 3, que podría considerarse claramente anómalo, siendo sólo el dato n° 16, ($D_{100} = 10$ mm, $D_{15} = 1.0$ mm, $T_v = 0$ s, $k = 0.4955$ cm/s), el que tiene un residuo cercano a 2, (1.897).

Diagnósticos por caso^a

Número de caso	Residuo tip.	K	Valor pronosticado	Residual
16	1,897	,4955	,395334	,100203

a. Variable dependiente: K

Estadísticos sobre los residuos^a

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típ.	N
Valor pronosticado	-2,6E-03	,594303	,246108	,201030	7
Residual	-4,5E-02	,100203	3,47E-17	4,82089E-02	7
Valor pronosticado tip.	-1,237	1,732	,000	1,000	7
Residuo tip.	-,857	1,897	,000	,913	7

a. Variable dependiente: K

Tabla 16.- Regresión Lineal $k-D_{15}$ para $T_v=0$ s y $D_{100}=10$ mm: estudio de los residuos tipificados

En principio esto demuestra una cierta anomalía, que por otra parte se corresponde con lo observado anteriormente en el gráfico de dispersión, por lo que se puede prescindir de este dato ya que su eliminación no condiciona excesivamente la tendencia.

Además de la regresión lineal, se ha llevado a cabo un procedimiento de estimación curvilínea para poder seleccionar entre un total de 11 modelos diferentes, (lineal,

logarítmico, inverso, cuadrático, cúbico, de potencia, compuesto, curva - S, de crecimiento o exponencial); aquel que mejor se ajuste a la relación entre la permeabilidad y el D_{15} .

En la siguiente tabla se representa el valor del coeficiente R^2 para cada uno de los modelos:

LINEAL	0.945	LOGARIT.	0.868	INVER.	0.635	CUADR.	0.950
CUBIC.	0.982	COMP.	0.771	POTEN.	0.959	S	0.973
CREC.	0.772	EXP.	0.772	LOGIST.	0.772		

Tabla 17.- Estimación Curvilínea $k-D_{15}$ para $T_v=0$ s y $D_{100}=10$ mm: coeficiente R^2

Según estos resultados, el mejor modelo es el cúbico, con un coeficiente R^2 de 0.982, pero también se obtiene un valor similar para el modelo potencial y el de curva-S. Por esta razón, a continuación se ha realizado un modelo de regresión no lineal, para tratar de obtener un modelo de tipo potencial con la libertad de poder estimar los coeficientes que mejoren el valor de R^2 .

En primer lugar se ha empleado un modelo de la forma - $k = a * D_{15}^b$ – obteniéndose:

$$k = 0.387 * D_{15}^{1.329} \quad R^2 = 0.9265 \quad \text{Ecuación 75}$$

Aunque el coeficiente R^2 obtenido en estas correlaciones es bastante alto, hay que tener en cuenta que al estudiar la regresión lineal se detectó que el dato nº16 tenía un residuo cercano a 2 por lo que se puede considerar anómalo, pero para poder prescindir de él, se ha estudiado de nuevo la regresión lineal sin considerar este dato para comprobar si vuelven a aparecer datos anómalos o por el contrario todos los demás tienen un residuo tipificado inferior a 2.

Resumen del modelo^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Cambiar los estadísticos				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F
1	,998 ^a	,996	,994	1,43590E-02	,996	887,638	1	4	,030

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: K

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,183	1	,183	887,638	,000 ^a
	Residual	8,247E-04	4	2,062E-04		
	Total	,184	5			

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: K

Coefficientes^a

Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	-9,27E-02	,012		-8,013	,001
	D15	,457	,015	,998	29,793	,000

a. Variable dependiente: K

Tabla 18.- Regresión Lineal k - D_{15} para $T_v=0$ s y $D_{100}=10$ mm: Sin dato n°16

Como se puede ver, la regresión mejora bastante al prescindir del dato anómalo, alcanzando ahora un valor de R^2 de 0.996, prácticamente igual a la unidad, siendo de nuevo la relación significativa a nivel 0.000. Pero lo más importante es que al estudiar de nuevo los residuos tipificados de los demás datos, no hay ninguno cercano a 2, por lo que todos los datos restantes se pueden considerar significativos.

El elevado valor de R^2 obtenido con la regresión lineal queda claramente reflejado en el gráfico, por lo que es de esperar que cualquier otra relación de tipo potencial obtenga una peor aproximación, sin embargo, ya que este tipo de relación es la propuesta de forma más frecuente, se ha estudiado mediante regresión no lineal, distintos modelos del tipo potencial obteniéndose las siguientes relaciones:

• $k = 0.349 * D_{15}^{1.388}$ $R^2 = 0.9876$ **Ecuación 76**

- $k = 0.3051 * D_{15}^2$ $R^2 = 0.8979$ **Ecuación 77**

- $k = 0.2174 * D_{15}^3$ $R^2 = 0.6543$ **Ecuación 78**

Efectivamente la mejor relación es la lineal, ya que el coeficiente R^2 va bajando conforme aumenta el exponente de D_{15} .

6.5.6.3 Relación k - D_{15} para 15s de tiempo de compactación

Se han realizado un total de 9 ensayos de permeabilidad en los que el filtro se ha compactado en tres tongadas, con 15 segundos de vibración cada una, empleando para la compactación una sobrecarga de 9.07 kg, (20 libras). Los filtros ensayados tienen un $D_{100} = 10$ mm, (salvo el ensayo n°28 que empleó un $D_{100} = 20$ mm con un $D_{15} = 0.5$ mm) y el D_{15} oscila entre 0.2 mm y 1.6 mm.

El proceso seguido para encontrar la mejor relación entre la permeabilidad y el D_{15} para un tiempo de vibrado de 15 s es análogo al descrito en el apartado anterior: representación gráfica, estudio de la regresión lineal, búsqueda de datos anómalos y regresión no lineal.

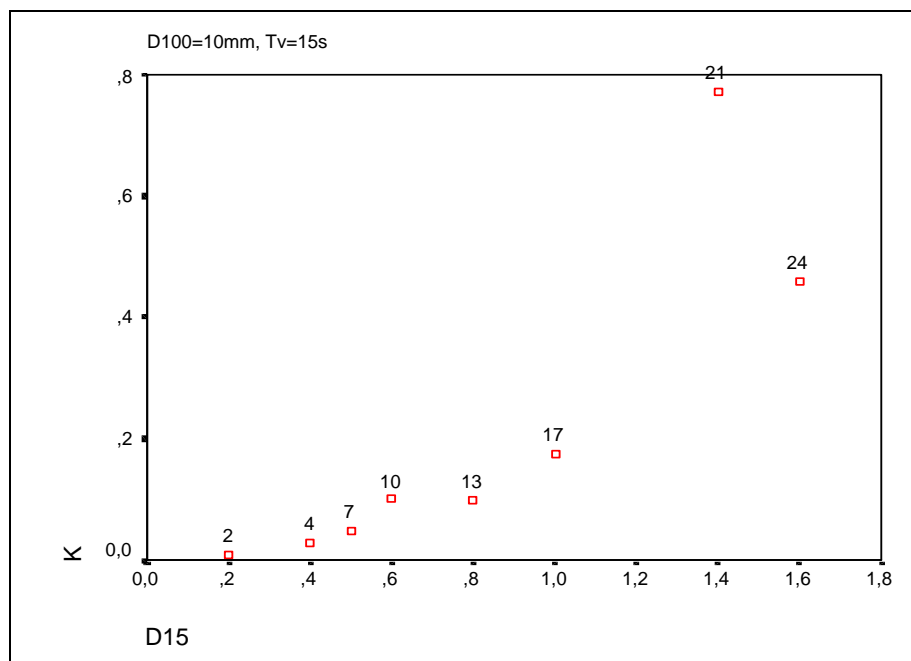


Gráfico 14.- Correlación Permeabilidad- D_{15} para $T_v=15$ s y $D_{100}=10$ mm

En el Gráfico 14 se observa una muy buena relación del tipo potencial, con la incógnita de lo que ocurre en los dos datos extremos, ya que a priori es posible que cualquiera de estos dos datos, (el n°21 o el n°24), sean anómalos. Por ello se ha procedido a estudiar los residuos tipificados de todos los datos.

Resumen del model^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error tip. de la estimación	Cambiar los estadísticos				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F
1	,860 ^a	,740	,697	,147827	,740	17,076	1	6	,006

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: K

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,373	1	,373	17,076	,006 ^a
	Residual	,131	6	2,185E-02		
	Total	,504	7			

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: K

Tabla 19.- Regresión Lineal $k-D_{15}$ para $T_v=15$ s y $D_{100}=10$ mm

Como era de esperar al observar el gráfico, la regresión lineal obtiene en este caso un coeficiente R^2 bastante inferior al que se obtuvo para 0s de vibrado, e igualmente, la relación es ahora significativa a nivel .006.

Coefficientes^a

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad				
	B	Error tip.	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV			
1	(Constante)	-,171	,106												
	D15	,470	,114	,860	4,132	,006	-,430	,089	,192	,748	,860	,860	,860	1,000	1,000

a. Variable dependiente: K

Diagnósticos por caso^b

Número de caso	Residuo tip.	K	Valor pronosticado	Residual
21	1,932	,7730	,487452	,285586

a. Variable dependiente: K

Estadísticos sobre los residuos^a

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típ.	N
Valor pronosticado	-7,7E-02	,581465	,211289	,230883	8
Residual	-,123918	,285586	3,47E-18	,136861	8
Valor pronosticado tip.	-1,247	1,603	,000	1,000	8
Residuo tip.	-,838	1,932	,000	,926	8

a. Variable dependiente: K

Tabla 20.- Regresión Lineal k - D_{15} para $T_v=15$ s y $D_{100}=10$ mm: Cálculo de los residuos tipificados

Por otro lado, el residuo tipificado para el dato nº21, ($D_{100}=10$, $D_{15}=1.4$, $T_v=15$, $k=0.773$), es muy cercano a 2, lo que pone de manifiesto su carácter anómalo. Pero si además comparamos con el valor de la permeabilidad para el mismo filtro, pero con 0s de vibrado, el dato nº20 ($D_{100}=10$, $D_{15}=1.4$, $T_v=0$, $k=0.5490$) tiene una permeabilidad significativamente menor que el nº21, lo cual es claramente ilógico ya que a igualdad de granulometría, la permeabilidad disminuye con la compactación. Por todo ello se puede concluir que efectivamente el dato nº21 es anómalo y a partir de ahora se prescinde de él, y se vuelve a estudiar la regresión lineal y los residuos tipificados por si aparecen nuevos datos anómalos.

Resumen del modelo^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Cambiar los estadísticos				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F
1	,966 ^a	,934	,921	4,35844E-02	,934	70,607	1	5	,030

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: K

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,134	1	,134	70,607	,000 ^a
	Residual	9,498E-03	5	1,900E-03		
	Total	,144	6			

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: K

Coefficientes^a

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%	
	B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior
1 (Constante)	-,103	,032		-3,193	,024	-,187	-,020
D15	,322	,038	,966	8,403	,000	,223	,420

a. Variable dependiente: K

Tabla 21.- Regresión Lineal k - D_{15} para $T_v=0$ s y $D_{100}=10$ mm: Sin dato nº21

Efectivamente, al quitar el dato anómalo, la regresión lineal tiene ahora un coeficiente R^2 mucho mayor (0.934) y mejora también el nivel de significación, pero además ya no aparece ningún dato con un residuo tipificado cercano a 2.

Pero aun así, la lineal no es la mejor regresión posible a la vista del gráfico de dispersión, por lo que a continuación se ha estudiado la regresión no lineal, comenzando con un modelo de la forma $k = a * D_{15}^b$ – y posteriormente se ha tratado de simplificar la expresión redondeando el valor del exponente b . Las expresiones obtenidas son las siguientes:

• $k = 0.182 * D_{15}^{1.949}$ $R^2 = 0.9895$ **Ecuación 79**

• $k = 0.179 * D_{15}^2$ $R^2 = 0.9892$ **Ecuación 80**

Como se puede ver, la expresión 2, aunque tenga un coeficiente R^2 ligeramente inferior, es preferible por su mayor simplicidad.

6.5.6.4 Relación k - D_{15} para 60 s de tiempo de compactación

Con 60 segundos de vibración por tongada se han realizado 7 ensayos de permeabilidad con $D_{100}= 10$ mm y con un D_{15} que oscila entre 0.4 mm y 1.6 mm; habiendo además un ensayo de comprobación con $D_{100}= 20$ mm y $D_{15}= 0.5$ mm.

Por lo tanto el estudio se reduce a los datos con $D_{100}= 10$ mm que aparecen representados en el siguiente gráfico de dispersión:

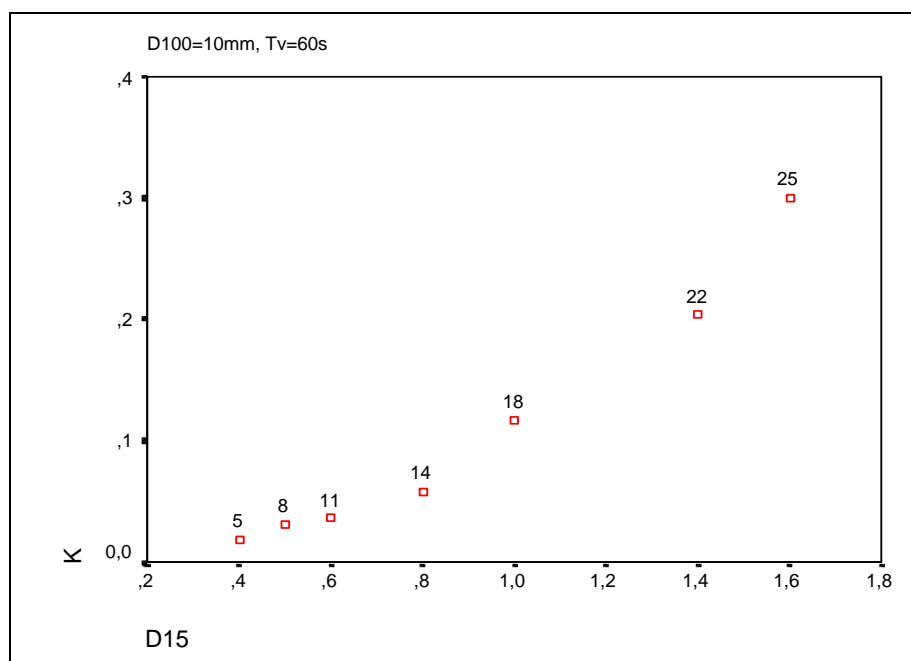


Gráfico 15.- Correlación Permeabilidad- D_{15} para $T_v=60$ s y $D_{100}=10$ mm

En este caso se observa una clara tendencia potencial sin que aparezca ningún dato que pueda considerarse anómalo. El estudio estadístico seguido es igual que el de los casos anteriores: regresión lineal, análisis de la varianza, estudio de los residuos y regresión no lineal.

Resumen del model^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Cambiar los estadísticos				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F
1	,977 ^a	,954	,945	2,49233E-02	,954	103,864	1	5	,000

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: K

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	6,452E-02	1	6,452E-02	103,864	,000 ^a
	Residual	3,106E-03	5	6,212E-04		
	Total	6,762E-02	6			

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: K

Coeficientes^a

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coefficient es estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad	
	B	Error tip.	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV
1 (Constante) D15	-9,45E-02 ,226	,022 ,022	,977	-4,278 10,191	,008 ,000	-,151 ,169	-,038 ,283	,977	,977	,977	1,000	1,000

a. Variable dependiente: K

Estadísticos sobre los residuos^a

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típ.	N
Valor pronosticado	-4,0E-03	,267538	,109139	,103696	7
Residual	-2,9E-02	3,22E-02	-4,6E-17	2,27518E-02	7
Valor pronosticado tip.	-1,091	1,528	,000	1,000	7
Residuo tip.	-1,155	1,290	,000	,913	7

a. Variable dependiente: K

Tabla 22.- Regresión Lineal k - D_{15} para $T_v=60$ s y $D_{100}=10$ mm

Como se puede ver, la regresión lineal presenta un coeficiente R^2 de 0.954, el cual es muy elevado, pero lo más destacable es que no hay ningún dato con un residuo tipificado cercano a 2, por lo que, tal y como aparecía en el gráfico de dispersión, todos los datos son significativos.

Estudiada la regresión no lineal, se han obtenido las siguientes relaciones posibles:

$$k = 0.1065 * D_{15}^{2.141} \qquad R^2 = 0.9919 \qquad \text{Ecuación 81}$$

$$k = 0.1118 * D_{15}^2 \qquad R^2 = 0.9901 \qquad \text{Ecuación 82}$$

($D_{100} = 10$ mm, k en cm/s, D_{15} en mm)

De nuevo la expresión simplificada, ($n^{\circ 2}$), tiene suficiente precisión como para ser la finalmente propuesta.

6.5.6.5 Relación k - D_{15} para 120 s de tiempo de compactación

En este caso son 4 los ensayos realizados, todos ellos con $D_{100} = 10$ mm y con un D_{15} que oscila entre 0.8 mm y 1.6 mm. La razón de que en este caso se hayan ensayado filtros con D_{15} mayores es que en los resultados NEF es de esperar que el D_{15}

límite¹⁹ vaya aumentando para cada muestra de suelo base con la compactación, por lo que para 120 segundos de vibrado por tongada, es de esperar que éste D_{15FL} adopte valores superiores.

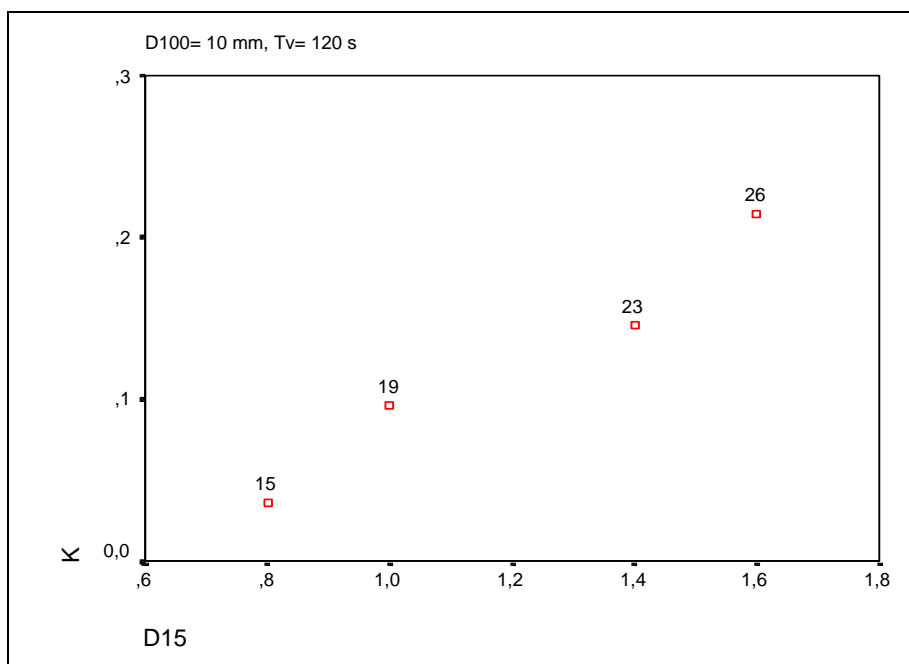


Gráfico 16.- Correlación Permeabilidad- D_{15} para $T_v=120$ s y $D_{100}=10$ mm

En el gráfico de dispersión se observa una aparente relación lineal e incluso puede ser potencial, por lo que se ha realizado la misma secuencia de estudio estadístico que en los apartados anteriores.

Resumen del modelo^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Cambiar los estadísticos				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F
1	,981 ^a	,961	,942	1,81873E-02	,961	49,857	1	2	,019

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: K

¹⁹ El D_{15} del filtro límite se refiere al mayor D_{15} que da lugar a un “Éxito” en los ensayos NEF

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1,649E-02	1	1,649E-02	49,857	,019 ^a
	Residual	6,616E-04	2	3,308E-04		
	Total	1,715E-02	3			

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: K

Coefficientes^a

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coefficient es estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad		
	B	Error tip.	Beta			Limite inferior	Limite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV	
1	(Constante)	,121	,036	-3,380	,077	-,274	,033						
	D15	,203	,029	7,061	,019	,079	,327	,961	,961	,961	1,000	1,000	

a. Variable dependiente: K

Tabla 23.- Regresión Lineal k - D_{15} para $T_v=120$ s y $D_{100}=10$ mm

Efectivamente la regresión lineal obtiene un coeficiente R^2 muy elevado, (0.961), aunque la significancia del coeficiente de D_{15} es de 0.010, más alta que en los casos anteriores. Por otra parte destaca el hecho de que no hay ningún dato con un residuo tipificado cercano a 2 por lo que todos los datos son representativos.

Estadísticos sobre los residuos^a

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típ.	N
Valor pronosticado	4,18E-02	,204247	,123027	7,41428E-02	4.
Residual	-1,8E-02	1,41E-02	3,82E-17	1,48499E-02	4.
Valor pronosticado tip.	-1,095	1,095	,000	1,000	4.
Residuo tip.	-,992	,775	,000	,816	4.

a. Variable dependiente: K

Tabla 24.- Regresión Lineal k - D_{15} para $T_v=120$ s y $D_{100}=10$ mm: estudio de los residuos tipificados

A continuación se ha estudiado la regresión no lineal, obteniéndose los siguientes modelos:

• $k = 0.0777 * D_{15}^{2.1067}$ $R^2 = 0.9595$ **Ecuación 83**

• $k = 0.0808 * D_{15}^2$ $R^2 = 0.9580$ **Ecuación 84**

($D_{100} = 10$ mm, k en cm/s, D_{15} en mm)

Al igual que ocurriera en los casos anteriores, el coeficiente R^2 es suficientemente alto considerando un modelo simplificado en el que el exponente de D_{15} es igual a 2.

6.5.6.6 Permeabilidad-granulometría: Conclusiones

Habiéndose obtenido una relación entre permeabilidad y D_{15} para cada uno de los tiempos de vibrado, los modelos propuestos en cada caso son los siguientes:

- $T_v = 0 \text{ s}$ $k = 0.349 * D_{15}^{1.388}$ $R^2 = 0.9876$ **Ecuación 85**
- $T_v = 15 \text{ s}$ $k = 0.179 * D_{15}^2$ $R^2 = 0.9892$ **Ecuación 86**
- $T_v = 60 \text{ s}$ $k = 0.1118 * D_{15}^2$ $R^2 = 0.9901$ **Ecuación 87**
- $T_v = 120 \text{ s}$ $k = 0.0808 * D_{15}^2$ $R^2 = 0.9580$ **Ecuación 88**

($D_{100}=10\text{mm}$, k en cm/s , D_{15} en mm)

Efectivamente, al aumentar la compactación va disminuyendo el coeficiente que multiplica al D_{15} de forma que ese aumento de compactación se traduce en un tendido de la curva $k - D_{15}$, tal y como se aprecia claramente en el gráfico siguiente en el que se ha representado ésta relación para cada tipo de compactación.

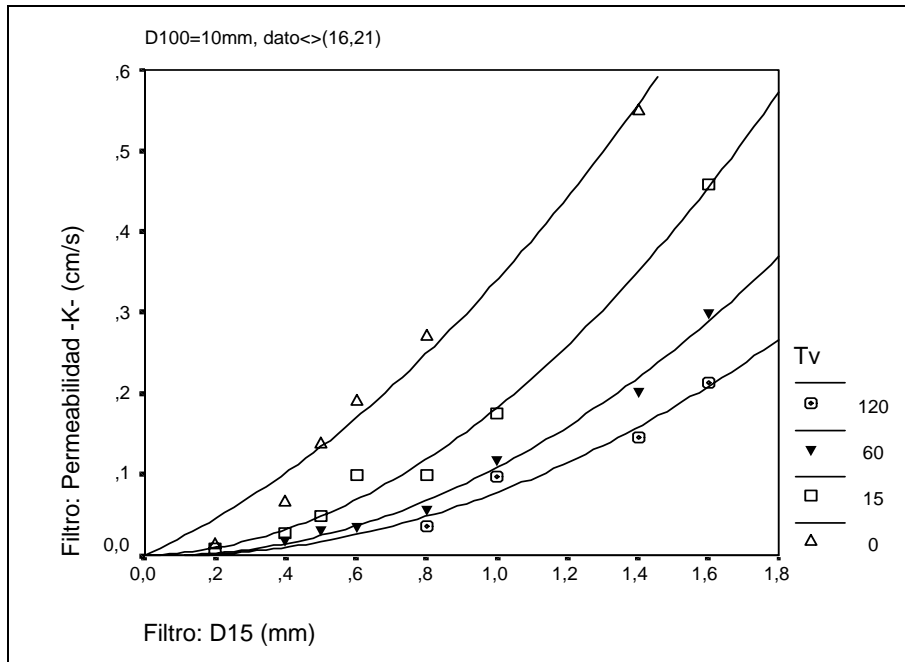


Gráfico 17.- Correlación Permeabilidad- D_{15} para cualquier tiempo de compactación y $D_{100}=10\text{mm}$

6.5.7 Correlación entre granulometría y porosidad

6.5.7.1 *Introducción*

El estudio anterior ha permitido obtener una muy buena relación entre la permeabilidad y la granulometría, a través del D_{15} , pero ha sido preciso diferenciar entre cada tiempo de compactación.

Para poder llegar a una expresión que ligue permeabilidad y granulometría para cualquier energía de compactación, es preciso introducir la densidad seca del filtro, o aun mejor, su porosidad, pero puesto que es posible que granulometría y porosidad no sean variables independientes, es preciso estudiar previamente la posible relación entre ellas. Por lo tanto, en el presente apartado se va a estudiar la relación entre la porosidad y la granulometría, de nuevo representada por su D_{15} .

En principio, para un mismo D_{100} , (al ser las granulometrías lineales en papel semilogarítmico), al aumentar el D_{15} , aumenta también la pendiente de la curva granulométrica y por lo tanto es de esperar que la porosidad aumente al no haber partículas de tamaños inferiores que puedan ocupar los huecos dejados por las de mayor tamaño.

Pero también es conocido que la compactación tiene una clara influencia en la porosidad, haciéndola disminuir al aumentar el tiempo de vibrado, aunque también es lógico esperar que este aumento tenga un límite a partir del cual, una mayor compactación no consigue mayor porosidad debido a fenómenos de rebote elástico y rotura de partículas.

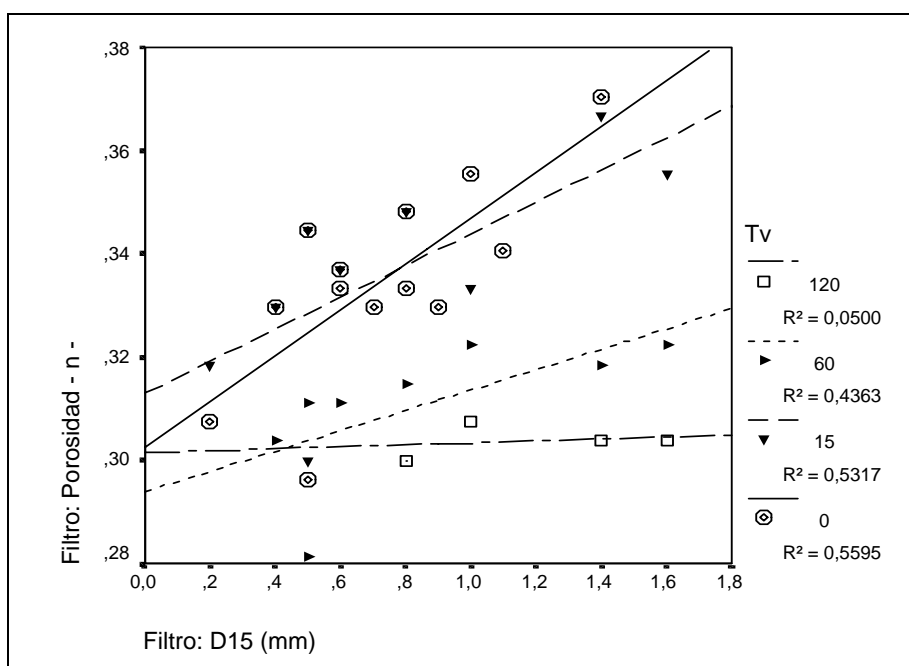


Gráfico 18.- Correlación Porosidad- D_{15} según el tiempo de vibrado

En el anterior gráfico de dispersión se ha representado la porosidad del filtro con respecto al D_{15} , para cada tiempo de compactación por vibrado, incluyéndose todos los datos. Al igual que en el estudio *permeabilidad - D_{15}* , el presente análisis se ha llevado a cabo para aquellos ensayos con $D_{100}= 10\text{mm}$, con lo que la representación gráfica queda de la siguiente forma:

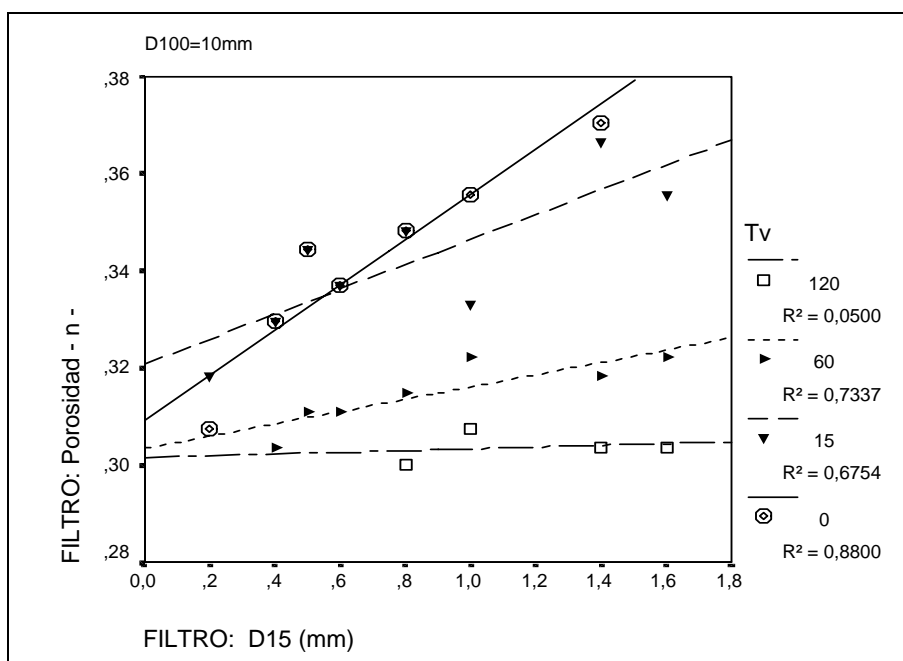


Gráfico 19.- Correlación Porosidad- D_{15} según el tiempo de vibrado: con $D_{100}=10\text{mm}$

En el gráfico se aprecia perfectamente que la relación entre porosidad, n , y D_{15} es aparentemente lineal, disminuyendo la pendiente de la recta al aumentar la compactación, de forma que para 120 s de vibrado por tongada, la porosidad es prácticamente constante independiente de la granulometría, lo cual es lógico.

A continuación se va a realizar el estudio de la regresión para cada tiempo de compactación, con análisis de la varianza y detección de posibles datos anómalos; y posteriormente se tratará de obtener una única relación con la terna *porosidad - D_{15} - compactación*.

6.5.7.2 Relación (Porosidad- D_{15}) para 0 s de tiempo compactación

Hay un total 7 ensayos con $D_{100}= 10\text{ mm}$ y tiempo de vibrado de 0 segundos, en los cuales el D_{15} va desde 0.20 mm a 1.4 mm. Con estos datos se ha realizado un estudio de la regresión lineal obteniéndose un coeficiente R^2 de 0.880, siendo la relación significativa a nivel 0.002.

Resumen del modelo^ª

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Cambiar los estadísticos				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F
1	,938 ^a	,880	,856	7,5995E-03	,880	36,667	1	5	,02

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: n

ANOVA^ª

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	2,118E-03	1	2,118E-03	36,667	,002 ^a
	Residual	2,888E-04	5	5,775E-05		
	Total	2,406E-03	6			

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: n

Coefficientes^ª

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficiente estandarizado	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad		
		B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV	
1	(Constante)	,309	,006		50,755	,000	,294	,325						
	D15	4,649E-02	,008	,938	6,055	,002	,027	,066	,938	,938	,938	1,000	1,000	

a. Variable dependiente: n

Tabla 25.- Regresión lineal Porosidad-D₁₅ para D₁₀₀=10mm y Tv= 0s

Por otra parte, se han estudiado los residuos tipificados no encontrándose ningún caso que tenga un residuo cercano a 2 por lo que todos los datos son representativos.

Diagnósticos por caso^ª

Número de caso	Residuo tip.	n	Valor pronosticado	Residual
1	-1,467	,307	,31856	-1,1E-02
6	1,571	,344	,33250	1,19E-02

a. Variable dependiente: n

Estadísticos sobre los residuos^ª

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típ.	N
Valor pronosticado	,31856	,37434	,34180	1,8787E-02	7
Residual	-1,1E-02	1,19E-02	8,72E-17	6,9374E-03	7
Valor pronosticado tip.	-1,237	1,732	,000	1,000	7
Residuo tip.	-1,467	1,571	,000	,913	7

a. Variable dependiente: n

Tabla 26.- Regresión lineal Porosidad-D₁₅ para D₁₀₀=10mm y Tv= 0s: Estudio de los residuos tipificados

El modelo de regresión lineal propuesto es por lo tanto:

$$n = 0.309 + 0.0465 * D_{15} \quad R^2 = 0.880 \quad \text{Ecuación 89}$$

Aunque es necesario tener en cuenta que dentro del intervalo de confianza del 95%, el término independiente oscila entre 0.294 y 0.325; y por su parte, el coeficiente que multiplica al D_{15} oscila entre 0.027 y 0.068.

6.5.7.3 Relación (Porosidad- D_{15}) para 15 s de tiempo compactación

En este caso hay 8 datos obtenidos de los ensayos de permeabilidad, en los cuales el $D_{100} = 10$ mm y el D_{15} oscila entre 0.2 mm y 1.6 mm. La metodología empleada es análoga a la del apartado anterior, por tanto, se ha realizado el estudio de la regresión lineal, obteniéndose un coeficiente R^2 de 0.675, siendo la relación significativa a nivel 0.012.

Resumen del model^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Cambiar los estadísticos				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F
1	,822 ^a	,675	,621	9,4167E-03	,675	12,486	1	6	,012

a. Variables predictoras: (Constante), D_{15}

b. Variable dependiente: n

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1,107E-03	1	1,107E-03	12,486	,012 ^a
	Residual	5,320E-04	6	8,867E-05		
	Total	1,639E-03	7			

a. Variables predictoras: (Constante), D_{15}

b. Variable dependiente: n

Coefficientes^a

Modelo	Coeficientes no estandarizados	Error típ.	Coeficientes estandarizados	Beta	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%			Correlaciones			Estadísticos de colinealidad		
							Limite inferior	Limite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV		
1	(Constante)	,321	,007		47,439	,000	,304	,337							
	D_{15}	2,561E-02	,007	,822	3,534	,012	,304	,043	,822	,822	,822	1,000	1,000		

a. Variable dependiente: n

Tabla 27.- Regresión lineal Porosidad- D_{15} para $D_{100}=10$ mm y $T_v= 15$ s

En cuanto al estudio de los posibles datos anómalos, no hay ninguno con un residuo tipificado superior a 1.5.

Diagnósticos por caso^a

Número de caso	Residuo tip.	n	Valor pronosticado	Residual
7	1,145	,344	,33367	1,08E-02
17	-1,395	,333	,34647	-1,3E-02
21	1,057	,367	,35671	9,96E-03

a. Variable dependiente: n

Estadísticos sobre los residuos^a

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típ.	N
Valor pronosticado	,32598	,36183	,34167	1,2577E-02	8
Residual	-1,3E-02	1,08E-02	1,39E-17	8,7182E-03	8
Valor pronosticado tip.	-1,247	1,603	,000	1,000	8
Residuo tip.	-1,395	1,145	,000	,926	8

a. Variable dependiente: n

Tabla 28.- Regresión lineal *Porosidad-D₁₅* para *D₁₀₀*=10mm y *T_v*= 15s: Estudio de los residuos tipificados

El modelo propuesto para la regresión lineal es el siguiente:

$$n = 0.321 + 0.0465 * D_{15} \quad R^2 = 0.675 \quad \text{Ecuación 90}$$

Como se puede ver, el valor de R^2 es demasiado bajo como para dar validez a la anterior expresión, por otra parte, el coeficiente que multiplica al D_{15} tiene una gran fluctuación, (entre 0.008 y 0.043), dentro del intervalo de confianza del 95%. Esto se ha interpretado concluyendo que la expresión no es válida cuantitativamente, pero sí la tendencia cualitativa de que la porosidad aumenta al hacerlo el D_{15} .

6.5.7.4 Relación (Porosidad- D_{15}) para 60 s de tiempo compactación

Con 60 segundos de vibración por tongada hay 7 datos, todos ellos con D_{100} = 10 mm y D_{15} entre 0.4 mm y 1.6 mm.

Siguiendo el mismo razonamiento que en los apartados anteriores, se ha estudiado la regresión lineal obteniéndose un coeficiente R^2 de 0.734. Tampoco en este caso se

han encontrado datos que puedan considerarse anómalos al estudiar sus residuos por lo que el modelo lineal finalmente propuesto tiene la siguiente expresión:

$$n = 0.303 + 0.0126 * D_{15} \quad R^2 = 0.734 \quad \text{Ecuación 91}$$

Aunque en este caso, el coeficiente R^2 es mayor que el obtenido para 15 segundos de vibrado, no lo es lo suficiente como para poder considerar cuantitativamente válida dicha expresión, de hecho, el coeficiente que multiplica al D_{15} varía entre 0.004 y 0.021. Por lo tanto lo único que si es claramente significativo es la relación cualitativa entre la porosidad y el D_{15} .

A continuación se exponen las tablas resumen de los resultados del estudio estadístico llevado a cabo.

Resumen del modelo^a

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Cambiar los estadísticos				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F
1	,857 ^a	,734	,680	3,8223E-03	,734	13,778	1	5	,014

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: n

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	2,013E-04	1	2,013E-04	13,778	,014 ^a
	Residual	7,305E-05	5	1,461E-05		
	Total	2,743E-04	6			

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: n

Coefficientes^a

Modelo	Coeficientes no estandarizados	Error típ.	Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad		
						Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV	
1	(Constante)	,303	,003	89,560	,000	,295	,312						
	D15	1,264E-02	,003	,857	,014	,004	,021	,857	,857	,857	1,000	1,000	

a. Variable dependiente: n

Tabla 29.- Regresión lineal Porosidad- D_{15} para $D_{100}=10\text{mm}$ y $T_v=60\text{s}$

En cuanto a la representatividad de los datos, no hay ninguno con un residuo tipificado superior a 2 por lo que todos pueden considerarse representativos.

6.5.7.5 Relación (Porosidad-D₁₅) para 120 s de tiempo compactación

Hay sólo 4 datos en los que el D₁₀₀= 10 mm y el tiempo de vibrado es de 120 segundos por tongada. En este caso el D₁₅ varía entre 0.8 mm y 1.6 mm.

Al ser reducido el número de datos disponibles y al observar el gráfico de dispersión D₁₅ – n, se puede esperar que la regresión lineal no consiga un modelo con un alto coeficiente R². Efectivamente, como se puede observar en las tablas resumen del estudio estadístico, el coeficiente R² es tan sólo 0.050, pero además destaca que el modelo propuesto supone una recta casi horizontal, ya que la pendiente, 0.0019, es muy reducida.

La expresión del modelo de regresión lineal es la siguiente:

$$n = 0.301 + 0.0019 * D_{15} \quad R^2 = 0.050 \quad \text{Ecuación 92}$$

Pero hay que destacar que además del valor bajo del coeficiente R², la correlación es significativa a nivel 0.776. Por otra parte, el valor de la pendiente de la recta de regresión dentro del intervalo de confianza del 95 % varía entre -0.023 y 0.026, por lo que dentro de esa variación está incluido el cero.

De todo ello se concluye que la porosidad no depende significativamente de la granulometría cuando la energía de compactación es muy alta, en este caso 120 segundos de vibración por tongada. (Por supuesto para los rangos de variación de la granulometría estudiados).

Resumen del model^a

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Cambiar los estadísticos				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F
1	,224 ^a	,050	-,425	3,6099E-03	,050	,105	1	2	,776

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: n

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1,372E-06	1	1,372E-06	,105	,776 ^a
	Residual	2,606E-05	2	1,303E-05		
	Total	2,743E-05	3			

a. Variables predictoras: (Constante), D15

b. Variable dependiente: n

Coefficientes^a

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coefficient es estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad		
	B	Error tip.	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV	
1	(Constante)	,301	,007	42,563	,001	,271	,332						
	D15	1,852E-03	,006	,224	,776	-,023	,026	,224	,224	,224	1,000	1,000	

a. Variable dependiente: n

Tabla 30.- Regresión lineal *Porosidad-D₁₅* para $D_{100}=10\text{mm}$ y $T_v=120\text{s}$

Tampoco en este caso hay datos anómalos.

6.5.7.6 Relación (*Porosidad-D₁₅*) para cualquier tiempo de compactación

Del estudio estadístico realizado en los apartados anteriores se ha obtenido el siguiente modelo de regresión lineal para cada tiempo de vibración por tongada:

$$T_v = 0 \text{ segundos} \quad n = 0.309 + 0.0465 * D_{15} \quad R^2 = 0.880 \quad \text{Ecuación 93}$$

$$T_v = 15 \text{ segundos} \quad n = 0.321 + 0.0256 * D_{15} \quad R^2 = 0.675 \quad \text{Ecuación 94}$$

$$T_v = 60 \text{ segundos} \quad n = 0.303 + 0.0126 * D_{15} \quad R^2 = 0.734 \quad \text{Ecuación 95}$$

$$T_v = 120 \text{ segundos} \quad n = 0.301 + 0.0019 * D_{15} \quad R^2 = 0.050 \quad \text{Ecuación 96}$$

Al estudiar todas las expresiones a la vez se puede ver claramente, independientemente de lo ya comentado de falta de validez cuantitativa, que la recta de regresión mantiene en todos los casos el valor de la ordenada en el origen prácticamente constante, lo que representa que si el filtro es extremadamente fino, la porosidad es casi constante sea cual sea la compactación. Por otro lado se observa que la pendiente de la recta va disminuyendo claramente al aumentar la compactación lo cual es también lógico, ya que en el límite, si la compactación es

excesivamente alta, es posible que se produzcan roturas de partículas de filtro con la consiguiente alteración de la granulometría original, pero además aparecen fenómenos de rebote elástico entre las partículas que dan lugar incluso a procesos de descompactación.

Este extremo se ha comprobado realizando un ensayo en el cual una misma probeta de filtro se iba compactando sucesivamente con mayor energía, anotando el aumento de densidad y por tanto la disminución de la porosidad en cada fase. Al principio la bajada de porosidad era muy fuerte, pero la curva entraba en una fase de relajación con posterior tramo de fluctuación aleatoria a partir de un determinado valor de la energía de compactación, como se puede ver en el siguiente gráfico:

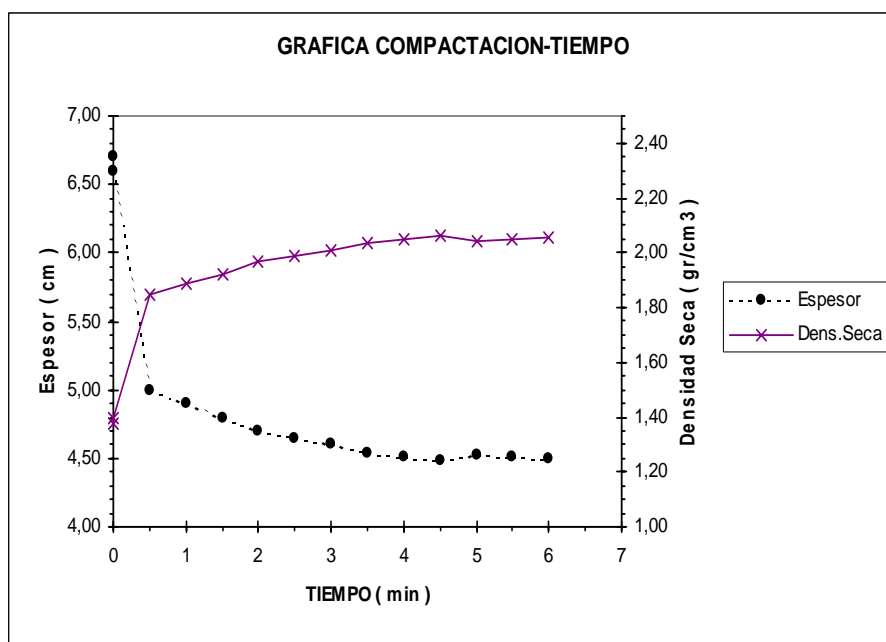


Gráfico 20.- Variación de la densidad del filtro según el tiempo de vibrado

Para tratar de obtener un único modelo en el que se tenga en cuenta tanto la granulometría como la energía de compactación, se ha estudiado la regresión lineal tomando a la porosidad como variable dependiente y al D_{15} y el logaritmo decimal del tiempo de vibrado, como variables independientes. Se ha tomado el logaritmo del

tiempo de vibrado ya que de esta forma se obtiene una relación más cercana a la lineal.

Correlaciones

		n	D15	Lg(Tv)
Correlación de Pearson	n	1,000	,207	-,514
	D15	,207	1,000	,272
	Lg(Tv)	-,514	,272	1,000
Sig. (unilateral)	n	,	,155	,004
	D15	,155	,	,089
	Lg(Tv)	,004	,089	,
N	n	26	26	26
	D15	26	26	26
	Lg(Tv)	26	26	26

Tabla 31.- Porosidad en función del D₁₅ y el Tiempo de Vibrado: Regresión lineal

En primer lugar es interesante estudiar el coeficiente de Pearson entre cada dos variables, destacando que efectivamente la porosidad aumenta con el D₁₅, aunque la correlación es muy pequeña, y disminuye con el tiempo de vibrado, siendo esta variable la más influyente.

Resumen del modelo^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Cambiar los estadísticos				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F
1	,628 ^a	,395	,342	1,6816E-02	,395	7,495	2	23	,003

a. Variables predictoras: (Constante), Lg(Tv), D15

b. Variable dependiente: n

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	4,239E-03	2	2,119E-03	7,495	,003 ^a
	Residual	6,504E-03	23	2,828E-04		
	Total	1,074E-02	25			

a. Variables predictoras: (Constante), Lg(Tv), D15

b. Variable dependiente: n

Coefficientes^a

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad		
	B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV	
1	(Constante)	,318	,007		43,525	,000	,303	,334					
	D15	1,737E-02	,008	,375	2,223	,036	,001	,034	,207	,420	,361	,926	1,080
	Lg(Tv)	-7,72E-03	,002	-,616	-3,655	,001	-,012	-,003	-,514	-,606	-,593	,926	1,080

a. Variable dependiente: n

Tabla 32.- Regresión lineal: n = f (D_{15F}, log(Tv))

La regresión lineal da lugar a un coeficiente R^2 de sólo 0.395, destacando que la influencia del D_{15} es significativa a nivel 0.036 y el tiempo de vibrado al nivel 0.001.

A continuación se ha estudiado la correlación entre las dos variables independientes siendo efectivamente muy pequeña.

Correlaciones de los coeficientes^a

Modelo		Lg(Tv)	D15
1	Correlaciones	Lg(Tv)	1,000
		D15	-,272
	Covarianzas	Lg(Tv)	4,462E-06
		D15	-4,49E-06
			6,109E-05

a. Variable dependiente: n

Tabla 33.- Regresión lineal $-n = f(D_{15F}, \log(Tv))$ - : Correlaciones entre los coeficientes

Por otra parte, al igual que en los casos anteriores, se han estudiado los residuos tipificados de los datos para tratar de detectar valores anómalos, apareciendo como posibles datos anómalos el nº21 y el nº1, sin embargo, dada la baja correlación encontrada, no se va a proceder a estudiar la posibilidad de eliminar los datos anómalos.

Diagnósticos por caso^a

Número de caso	Residuo tip.	n	Valor pronosticado	Residual
1	-1,779	,307	,33732	-3,0E-02
7	1,572	,344	,31801	2,64E-02
10	1,028	,337	,31974	1,73E-02
13	1,483	,348	,32322	2,49E-02
21	1,964	,367	,33364	3,30E-02
23	-1,366	,304	,32667	-2,3E-02
24	1,097	,356	,33711	1,84E-02
26	-1,572	,304	,33014	-2,6E-02

a. Variable dependiente: n

Estadísticos sobre los residuos^a

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típ.	N
Valor pronosticado	,31162	,35817	,32863	1,3021E-02	26
Residual	-3,0E-02	3,30E-02	5,76E-17	1,6129E-02	26
Valor pronosticado tip.	-1,306	2,268	,000	1,000	26
Residuo tip.	-1,779	1,964	,000	,959	26

a. Variable dependiente: n

Tabla 34.- Regresión lineal $n = f(D_{15F}, \log(Tv))$ - : estudio de los residuos

A modo de conclusión se puede decir que aunque existe una clara dependencia cuantitativa entre la porosidad, el D_{15} y el tiempo de vibrado; no es posible obtener un buen modelo de regresión lineal entre estas variables. Por otra parte, ya se ha comentado anteriormente que no es adecuado utilizar como variable de estudio el tiempo de vibrado puesto que no es una forma válida de representar la energía de compactación, ya que no puede ser perfectamente reproducible en otras investigaciones, por ello parece más adecuado buscar una relación entre la permeabilidad, la granulometría y la porosidad, sin necesidad de distinguir el tiempo de vibrado.

6.5.8 Correlación entre permeabilidad, granulometría y porosidad**6.5.8.1 Introducción**

En los apartados anteriores se ha estudiado por un lado la relación entre la permeabilidad y la granulometría y por otro la relación entre la granulometría y la porosidad, pero en ambos casos distinguiendo para cada tiempo de compactación por vibrado.

Puesto que para una misma granulometría, la porosidad depende exclusivamente del tiempo de vibrado, si a las muy buenas relaciones encontradas anteriormente entre la permeabilidad y el D_{15} se le añade la porosidad, se está teniendo en cuenta la energía de compactación y por tanto se puede obtener una única relación $k-D_{15}-n$ que sea válida en cualquier caso.

6.5.8.2 Regresión lineal - $k = f(D_{15}, n)$ -

En primer lugar se ha estudiado la regresión lineal tomando la permeabilidad como variable independiente y la porosidad y el D_{15} , como variables independientes. Este estudio se ha realizado para filtros granulometría lineal, con $D_{100} = 10$ mm por las

razones ya expuestas anteriormente, teniendo por tanto un total de 26 datos, en los que el D_{15} varía entre 0.2 mm y 1.6 mm.

Correlaciones

		K	D15	n
Correlación de Pearson	K	1,000	,678	,719
	D15	,678	1,000	,207
	n	,719	,207	1,000
Sig. (unilateral)	K	,	,000	,000
	D15	,000	,	,155
	n	,000	,155	,
N	K	26	26	26
	D15	26	26	26
	n	26	26	26

Tabla 35.- Regresión lineal: $k=f(D_{15}, n)$: $D_{100}=10\text{mm}$

Al tener dos variables independientes es necesario comprobar la posible relación entre ellas. En la tabla se puede ver el coeficiente de correlación de Pearson entre cada dos variables. En primer lugar destaca que la influencia del D_{15} y la porosidad n son parecidas, si bien el coeficiente es algo superior para el caso de la porosidad, además, ambas relaciones son significativas a nivel 0.000. Pero también queda reflejada la relación entre el D_{15} y n , con un coeficiente de correlación de Pearson de 0.027 y una significancia al nivel 0.155.

De estos resultados se deduce que es posible encontrar un buen modelo bivalente que se estudia a continuación:

Resumen del modelo^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Cambiar los estadísticos				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F
1	,900 ^a	,811	,794	8,76263E-02	,811	49,191	2	23	,000

a. Variables predictoras: (Constante), n, D15

b. Variable dependiente: K

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,755	2	,378	49,191	,000 ^a
	Residual	,177	23	7,678E-03		
	Total	,932	25			

a. Variables predictoras: (Constante), n, D15

b. Variable dependiente: K

Coeficientes^a

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coefficient es estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad		
	B	Error tip.	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV	
1 (Constante)	-1,879	,279		-6,724	,000	-2,457	-1,301						
D15	,239	,040	,553	5,963	,000	,156	,322	,678	,779	,541	,957	1,045	
n	5,634	,864	,605	6,520	,000	3,847	7,422	,719	,806	,592	,957	1,045	

a. Variable dependiente: K

Tabla 36.- Regresión lineal $k = f(D_{15}, n)$: $D_{100}=10\text{mm}$

En cuanto a la regresión lineal, se obtiene el siguiente modelo:

$$k = -1.879 + 0.239 \cdot D_{15} + 5.634 \cdot n \quad R^2 = 0.811 \quad \text{Ecuación 97}$$

Al igual que se ha realizado anteriormente, para dar validez a la anterior expresión hay que comprobar, mediante el estudio de los residuos tipificados, si hay o no datos anómalos que se correspondan con posibles errores de medida o de realización del ensayo.

Diagnósticos por caso^a

Número de caso	Residuo tip.	K	Valor pronosticado	Residual
1	1,267	,0121	-9,894259E-02	,111000
5	1,034	,0186	-7,203820E-02	9,06E-02
7	-1,509	,0492	,181397	-,132239
13	-1,998	,0988	,273923	-,175102
16	1,508	,4955	,363432	,132106
21	2,870	,7730	,521581	,251457

a. Variable dependiente: K

Estadísticos sobre los residuos^a

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típ.	N
Valor pronosticado	-9,9E-02	,542449	,179583	,173829	26
Residual	-,175102	,251457	-1,8E-16	8,40482E-02	26
Valor pronosticado tip.	-1,602	2,087	,000	1,000	26
Residuo tip.	-1,998	2,870	,000	,959	26

a. Variable dependiente: K

Tabla 37.- Regresión lineal $k = f(D_{15}, n)$: $D_{100}=10\text{mm}$ - Estudio de los residuos tipificados

Hay que destacar que efectivamente el dato n°21 es claramente anómalo y también presenta anomalía el dato n°13. Por ello se ha procedido a su eliminación y de nuevo se estudia la regresión lineal. Por supuesto que al eliminar estos datos, es posible que

aparezcan nuevos datos anómalos, por lo que se ha repetido el estudio completo, tal y como se resume en las tablas siguientes:

Correlaciones

		K	D15	n
Correlación de Pearson	K	1,000	,696	,708
	D15	,696	1,000	,137
	n	,708	,137	1,000
Sig. (unilateral)	K	,	,000	,000
	D15	,000	,	,262
	n	,000	,262	,
N	K	24	24	24
	D15	24	24	24
	n	24	24	24

Diagnósticos por caso^a

Número de caso	Residuo tip.	K	Valor pronosticado	Residual
1	1,418	,0121	-7,236196E-02	8,44E-02
5	1,129	,0186	-4,863232E-02	6,72E-02
7	-2,135	,0492	,176223	-,127066
10	-1,012	,1001	,160307	-6,0E-02
16	2,657	,4955	,337413	,158125

a. Variable dependiente: K

Tabla 38.- Regresión lineal $k = f(D_{15}, n)$: $D_{100}=10\text{mm}$, Sin datos nº13, nº21

Efectivamente ahora aparecen como anómalos los datos nº16 y nº7, debiendo ser de nuevo eliminados. Sobre este punto es interesante señalar que ya en los estudios anteriores se había detectado la anomalía de los datos nº16 y nº21, que ahora se reconfirma; pero el estudio conjunto k -D15-n ha permitido detectar dos nuevos datos con elevado residuo tipificado.

Por ello se ha procedido al estudio de la regresión lineal eliminando los datos nº7, nº13, nº16 y nº21, quedando por lo tanto 21 datos en el estudio.

Correlaciones

		K	D15	n
Correlación de Pearson	K	1,000	,742	,726
	D15	,742	1,000	,163
	n	,726	,163	1,000
Sig. (unilateral)	K	,	,000	,000
	D15	,000	,	,235
	n	,000	,235	,
N	K	22	22	22
	D15	22	22	22
	n	22	22	22

Tabla 39.- Regresión lineal $k = f(D_{15}, n)$: $D_{100}=10\text{mm}$. Sin datos n^o7, 13, 16, 21

De nuevo el estudio de la matriz de coeficientes de Pearson refleja la relación entre las distintas variables, si bien ahora ha mejorado el valor del coeficiente al prescindirse de los datos anómalos. Destaca además que es muy baja la correlación entre el D_{15} y la porosidad n .

Resumen del model^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error tip. de la estimación	Cambiar los estadísticos				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F
1	,963 ^a	,927	,919	4,08209E-02	,927	120,818	2	19	,000

a. Variables predictoras: (Constante), n, D15

b. Variable dependiente: K

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,403	2	,201	120,818	,000 ^a
	Residual	3,166E-02	19	1,666E-03		
	Total	,434	21			

a. Variables predictoras: (Constante), n, D15

b. Variable dependiente: K

Coefficientes^a

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad		
		B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV	
		1	(Constante)	-1,556			,153		-10,140	,000	-1,877	-1,235		
	D15	,198	,019	,641	10,217	,000	,157	,239	,742	,920	,633	,974	1,027	
	n	4,734	,478	,621	9,899	,000	3,733	5,735	,726	,915	,613	,974	1,027	

a. Variable dependiente: K

Tabla 40.- Modelo de regresión lineal $k = f(D_{15}, n)$: $D_{100}=10\text{mm}$. Sin datos n^o7, 13, 16, 21

Ahora el modelo de regresión lineal propuesto tiene la siguiente expresión:

$$k = -1.556 + 0.198 * D_{15} + 4.734 * n \quad R^2 = 0.927 \quad \text{Ecuación 98}$$

El elevado valor del coeficiente R^2 indica que es muy representativa la relación encontrada, además, esta relación es significativa al nivel 0.000 y ninguno de los factores de la expresión tiene una gran fluctuación dentro del intervalo de confianza del 95%.

Por otra parte, hay que destacar que al estudiar los residuos tipificados, en ningún caso superan el valor de 2 por lo que se puede considerar que todos los datos empleados en esta regresión son representativos.

A modo de conclusión se puede decir que el modelo lineal - $k = f(D_{15}, n)$ - obtenido se puede considerar válido dentro del intervalo de variación de los datos empleados.

6.5.8.3 Regresión no lineal - $k = f(D_{15}, n)$ -

Aunque el modelo de regresión lineal obtenido en el apartado anterior se puede considerar como perfectamente válido, no es frecuente su empleo, ya que la mayoría de los investigadores han optado por relaciones del tipo potencial, como por ejemplo Zuerbrei, Taylor o Kozeny-Karman:

Taylor	$k = D_s^2 \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{e^3}{(1+e)} \cdot C$	Ecuación 99
--------	--	--------------------

Kozeny-Karman	$k = \frac{1}{k_0 \cdot S^2} \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{e^3}{(1+e)}$	Ecuación 100
---------------	--	---------------------

Hazen	$k = 100 D_{10}^2$	k (cm/s), D_{10} (cm) Ecuación 101
-------	--------------------	---

Por ello, en primer lugar se ha estudiado la regresión no lineal entre la permeabilidad, el D_{15} y la porosidad n con un modelo del tipo - $k = a * (D_{15}^b) * (n^c)$ - y posteriormente se ha tratado de encontrar expresiones más sencillas en las que los exponentes sean números enteros.

El resultado obtenido es el siguiente:

$$k = 261.67 * D_{15}^{1.09} * n^{6.57} \quad R^2 = 0.942 \quad \text{Ecuación 102}$$

$$k = 4.117 * D_{15}^2 * n^3 \quad R^2 = 0.773 \quad \text{Ecuación 103}$$

$$k = 145.5 * D_{15} * n^6 \quad R^2 = 0.935 \quad \text{Ecuación 104}$$

($D_{100}=10 \text{ mm}$, $n^\circ \text{ Dato} \langle \rangle 7, 13, 16, 21$)

Por lo tanto se ha adoptado como expresión propuesta la tercera, ya que aunque tiene un coeficiente R^2 una centésima inferior, es aun muy alto y además este es el modelo más sencillo de todos.

Para observar las diferencias entre los valores reales y los predichos por el modelo se ha realizado el siguiente gráfico de dispersión en el que en ordenadas se ha colocado la permeabilidad real y en abscisas la estimada por el modelo propuesto.

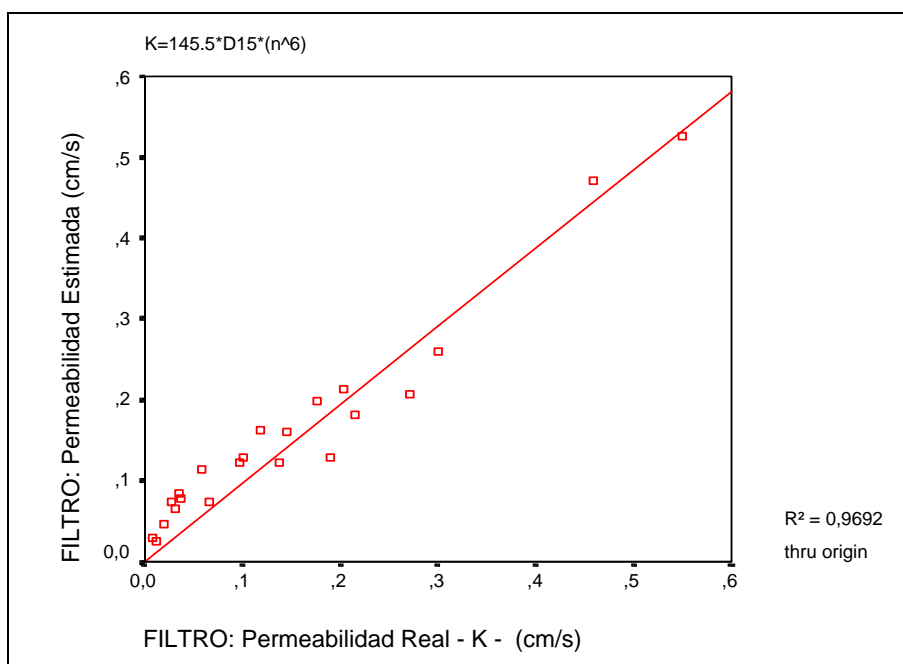


Gráfico 21.- Validez del modelo $k= f (D_{15}, n)$

Efectivamente, el modelo propuesto es muy fiable y además permite ser comparado directamente por otros investigadores sin tener que reproducir exactamente las mismas condiciones de compactación.

6.5.9 Combinación de los datos de la Presa de Canales con los de la Presente Investigación

Al comienzo del presente estudio estadístico se ha estudiado la relación entre la permeabilidad, la granulometría y la porosidad según los datos obtenidos en la investigación en realizada en la Presa de Canales por Bravo y Maeso (1985) y posteriormente se han estudiado los datos obtenidos en la Investigación propia realizada expresamente para la presente Tesis Doctoral.

En el primer caso todos los filtros tienen $D_{100}=20$ mm y la misma energía de compactación, mientras que en la Investigación propia se han empleado filtros con D_{100} de 20 o 10 mm y con cuatro tiempos diferentes de compactación.

Resulta por tanto interesante combinar todos los datos para tratar de obtener una ley global, si bien está claro que la distinta naturaleza del filtro y sistema de compactación puede reducir los coeficientes de correlación.

En el gráfico siguiente se representan todos los datos, distinguiendo con el nombre “Canales” aquellos que corresponden a la investigación de Bravo y Maeso (1985) y con el nombre “Portillo Tv” a los de la presente Investigación, donde Tv puede ser 0, 15, 60 o 120 segundos, como ya se ha visto anteriormente.

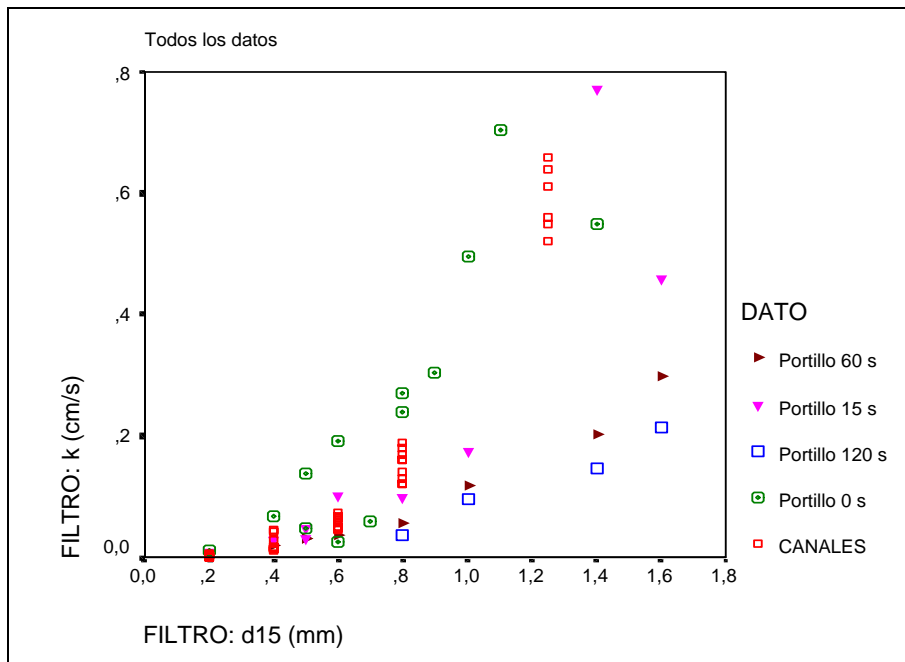


Gráfico 22.- Relación entre Permeabilidad y D₁₅ con todos los datos

En el gráfico se puede ver que efectivamente los datos de Canales coinciden bastante con los del Portillo pero con un tiempo de compactación entre 0 y 15 segundos, luego efectivamente la compactación no es totalmente comparable. En cualquier caso lo más importante es que el orden de magnitud de los valores es muy similar, sobre todo teniendo en cuenta que hay D₁₀₀ de 20 y 10 mm mezclados.

Se ha estudiado la regresión lineal con la permeabilidad como variable dependiente y la porosidad y el D_{15F} como variables independientes obteniéndose un coeficiente de correlación $R^2 = 0.684$, el cual es suficientemente alto como para apoyar efectivamente la tendencia observada de forma cualitativa, pero no permite proponer una fórmula conjunta que exprese el valor de $-k-$ en función de D_{15F} y n.

6.5.10 Conclusiones del estudio estadístico

El análisis estadístico realizado ha permitido seleccionar como variable representativa de la granulometría al D_{15} , ya que por un lado es la que obtiene mejores coeficientes de regresión y además es también la variable más frecuentemente empleada en el estudio de filtros. Además se han seleccionado la permeabilidad y la porosidad, detectando una muy buena relación entre estas tres variables.

El nuevo análisis de los datos de la investigación en la Presa de Canales confirma la relación potencial entre la permeabilidad y el D_{15} con la siguiente expresión:

$$K = 0.301 * D_{15}^3 \quad R^2 = 0.985 \quad \text{Ecuación 105}$$

Pero también se ha encontrado una nueva relación que incluye además a la porosidad, aunque en este caso, ya que todos los filtros fueron compactados con la misma energía, la influencia de la porosidad no es demasiado significativa. En cualquier caso la expresión obtenida es la siguiente:

$$K = 18.7647 * D_{15}^{2.58} * n^{3.34} \quad R^2 = 0.9907 \quad \text{Ecuación 106}$$

En todas estas expresiones la permeabilidad está expresada en cm/s y el D_{15} en mm, siendo las granulometrías lineales definidas por un $D_{100}=20$ mm y un D_{15} entre 0.2 y 1.25 mm.

En cuanto al estudio de los datos obtenidos de la serie de ensayos de permeabilidad realizados dentro de la investigación principal, en primer lugar se ha justificado que efectivamente el D_{15} es la variable granulométrica más representativa.

Posteriormente se ha estudiado la relación entre la permeabilidad y el D_{15} para cada energía de compactación definida por el tiempo de vibrado. Después de finalizar el estudio de la estimación curvilínea se ha seleccionado como mejor modelo el potencial y posteriormente se ha analizado la regresión no lineal obteniéndose las siguientes expresiones:

$$T_v = 0 \text{ s} \quad k = 0.349 * D_{15}^{1.388} \quad R^2 = 0.9876 \quad (D_{15} : 0.2 \text{ mm} - 1.6 \text{ mm})$$

Ecuación 107

$$T_v = 15 \text{ s} \quad k = 0.179 * D_{15}^2 \quad R^2 = 0.9892 \quad (D_{15} : 0.2 \text{ mm} - 1.6 \text{ mm})$$

Ecuación 108

$$T_v = 60 \text{ s} \quad k = 0.1118 * D_{15}^2 \quad R^2 = 0.9901 \quad (D_{15} : 0.4 \text{ mm} - 1.6 \text{ mm})$$

Ecuación 109

$$T_v = 120 \text{ s} \quad k = 0.0808 * D_{15}^2 \quad R^2 = 0.9580 \quad (D_{15} : 0.8 \text{ mm} - 1.6 \text{ mm})$$

Ecuación 110

En todos los casos “Tv” representa el tiempo de vibración por tongada, la permeabilidad está expresada en cm/s y las granulometrías son lineales con un $D_{100} = 10 \text{ mm}$.

A continuación se ha estudiado la relación entre la granulometría, representada de nuevo por el D_{15} , y la porosidad n , para cada energía de compactación. Se ha comprobado que estas variables presentan una relación lineal, creciendo la porosidad al aumentar el D_{15} y que la pendiente de dicha recta de regresión va disminuyendo al aumentar el tiempo de vibrado.

Las expresiones matemáticas obtenidas no alcanzan un adecuado valor del coeficiente R^2 por lo que la conclusión obtenida se limita a expresar la tendencia cualitativa. En cualquier caso, las relaciones vienen definidas por las siguientes expresiones:

$$T_v = 0 \text{ s} \quad n = 0.309 + 0.0465 * D_{15} \quad R^2 = 0.880 \quad \text{Ecuación 111}$$

$$T_v = 15 \text{ s} \quad n = 0.321 + 0.0256 * D_{15} \quad R^2 = 0.675 \quad \text{Ecuación 112}$$

$$T_v = 60 \text{ s} \quad n = 0.303 + 0.0126 * D_{15} \quad R^2 = 0.734 \quad \text{Ecuación 113}$$

$$T_v = 120 \text{ s} \quad n = 0.301 + 0.0019 * D_{15} \quad R^2 = 0.050 \quad \text{Ecuación 114}$$

Por último se ha estudiado la correlación entre la permeabilidad, el D_{15} y la porosidad, de forma que se obtenga una expresión general que no dependa de la energía de compactación.

Con la observación de que previamente se ha estudiado la relación $D_{15}-n$ y por lo tanto estas variables no son totalmente independientes, tras el estudio de regresión lineal y el posterior de regresión no lineal, se ha obtenido la siguiente expresión:

$$k = 145.5 * D_{15F} * n^6 \quad R^2 = 0.935 \quad (D_{100}=10\text{mm}, D_{15}: 0.2-1.6 \text{ mm})$$

Ecuación 115

En cuanto al estudio conjunto de los datos de Canales y el Portillo, se confirma la relación cualitativa entre la permeabilidad, el D_{15F} y la porosidad, pero no ha sido posible proponer un modelo de regresión suficientemente ajustado.

En cualquier caso, lo verdaderamente importante de este estudio es que se pueden utilizar las expresiones anteriores para estimar la permeabilidad del filtro empleado en los ensayos NEF a partir de los datos de granulometría y la compactación a la que es sometido.

No se pretende ofrecer nuevas fórmulas del tipo $k = f(D_{15F}, n)$ de validez universal porque habría que haber ensayado distintas formas de la curva granulométrica además de la lineal, habida cuenta de la influencia observada del D_{100} .

6.6 Ensayos NEF con las muestras BP-C2 y BP-C3

6.6.1 Muestra BP-C2

6.6.1.1 Resultados del ensayo tipo “Estándar”

Con la muestra de suelo base BP-C2 se han realizado un total de 6 ensayos denominados “ESTANDAR”, en los cuales se reproducen las mismas condiciones que empleó Sherard en su investigación de 1985. En el capítulo de “Metodología” se han explicado las especificaciones de este ensayo, ahora sólo interesa destacar que todos estos ensayos fueron realizados empleando arena como “material lateral”.

Para tratar de definir el “Filtro Límite”, primero se hizo una estimación del D_{15F} esperado según la recomendaciones de diseño de Sherard. En este caso, el d_{85B} es de 0.065 mm por lo que el D_{15F} debe ser igual o menor que 0.59 mm. ($9*d_{85B}$).

En primer lugar se ensayó el filtro FP-20/1.2, bastante superior al esperado, con la intención de observar un claro comportamiento del ensayo tipo “FRACASO”. Efectivamente, incluso antes de dar presión empezó a salir agua por la probeta de ensayo. Al comunicarle la presión de 4 kg/cm² apareció un elevado caudal de agua muy turbia que denotaba la importante erosión. Al finalizar los 20 minutos que dura el ensayo, aún no se había estabilizado el caudal y seguía saliendo el agua muy turbia.

Después de desmontar la probeta se midieron el orificio de entrada y el de salida siendo de 8.3 y 11.48 mm. respectivamente. Por lo tanto, queda claro que este ensayo debe clasificarse como “FRACASO”.

Posteriormente se continuaron realizando ensayos disminuyendo el D_{15F} , así se ensayaron el FP-20/1.0, (que hubo que repetir varias veces), el FP-20/0.9 y por fin el FP-20/0.8. En este último ensayo salió muy poca cantidad de agua por lo que no es posible saber si se debe a un perfecto funcionamiento del filtro o alguna obstrucción

accidental. Teniendo en cuenta que el ensayo anterior con el FP-20/0.9 sí tuvo una salida apreciable de agua que terminó estabilizándose y que al ser el diámetro final del orificio de 1.60mm. este ensayo se clasificó como “FRACASO”, aunque cercano a la frontera del “EXITO”; quedaba por tanto bastante claro que el FP-20/0.8 había dado lugar a un resultado calificable como “EXITO” y por consiguiente el “Filtro Límite” quedaba delimitado para esta muestra en condiciones “ESTANDAR” como el FP-20/0.8.

Aunque aun es demasiado prematuro sacar conclusiones sobre este resultado, puede ser muy interesante compararlo con el esperado según los distintos criterios de diseño, definiendo el ratio real D_{xF}/d_{yB} .

$$D_{15F}/d_{85B}=0.8/0.065=12.31$$

$$D_{50F}/d_{50B}=3.01/9.50E-3=316.84$$

$$D_{15F}/D_{50B}=0.8/9.50E-3=84.21$$

En la tabla siguiente se puede observar la lista de criterios de filtros donde se compara el diámetro del filtro esperado según cada criterio para la base BP-C2, y el obtenido realmente en la presente investigación. Además aparece el coeficiente de seguridad expresado como el cociente entre el ratio D_{xF}/d_{yB} real y el esperado según los criterios de diseño.

Cuando este coeficiente es superior a la unidad representa que el criterio de diseño comparado es más conservador que el resultado obtenido en la investigación, lo cual es lógico que ocurra en la mayoría de los casos ya que estos criterios suelen llevar un amplio margen de seguridad, si bien hay que recordar que las condiciones del ensayo NEF de Sherard son muy estrictas.

CAPÍTULO 6.- INVESTIGACIÓN DE CHOQUE

base: BP-C2			Teorico					Real	Espe.	Real		
CRITERIO	AÑO	CONDICIONES	DF	DB	SIG	RAT.I	RAT.S	d-BAS	D-Fil E.	D-Fil R	RATIO	COEF
Thanikachalam	1974	CuB<20, CuF<32	D10	d10	=		f(Cu)	9,00E-04		0,66	733,33	
Moskva Channel Criteria	1957	CuB<5, CuF<5	D10	d60	<		5	1,50E-02	0,08	0,66	44,00	8,80
Bertram 1	1940	Arenas Unif	D15	d15	<	8	15	1,20E-03	0,02	0,80	666,67	44,44
Newton y Hurley 1	1940	Filtr Grav Base WS	D15	d15	<		32	1,20E-03	0,04	0,80	666,67	20,83
Therzaghi y Peck 2	1948		D15	d15	>		4	1,20E-03	0,00	0,80	666,67	166,67
Karpoff 3	1953	D100F<7,5mm Gran Paral	D15	d15	<	12	40	1,20E-03	0,05	0,80	666,67	16,67
Mallet y Pacqant	1954	Esferas	D15	d15	=		9	1,20E-03	0,01	0,80	666,67	74,07
USBOR 2	1960	Graduado, arenas finas y limos CuB>4	D15	d15	<	12	40	1,20E-03	0,05	0,80	666,67	16,67
USBOR 6	1960	Base Graduada. CuB>4	D15	d15	<	6	18	1,20E-03	0,02	0,80	666,67	37,04
Kenney et al. 2	1985	Base Are Unif. Filtr. WG are y grav.	D15	d50	<		5	9,50E-03	0,05	0,80	84,21	16,84
Bertram 2	1940		D15	d85	<	6	11	0,065	0,72	0,80	12,31	1,12
Newton y Hurley 2	1940	Filtr Grav Base WS	D15	d85	<		15	0,065	0,98	0,80	12,31	0,82
USCE.	1941	Filt Grad	D15	d85	=		5	0,065	0,33	0,80	12,31	2,46
Therzaghi y Peck 1	1948		D15	d85	<		4	0,065	0,26	0,80	12,31	3,08
USCE. 1	1953	Suelo Unif. Curvas Paralelas	D15	d85	<		5	0,065	0,33	0,80	12,31	2,46
Leatherwood y Peterson 1	1954	Fil Unif y Grad. Gravas y arenas	D15	d85	<		4	0,065	0,27	0,80	12,31	3,00
Sherard et al.	1984	Unif Are y Grav	D15	d85	<		9	0,065	0,59	0,80	12,31	1,37
Honjo y Veneciano 1	1989	A=5,5-0,5*(d95B/d75B) d95B/d75B <7	D15	d85	<		A	0,065		0,80	12,31	
Pavcic	1964	Suel Suffusivos. nF=Porosid Filtro. A=3*((1-nF)/nF)*1/CuF*(1/	D17	d10	<		A	9,00E-04		0,86	955,56	
Kenney et al. 1	1985	Base Are Unif. Filtr. WG are y grav.	D5	d50	<		4	9,50E-03	0,04	0,55	57,89	14,47
Prinz	1923	Suelo Unif	D50	d50	<		4	9,50E-03	0,04	3,01	316,84	71,68
Taylor	1948	Suelo Unif	D50	d50	=		7	9,50E-03	0,06	3,01	316,84	48,74
Sichardt 1	1952	Suelo Unif (Est. denso)	D50	d50	<		6	9,50E-03	0,06	3,01	316,84	49,05
Sichardt 2	1952	Suelo Unif (Est. Suelto)	D50	d50	<		2	9,50E-03	0,02	3,01	316,84	130,93
USCE. 2	1953	Suelo Unif. Curvas Paralelas	D50	d50	<		25	9,50E-03	0,24	3,01	316,84	12,67
Karpoff 1	1953	D100F<7,5mm Gran Paral Filtros Unif.	D50	d50	<	5	10	9,50E-03	0,10	3,01	316,84	31,68
Karpoff 2	1953	D100F<7,5mm Gran Paral Well Graded	D50	d50	<	12	58	9,50E-03	0,55	3,01	316,84	5,46
Leatherwood y Peterson 2	1954	Fil Unif y Grad. Gravas y arenas	D50	d50	<		5	9,50E-03	0,05	3,01	316,84	59,78
Mayer	1954	Suelo Unif Esferas	D50	d50	=	6	10	9,50E-03	0,10	3,01	316,84	31,68
Zweck y Davidenkoff 1	1956	Arenas Unif	D50	d50	<	5	10	9,50E-03	0,10	3,01	316,84	31,68
Zweck y Davidenkoff 2	1956	Arenas Finas	D50	d50	<	5	16	9,50E-03	0,15	3,01	316,84	19,80
Zweck y Davidenkoff 3	1956	Filtro WG	D50	d50	<	5	25	9,50E-03	0,24	3,01	316,84	12,67
Istomina 1	1957	Arenas y Gravas CuF=1	D50	d50	<		13	9,50E-03	0,12	3,01	316,84	24,37
Istomina 2	1957	Arenas y Gravas CuF=10	D50	d50	<		46	9,50E-03	0,44	3,01	316,84	6,89
USBOR 1	1960	Graduado, arenas finas y limos CuB>4	D50	d50	<	12	58	9,50E-03	0,55	3,01	316,84	5,46
USBOR 3	1960	Suelo Grano Grueso.Base Unif. Arena Fina. CuB=3-4. Gran P	D50	d50	<		5	9,50E-03	0,05	3,01	316,84	63,37
USBOR 4	1960	Suelo Grano Fino.Base Unif. Arena Fina. CuB=3-4. Gran Para	D50	d50	<		10	9,50E-03	0,10	3,01	316,84	31,68
USBOR 5	1960	Base Graduada. CuB>4	D50	d50	<	9	30	9,50E-03	0,29	3,01	316,84	10,56
Quasi	1961	Filtros para drenes..... S= Desv. Estand. del filtro	D50	d50	<		S	9,50E-03		3,01	316,84	
Des Bouvrie	1962	Filtros para drenes..... S= Desv. Estand. del filtro	D50	d50	<		S	9,50E-03		3,01	316,84	
Hydroprojekt (Lubockov)	1963	CuB<10..... A=9+0,9*(CuB-1)	D50	d50	<		A	9,50E-03		3,01	316,84	
Geisler	1966	Arena Unif. Y Grad...Re=Reynolds, v=pore velocity, V=viscos	D50	d50	<		¿?	9,50E-03		3,01	316,84	
Davidenkoff	1967	BasAreUnif. Fil Unif...K=4 si d50B=1,5mm;K=19 si d50B=0,1m	D50	d50	=		K	9,50E-03		3,01	316,84	
Moskva Channel Criteria	1967	Cu=CuF=CuB<=5	D50	d50	<		5*Cu	9,50E-03		3,01	316,84	
Ziems	1968	CuB<20, CuF<18	D50	d50	=		f(Cu)	9,50E-03		3,01	316,84	

Tabla 41.- Base BP-C2: comparación de los resultados de los ensayos NEF

Aquellos casos en que el coeficiente sea inferior a la unidad permiten detectar los criterios que, de confirmarse los resultados de la presente investigación, pueden suponer un riesgo si se aplican sin una comprobación mediante la investigación directa.

En el caso concreto de la base BP-C2 se puede ver que únicamente el criterio de Newton y Hurley (1940) da lugar a un coeficiente de seguridad inferior a la unidad, en este caso 0.82, si bien hay que señalar que este criterio está ideado para bases de arena bien graduada, que no es este caso.

Es de destacar también que la mayoría de los criterios que emplean el ratio D_{50F}/d_{50B} , dan lugar a un enorme sobredimensionamiento, con coeficientes de seguridad superiores a 10 en casi todos los casos. Puesto que por ahora sólo se tiene el resultado de la base BP-C2, es prematuro realizar un juicio sobre este punto, pero resulta interesante comprobar este resultado con más ensayos porque de confirmarse supondría la invalidación de un gran número de criterios.

6.6.1.2 Influencia de la compactación del filtro

Para poder determinar la influencia de la compactación del filtro y por lo tanto de su permeabilidad, se realizaron 9 ensayos en los que la muestra de filtro se compactaba sólo durante 15 segundos de vibración por tongada. Al ser menor la densidad conseguida esto da lugar a una mayor permeabilidad por lo que es de esperar una disminución del D_{15F} límite. En este caso se trató de comprobar además si al modificar la pendiente de la curva granulométrica del filtro, manteniendo el D_{15} , el resultado era diferente. Para ello se ensayaron filtros con $D_{100}=10\text{mm}$ y con $D_{100}=20\text{mm}$.

En cuanto a los ensayos con filtros con $D_{100}=20\text{mm}$, se comenzó con el FP-20/0.9, del cual era lógico esperar un mal comportamiento. Efectivamente, al final del ensayo el orificio de salida medía 5.50mm lo cual denotaba una enorme erosión. Se continuaron haciendo ensayos con FP-20/0.7 y FP-20/0.6 que también fracasaron; y luego se ensayó el FP-20/0.5 obteniéndose un "EXITO" por lo que queda definido el "Filtro Límite" por el FP-20/0.5. Como ya se ha comentado anteriormente, se ensayaron también filtros con $D_{100}=10\text{mm}$, el FP-10/0.5 fracasó, el FP-10/0.3 fue "EXITO" al igual que el FP-10/0.4, por lo que este último corresponde al "Filtro Límite".

En los siguientes gráficos se puede ver la evolución de la concentración del agua de salida del ensayo y el caudal, para los ensayos con los filtros 20/0.9, 20/0.6 y 20/0.5:

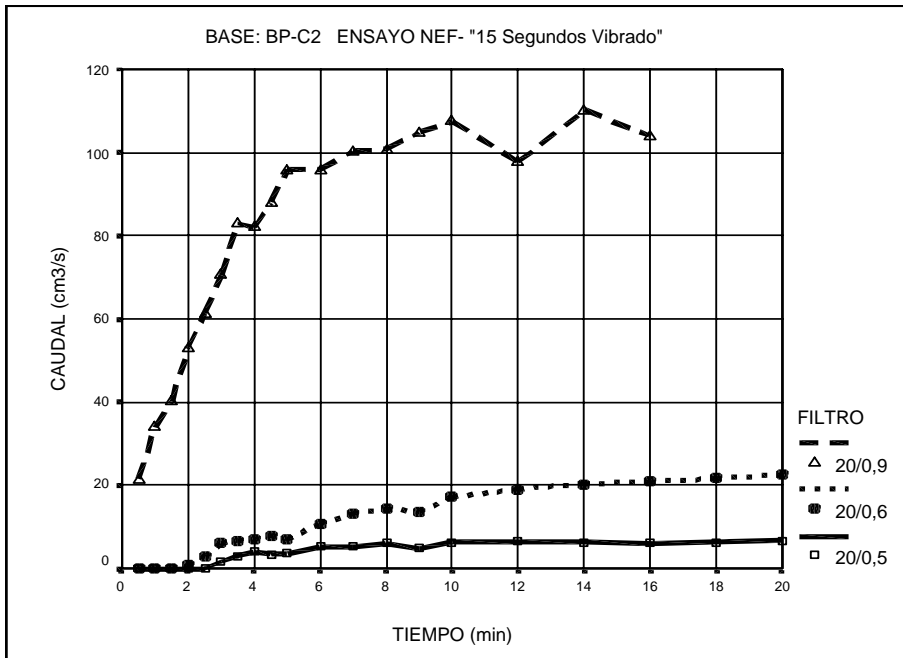


Gráfico 23.- Base BP-C2, NEF- "15 Seg.Vibr.": Evolución del caudal de salida

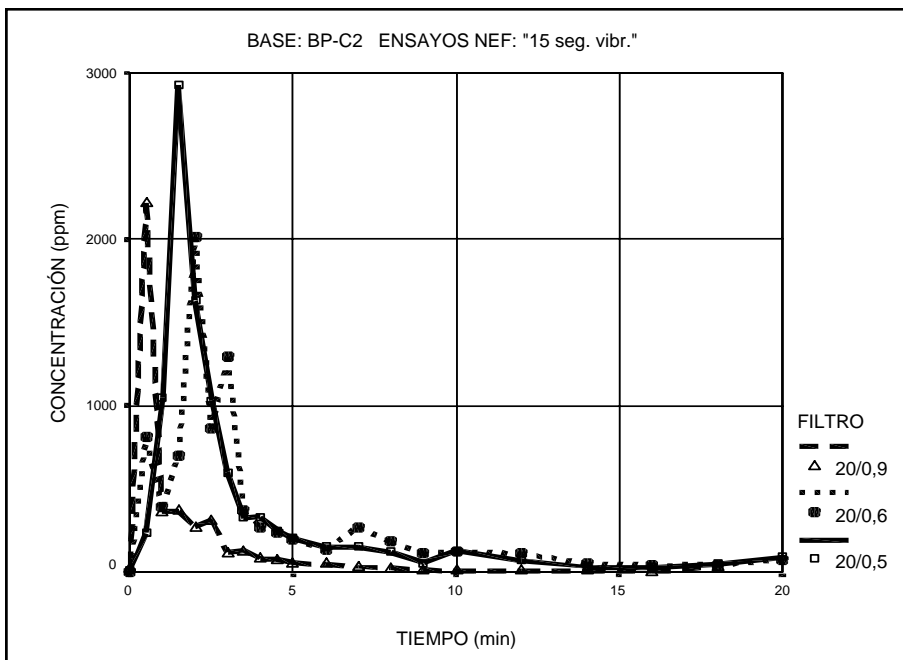


Gráfico 24.- Base BP-C2, NEF- "15 Seg.Vibr.": Evolución de la concentración de salida

En estos gráficos se observa perfectamente como para el filtro 20/0.5 se consigue rápidamente la estabilización del caudal y la reducción de la turbidez del agua de salida, mientras que en los otros casos, aunque finalmente se llega también a la estabilización, la erosión es mucho mayor.

Luego efectivamente, el criterio de “Éxito/Fracaso” basado en la simple medición del orificio de salida concuerda con el basado en la observación de la evolución del ensayo.

Otra observación interesante es que el resultado es diferente en función del D_{100} del filtro, disminuyendo el D_{15FL} al disminuir el D_{100} . Esto resulta interesante pero aun es pronto para poder sacar conclusiones.

También hay que resaltar que en cualquier caso el D_{15FL} es mucho menor al disminuir la compactación del filtro, lo cual era de esperar, pero sin embargo la mayoría de los criterios actuales de diseño de filtros no tienen en cuenta esta influencia. Dado el enorme interés de este resultado, en la *Investigación de Fondo* se debe comprobar con más ensayos y tratar de interpretarlos adecuadamente. Lo que sí queda claro por ahora es que se vislumbra la posibilidad de llegar a conclusiones novedosas e interesantes.

6.6.2 Muestra BP-C3

6.6.2.1 Resultados del ensayo tipo “Estándar”

La muestra denominada BP-C3 es la más abundante de todas y es por ello que con esta muestra se ha realizado el mayor número de ensayos. En concreto, en lo que se refiere a los ensayos "Estándar", se realizaron en principio 7 ensayos. En primer lugar se estimó, siguiendo el criterio de diseño de Sherard y Dunningan (1985), el D_{15FL} esperable, conocido el $d_{85B}=0.0464$, teniendo:

$$D_{15F} < 9 * d_{85B} = 9 * 0.0464 = 0.42 \text{mm.}$$

Al igual que se realizara con la muestra BP-C2, se comenzó ensayando un filtro con un D_{15F} superior al esperado para observar el comportamiento de un ensayo tipo "Fracaso", para ello se ensayó el filtro FP-10/1.0. Nada más comenzar el ensayo comenzó a salir un elevado caudal de agua turbia que se fue reduciendo progresivamente hasta estabilizarse en torno a los $23 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Al final del ensayo el agua salió clara, señal de que el filtro había sido capaz de detener la erosión. Sin embargo, al desmontar la probeta y medir los orificios de entrada y salida, con 2.86mm y 2.52mm, respectivamente; la erosión provocada había superado el umbral admisible según el criterio empleado por Sherard para clasificar un ensayo como "Exito".

A continuación se ensayó el filtro FP-10/0.8 el cual mostró un comportamiento similar al anterior pero con caudales mucho menores, finalizando con un caudal de $6.8 \text{ cm}^3/\text{seg}$. A pesar de ello, el orificio había aumentado hasta un diámetro final de 2.12mm por lo que este ensayo también se clasificó como "Fracaso". El filtro FP-10/0.7 volvió a fracasar mientras que el FP-10/0.6 dio lugar a un resultado clasificado como "Intermedio" ya que si bien el orificio final fue de 1.54mm, el volumen total de agua recogido, así como el caudal fueron muy reducidos.

Por seguridad se ensayó el filtro FP-10/0.5, el cual mostró una salida de agua turbia en los primeros instantes, pero ya en el tercer minuto el agua salía clara y con un caudal reducido y estabilizado. El orificio final había permanecido prácticamente intacto por lo que este ensayo corresponde claramente a un "Exito". Por lo tanto el "Filtro Límite" es en este caso el FP-10/0.5, si bien hay que tener presente que se encuentra muy cercano al FP-10/0.6.

También es interesante señalar que se volvió a realizar el ensayo del filtro FP-10/1.0 para verificar si el resultado era o no repetitivo. En el segundo ensayo se volvió a obtener un "Fracaso", aunque en este caso los caudales de salida fueron más reducidos y el diámetro final fue de 2.22 mm, que comparado con los 2.52 mm medidos la primera vez que se ensayó el FP-10/1.0, reflejan que lógicamente los

resultados no son absolutamente iguales, pero que el ensayo da lugar a resultados que podemos juzgar como aceptablemente repetitivos. Es muy interesante repetir periódicamente algunos ensayos para comprobar la fiabilidad de los mismos y poder detectar errores instrumentales.

Una vez obtenido el "Filtro Límite" para las condiciones "Estándar", se procede a comparar el resultado de la investigación con los criterios de diseño de distintos autores. Como se puede ver en la tabla siguiente, al igual que ocurría con la base BP-C2, los criterios que comparan el D_{50F} con el d_{50B} se apartan mucho de los resultados obtenidos en la presente investigación, con ratios reales de entre diez y cincuenta veces mayores que los predichos por estos criterios. Parece claro por lo tanto que efectivamente estos criterios no son recomendables, al menos para bases cohesivas como las que se están ensayando en esta investigación.

CAPÍTULO 6.- INVESTIGACIÓN DE CHOQUE

base: BP-C3			Teorico					Real	Espe.	Real		
CRITERIO	AÑO	CONDICIONES	DF	DB	SIG	RAT.I	RAT.S	d-BAS	D-Fil E.	D-Fil R	RATIO	COEF
Thanikachalam	1974	CuB<20, CuF<32	D10	d10	=		f(Cu)	7,00E-04		0,42		
Moskva Channel Criteria	1957	CuB<5, CuF<5	D10	d60	<		5	1,08E-02	0,05	0,42	38,89	7,78
Bertram 1	1940	Arenas Unif	D15	d15	<	8	15	9,00E-04	0,01	0,50	555,56	37,04
Newton y Hurley 1	1940	Filtr Grav Base WS	D15	d15	<		32	9,00E-04	0,03	0,50	555,56	17,36
Therzaghi y Peck 2	1948		D15	d15	>		4	9,00E-04	0,00	0,50	555,56	138,89
Karpoff 3	1953	D100F<7,5mm Gran Paral	D15	d15	<	12	40	9,00E-04	0,04	0,50	555,56	13,89
Mallet y Pacqant	1954	Esferas	D15	d15	=		9	9,00E-04	0,01	0,50	555,56	61,73
USBOR 2	1960	Graduado, arenas finas y limos CuB>4	D15	d15	<	12	40	9,00E-04	0,04	0,50	555,56	13,89
USBOR 6	1960	Base Graduada. CuB>4	D15	d15	<	6	18	9,00E-04	0,02	0,50	555,56	30,86
Kenney et al. 2	1985	Base Are Unif. Filtr. WG are y grav.	D15	d50	<		5	6,80E-03	0,03	0,50	73,53	14,71
Bertram 2	1940		D15	d85	<	6	11	4,64E-02	0,51	0,50	10,78	0,98
Newton y Hurley 2	1940	Filtr Grav Base WS	D15	d85	<		15	4,64E-02	0,70	0,50	10,78	0,72
USCE.	1941	Filt Grad	D15	d85	=		5	4,64E-02	0,23	0,50	10,78	2,16
Therzaghi y Peck 1	1948		D15	d85	<		4	4,64E-02	0,19	0,50	10,78	2,69
USCE. 1	1953	Suelo Unif. Curvas Paralelas	D15	d85	<		5	4,64E-02	0,23	0,50	10,78	2,16
Leatherwood y Peterson 1	1954	Fil Unif y Grad. Gravas y arenas	D15	d85	<		4	4,64E-02	0,19	0,50	10,78	2,63
Sherard et al.	1984	Unif Are y Grav	D15	d85	<		9	4,64E-02	0,42	0,50	10,78	1,20
Horjo y Veneciano 1	1989	A=5,5-0,5*(d95B/d75B) d95B/d75B <7	D15	d85	<		A	4,64E-02		0,50	10,78	
Pavcic	1964	Suel Suffusivos. nF=Porosid Filtro. A=3*((1-nF)/nF)*1/CuF*(1/	D17	d10	<		A	7,00E-04		0,537	767,14	
Kenney et al. 1	1985	Base Are Unif. Filtr. WG are y grav.	D5	d50	<		4	6,80E-03	0,03	0,35	51,47	12,87
Prinz	1923	Suelo Unif	D50	d50	<		4	6,80E-03	0,03	1,717	252,50	57,13
Taylor	1948	Suelo Unif	D50	d50	=		7	6,80E-03	0,04	1,717	252,50	38,85
Sichardt 1	1952	Suelo Unif (Est. denso)	D50	d50	<		6	6,80E-03	0,04	1,717	252,50	39,09
Sichardt 2	1952	Suelo Unif (Est. Suelto)	D50	d50	<		2	6,80E-03	0,02	1,717	252,50	104,34
USCE. 2	1953	Suelo Unif. Curvas Paralelas	D50	d50	<		25	6,80E-03	0,17	1,717	252,50	10,10
Karpoff 1	1953	D100F<7,5mm Gran Paral Filtros Unif.	D50	d50	<	5	10	6,80E-03	0,07	1,717	252,50	25,25
Karpoff 2	1953	D100F<7,5mm Gran Paral Well Graded	D50	d50	<	12	58	6,80E-03	0,39	1,717	252,50	4,35
Leatherwood y Peterson 2	1954	Fil Unif y Grad. Gravas y arenas	D50	d50	<		5	6,80E-03	0,04	1,717	252,50	47,64
Mayer	1954	Suelo Unif Esferas	D50	d50	=	6	10	6,80E-03	0,07	1,717	252,50	25,25
Zweck y Davidenkoff 1	1956	Arenas Unif	D50	d50	<	5	10	6,80E-03	0,07	1,717	252,50	25,25
Zweck y Davidenkoff 2	1956	Arenas Finas	D50	d50	<	5	16	6,80E-03	0,11	1,717	252,50	15,78
Zweck y Davidenkoff 3	1956	Filtro WG	D50	d50	<	5	25	6,80E-03	0,17	1,717	252,50	10,10
Istomina 1	1957	Arenas y Gravas CuF=1	D50	d50	<		13	6,80E-03	0,09	1,717	252,50	19,42
Istomina 2	1957	Arenas y Gravas CuF=10	D50	d50	<		46	6,80E-03	0,31	1,717	252,50	5,49
USBOR 1	1960	Graduado, arenas finas y limos CuB>4	D50	d50	<	12	58	6,80E-03	0,39	1,717	252,50	4,35
USBOR 3	1960	Suelo Grano Grueso.Base Unif. Arena Fina. CuB=3-4. Gran P	D50	d50	<		5	6,80E-03	0,03	1,717	252,50	50,50
USBOR 4	1960	Suelo Grano Fino.Base Unif. Arena Fina. CuB=3-4. Gran Para	D50	d50	<		10	6,80E-03	0,07	1,717	252,50	25,25
USBOR 5	1960	Base Graduada. CuB>4	D50	d50	<	9	30	6,80E-03	0,20	1,717	252,50	8,42
Quasi	1961	Filtros para drenes..... S= Desv. Estand. del filtro	D50	d50	<		S	6,80E-03		1,717	252,50	
Des Bouvrie	1962	Filtros para drenes..... S= Desv. Estand. del filtro	D50	d50	<		S	6,80E-03		1,717	252,50	
Hydroprojekt (Lubockov)	1963	CuB<10..... A=9+0,9*(CuB-1)	D50	d50	<		A	6,80E-03		1,717	252,50	
Geisler	1966	Arena Unif. Y Grad...Re=Reynolds, v=pore velocity, V=viscos	D50	d50	<		¿?	6,80E-03		1,717	252,50	
Davidenkoff	1967	BasAreUnif. Fil Unif..K=4 si d50B=1,5mm;K=19 si d50B=0,1m	D50	d50	=		K	6,80E-03		1,717	252,50	
Moskva Channel Criteria	1967	Cu=CuF=CuB<=5	D50	d50	<		5*Cu	6,80E-03		1,717	252,50	
Ziems	1968	CuB<20, CuF<18	D50	d50	=		f(Cu)	6,80E-03		1,717	252,50	

Tabla 42.- Base BP-C3: comparación de los resultados de los ensayos NEF

En cuanto a los criterios que emplean el D_{15F} y el d_{85B} el resultado real obtenido es bastante similar al esperable, si bien en el caso de los criterios USCE (1953), Therzaghi y Peck (1948), Leatherwood (1954) y Sherard et al (1985), el D_{15FL} obtenido en la investigación es mayor que el propuesto por estos criterios lo cual

permite comprobar que contienen un cierto coeficiente de seguridad y que mediante la experimentación directa se puede llegar a diseñar filtros menos restrictivos.

Sin embargo resulta muy interesante destacar que los criterios de Bertram (1940) y Newton y Hurley (1940) dan lugar a filtros más gruesos que el obtenido en la presente investigación por lo que, de confirmarse este resultado, su aplicación directa sin comprobación mediante ensayos de laboratorio puede resultar peligrosa, o al menos conducir a coeficientes de seguridad más reducidos, ya que de nuevo se debe señalar que el ensayo NEF de Sherard et al (1985) es considerado por algunos autores (Vaughan y Soares 1982) como excesivamente riguroso.

Precisamente Vaughan y Soares (1982) en vez de comparar la granulometría del filtro con la de la base, emplean la permeabilidad del primero y la comparan con el tamaño de flóculo del suelo que es capaz de retener. En el caso de la presente investigación se tiene que para el "Filtro Límite" FP-10/0.5, con una compactación de 60 segundos de vibrado por tongada, como corresponde al ensayo "Estándar", la permeabilidad del filtro es de 28.0 E-3 cm/s . La fórmula propuesta por Vaughan tiene la expresión :

$$K(\text{cm/s}) = 6.1 \text{ E-4} * \delta^{1.42} \quad (\delta - \text{tamaño de flóculo en micras}) \quad \text{Ecuación 116}$$

O bien, según su propia transformación se obtiene :

$$K (\text{cm/s}) = 6.7 \text{ E-4} * d_{85}^{1.52} \quad (d_{85} \text{ en micras}) \quad \text{Ecuación 117}$$

En este punto es necesario señalar que Vaughan y Soares (1982) advierten que su estudio se refiere al tamaño de flóculo y que la transformación para emplear el d_{85} es sólo válida en caso de cumplimiento de las mismas hipótesis que ellos emplearon.

Si se procede a la inversa, conocida la permeabilidad del "Filtro Límite" se puede calcular el tamaño de flóculo que puede atrapar resultando:

$$\delta = 14.80 \text{ micras, o bien, } d_{85} = 11.66 \text{ micras}$$

Sin embargo, la base BP-C3 tiene un d_{85} de 46.4 micras, bastante mayor que el esperado según el criterio de Vaughan. O bien, desde otro punto de vista, para el d_{85} de la base, la permeabilidad esperada del filtro que es capaz de protegerlo es de 2.29 E-3, es decir, casi diez veces superior a la obtenida en la presente investigación.

Una posible explicación de esta gran diferencia es que el propio Vaughan en sus clases impartidas en el Imperial College de Londres insiste en descalificar el ensayo NEF de Sherard por no respetar el efecto de escala y por emplear gradientes hidráulicos excesivos. Pero también es posible que sea necesario calcular el tamaño de flóculo real y no admitir la transformación realizada por Vaughan. Para ello es interesante que en la *Investigación de Fondo* se mida la granulometría del suelo base por sedimentación con dispersante y sin él, para tratar de obtener la curva granulométrica de los flóculos.

6.6.2.2 Influencia de la compactación del filtro

Una vez detectado con la muestra BP-C2 que una menor compactación del filtro da lugar a tener que reducir el D_{15F} del "Filtro Límite" para poder proteger al mismo suelo base, resulta fundamental comprobar de nuevo este efecto y tratar de cuantificarlo. Pero lógicamente es también de esperar que si se aumenta la compactación del filtro, reduciendo su permeabilidad, el "Filtro Límite" sea menos riguroso.

Para comprobar estos efectos se ha realizado una serie de ensayos NEF con la muestra BP-C3 compactando el filtro con 15 segundos de vibración por tongada; y otra serie en la que la compactación fue de 120 segundos.

En primer lugar se ensayó el FP-10/0.3 con 15 segundos de vibración, saliendo en todo momento un caudal muy reducido y con un diámetro final del orificio de 1mm, por lo que este ensayo corresponde a un "Exito". El FP-10/0.4 también dio lugar a un "Exito", mientras que el FP-10/0.5 produjo un orificio de 1.8 mm con un volumen total de agua recogida de 12.380 cm³, lo que corresponde a un "Fracaso". Por lo

tanto, para la base BP-C3, con una compactación del filtro con 15 segundos de vibrado por tongada, el "Filtro Límite" correspondiente es el FP-10/0.4, el cual tiene una permeabilidad de 28.6 E-3 cm/s .

En el gráfico siguiente se puede apreciar perfectamente el funcionamiento de estos tres ensayos.

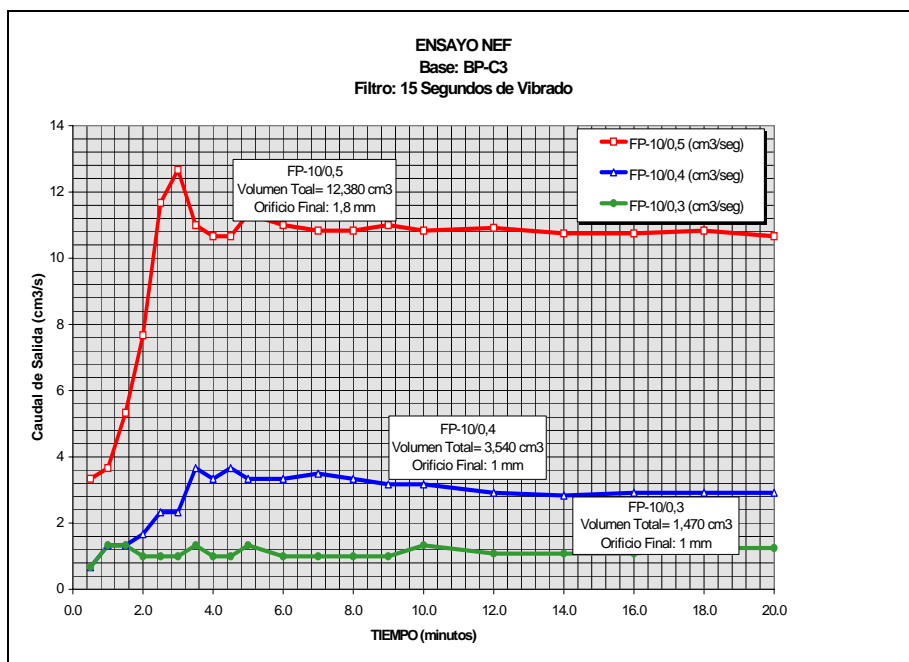


Gráfico 25.- Base BP-C3, Ensayos NEF "15seg.vibr.": Relación caudal-tiempo

De nuevo se comprueba que al disminuir la compactación es preciso también disminuir el D_{15FL} , pero es interesante señalar que en condiciones de ensayo "Estándar" se obtuvo un $D_{15FL} = 0.5 \text{ mm}$ con una permeabilidad de 28.0E-3 cm/s , por lo tanto si bien la variación en el D_{15F} es bastante significativa, las permeabilidades son muy parecidas. Esto conduce a pensar que efectivamente es posible que sea la permeabilidad, más que la granulometría, la que determina el comportamiento de un filtro, sin embargo también cabe la posibilidad de que ambas variables actúen conjuntamente.

A continuación se realizó una serie de ensayos en la cual la compactación del filtro asciende a 2 minutos de vibrado por tongada, con lo cual resulta razonable que al disminuir la compactación, disminuya también el D_{15FL} .

En estos ensayos se empleó también arena como “material lateral” en la última tongada de filtro, tal y como especifica Sherard y Dunningan (1985) para impedir que aparezcan vías preferenciales de filtración en las paredes de la probeta.

El primer ensayo de la serie fue el FP-10/0.8 que finalizó con una salida total de 3.480 cm^3 y con el orificio intacto, luego se ensayaron el FP-10/0.9, FP-10/1.0 y FP-10/1.2 que también dieron lugar a un "Éxito" mientras que el FP-10/1.3 y FP-10/1.4 fracasaron. Según estos resultados, para una compactación del filtro de 120 segundos de vibración por tongada, el "Filtro Límite" es el FP-10/1.2 que tiene una permeabilidad de 116.4 E-3 cm/s .

Este resultado parece anómalo si observamos la tendencia existente entre el D_{15FL} del ensayo "Estándar" y el de “15 Seg. Vibr.”, ya que ambos tienen permeabilidades similares y la variación en el D_{15FL} , aunque apreciable, no es excesiva como ocurre ahora con el D_{15FL} obtenido para 120 segundos de vibración.

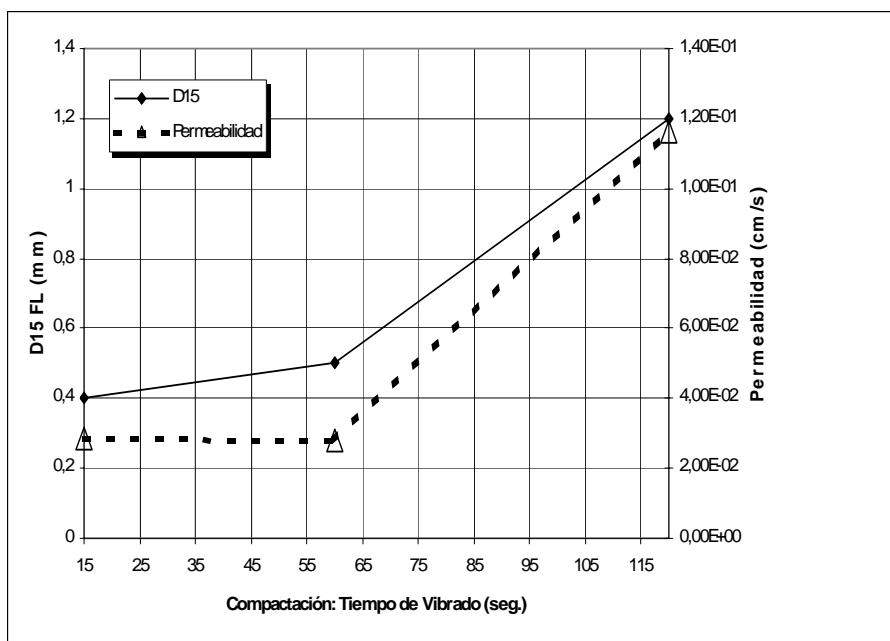


Gráfico 26.- Influencia de la compactación: D_{15FL} para cada tiempo de vibrado

En la gráfica se observa perfectamente que la permeabilidad correspondiente el "Filtro Límite" para "120 seg. vibr." es excesivamente elevada si la comparamos con los dos resultados anteriores. Por otra parte, aplicando la teoría de Vaughan, al calcular el tamaño de floculo se obtiene :

"15 seg. vibr." → $K = 28.6 \text{ E-3 cm/s}$ → $d_{85B} = 11.82 \text{ micras}$

"Estándar" → $K = 28.0 \text{ E-3 cm/s}$ → $d_{85B} = 11.66 \text{ micras}$

"120 seg. vibr." → $K = 116.4 \text{ E-3 cm/s}$ → $d_{85B} = 29.76 \text{ micras}$

Se puede ver perfectamente que el último resultado no concuerda con los otros dos.

Para tratar de buscar una explicación hay que señalar que los valores de la permeabilidad se determinaron en laboratorio ensayando el filtro con las mismas condiciones de compactación y que la célula del permeámetro tiene las mismas dimensiones que la empleada en el ensayo NEF. La única diferencia es que en los ensayos de permeabilidad no se coloca el cordón de arena como "material lateral" en

la última tongada de filtro, ya que esto sólo se emplea para evitar que las partículas de suelo base puedan migrar entre los huecos que dejan las partículas de filtro apoyadas en las paredes de la probeta. Por ello es razonable pensar que al compactar por vibración en el ensayo NEF, las partículas finas del material lateral pueden migrar y colocarse sobre la superficie del filtro, intercalándose entre los poros del mismo y reduciendo por tanto el tamaño de constricción y la permeabilidad en la superficie.

De ser así, aunque la granulometría y permeabilidad medias del filtro prácticamente no varíen, ese fino tapiz en la superficie puede hacer que queden retenidas partículas de suelo base mucho menores que las que le corresponderían en condiciones ideales y por lo tanto el resultado es que puede aparecer que el ensayo sea calificado como "Éxito" aunque en verdad el filtro no sea adecuado.

Para evitar el fenómeno de migración de partículas de arena fina del material lateral, se puede sustituir éste por un fino cordón de arcilla de modelar o incluso por plastilina, tal y como se hizo, por ejemplo, en la investigación llevada a cabo en la presa de Canales. Sin embargo, es también posible que la discontinuidad entre la plastilina y la tongada de filtro produzca una heterogeneidad al compactar por vibración mediante una sobrecarga.

También se presenta el dilema de que si la mayoría de los autores han empleado arena como material lateral y este puede dar lugar a algún tipo de enmascaramiento del resultado, si en la presente investigación se sustituye la arena por plastilina, los resultados pueden dejar de ser totalmente comparables.

Sobre este punto parece razonable adoptar una decisión intermedia, es decir, realizar tanto ensayos con arena como con plastilina como material lateral, para así poder determinar y cuantificar su influencia.

6.6.2.3 *Influencia de los aditivos al suelo base*

Como ya se ha comentado en la revisión de los conocimientos, la mayoría de los investigadores consideran el fenómeno de erosión – interceptación en la interfase base – filtro un problema puramente geométrico, incluso Sherard y Dunningan (1985) defienden que el comportamiento de una arcilla depende únicamente de la granulometría y no de la naturaleza de la misma.

Para tratar de comprobar si esta afirmación es o no cierta, aparece el problema de que es prácticamente imposible conseguir dos bases de granulometrías idénticas pero diferente naturaleza.

Pero si a una muestra de suelo base se le añade alguna sustancia química que pueda afectar a su comportamiento sin modificar sensiblemente la granulometría, un resultado diferente en los ensayos NEF entre la muestra original y la que lleva aditivos puede permitir cuestionar la teoría anterior.

El investigador Kabasy (1993 y 1999) comprobó que la dispersabilidad de algunos suelos cohesivos se podía reducir mediante la adición de sales, entre ellas el sulfato de aluminio, el cual, con tan sólo un 1% transformaba en no dispersiva una arcilla que anteriormente sí lo era.

Para tratar de determinar el efecto del sulfato de aluminio en los resultados de los ensayos NEF, se han realizado dos nuevas series de ensayos, una añadiendo a la base BP-C3 un 1% en peso de sulfato de aluminio potásico y otra serie con un 3%.

La primera serie comenzó ensayándose el filtro FP-10/0.5, empleando plastilina como material lateral. Como en el primer intento no salió agua, hubo que desmontar la probeta y reperforar la pastilla de suelo base de forma que al fin el ensayo funcionó y además dio lugar a un "Exito". A continuación se ensayó el filtro FP-10/0.7, que dio lugar a una volumen total de 19.370 cm³ de agua recogidos y un diámetro final del orificio de 2 mm, por lo que el ensayo se calificó como "Fracaso". Por su parte, el FP-10/0.6 dio un resultado denominado "Intermedio" ya que el

diámetro final fue de 1.3 mm, lo que representa una erosión sensible pero poco importante. Los filtros FP-10/0.5 y FP-10/0.4 dieron lugar a sendos ensayos calificados como "Exito".

Por lo tanto, al contrario de lo que ocurrió en los ensayos "Estándar", el "Filtro Límite" corresponde al FP-10/0.6 pero muy cercano al FP-10/0.5. Esto además quiere decir que la influencia del 1% de sulfato de aluminio no es muy grande pero sí apreciable.

En la segunda serie de ensayos NEF con sulfato de aluminio como aditivo del suelo base, se aumentó la cantidad hasta un 3%. El primer ensayo empleó el filtro FP-10/0.5 que como era de esperar dio lugar a un "Exito", luego se ensayó el FP-10/0.6, que esta vez funcionó perfectamente y al ensayar el FP-10/0.9 y el FP-10/0.8 se obtuvieron dos "Fracasos". Por eso se ensayó a continuación el FP-10/0.7, que aunque se recogió un volumen de 4.170 cm³, el orificio quedó intacto y por tanto el ensayo fue calificado como "Exito".

Así pues, el "Filtro Límite" con un 3% de sulfato de aluminio como aditivo del suelo base es el FP-10/0.7, al que corresponde una permeabilidad de 54.8 E-3 cm/s.

Siguiendo con el razonamiento empleado hasta ahora, si aplicamos la teoría de Vaughan, el tamaño de partícula que es capaz de retener este filtro es $d_{85B} = 18.13$ micras, que frente a las 11.66 micras que correspondieron al ensayo "Estándar", supone que el efecto del sulfato de aluminio es de un 56.3 % de aumento del tamaño de flóculo, lo cual es bastante significativo.

También se intentó comprobar el efecto producido al añadir bentonita a la muestra de suelo base, ya que al ser éste un material altamente plástico, puede modificar su comportamiento. Se ensayó el filtro FP-10/1.0 por dos veces ya que la primera resultó un ensayo "Nulo". El segundo intento dio lugar a un "Fracaso", pero se abandonó esta serie de ensayos ya que no existían garantías suficientes de conseguir

una perfecta homogeneización de la mezcla y por lo tanto los resultados podían ser poco fiables.

6.6.2.4 *Influencia de la humedad del suelo base*

Como ya se ha comentado anteriormente, en los ensayos "Estándar" la muestra de suelo base se compacta con una humedad un 1% por encima de la humedad óptima obtenida en el ensayo Próctor Normal. De esta forma está claro que se consigue una densidad muy próxima a la densidad máxima por lo que en principio sería de esperar que al estar el suelo base en su estado más denso, tenga una mayor resistencia a la erosión.

Para poder comprobarlo se han realizado distintas series de ensayos en las que se ha modificado la humedad del suelo base, tanto por el lado seco como por el lado húmedo, llegando incluso a la humedad correspondiente al límite plástico.

En el caso de la muestra BP-C3, la humedad óptima es 12.83 %, mientras que el límite plástico asciende a 19.32 %, por ello se han realizado ensayos NEF con humedades que van desde el 7 % al 26 %.

Aparte de los ensayos "Estándar", se comenzó por la serie denominada "Lado Húmedo" en la cual la muestra de suelo base se compactó con una humedad del 25%. El filtro FP-10/1.0 dio lugar a un resultado calificado como "Intermedio" ya que al final del ensayo no se observaba el orificio de salida pero el de entrada era de 1.54 mm, por ello se volvió a repetir dando lugar a una enorme erosión con un orificio final de 6.48 mm. Los filtros FP-10/0.7 y FP-10/0.5 también dieron lugar a ensayos calificados como "Fracaso" por lo que se terminó la serie ensayando el filtro FP-10/0.3 que dio un resultado "Intermedio" y el FP-10/0.2 el cual dio lugar a un orificio de 1.26 mm con un volumen total recogido de sólo 3.010 cm³. De la observación de la tendencia se ha concluido que el filtro 10/0.3 es calificado como "Filtro Límite".

Vista la enorme influencia que mostraba el emplear humedades por encima de la óptima, se procedió a realizar una serie de ensayos por el lado seco, empleando una humedad del 7.5 %.

Los tres primeros ensayos dieron una salida muy reducida de agua y además siempre clara, por lo que se consideraron como "Nulos", posteriormente se ensayó el filtro FP-10/1.0 que dio lugar a un "Fracaso", con 20.220 cm³ de agua recogida; y después se ensayó el FP-10/0.8 que mostró un orificio final intacto. Lógicamente a continuación se ensayó el FP-10/0.9 que también fue "Exito" y por lo tanto quedaba definido como el "Filtro Límite".

Al comprobarse que se confirmaba la influencia de la humedad, se decidió finalizar esta serie de ensayos humedeciendo la muestra de suelo base con un contenido de agua igual al correspondiente al límite plástico, en este caso se adoptó un 20 %.

El filtro FP-10/0.5 dio un resultado "Intermedio", el FP-10/0.4 fue "Exito" y el FP-10/0.6 fracasó, por lo que se calificó como "Filtro Límite" el FP-10/0.5.

En la gráfica se puede observar perfectamente cómo el "Filtro Límite" va disminuyendo al aumentar el contenido de humedad de la base de una forma muy significativa. De verificarse este resultado las consecuencias pueden ser muy interesantes ya que supondría, por ejemplo, que si en el núcleo de una presa aparece una zona de mayor humedad, por una lluvia durante la construcción o por simple transmisión heterogénea de la humedad, el filtro que ha sido proyectado para la humedad teórica de compactación puede resultar ineficaz.

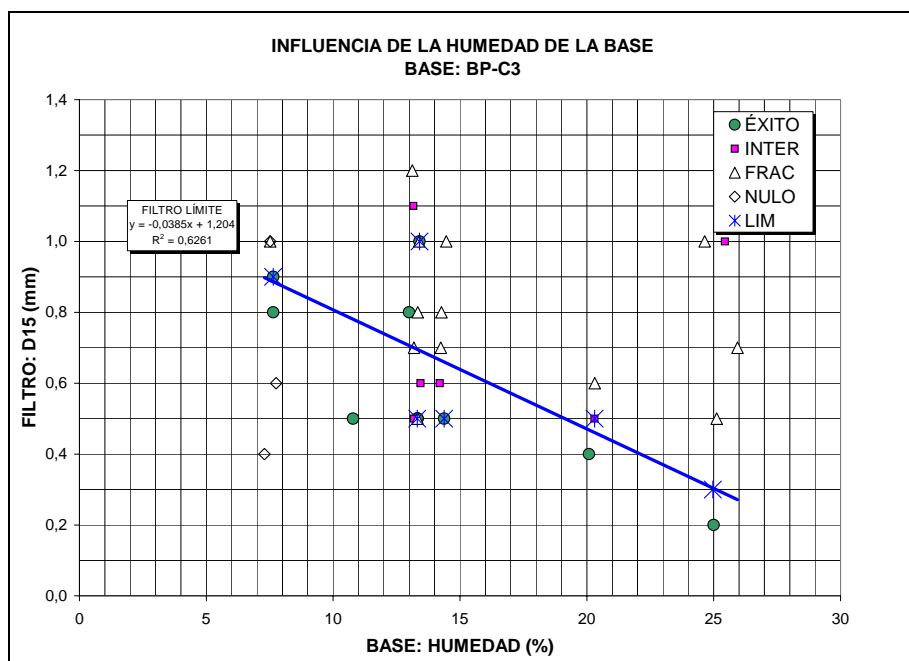


Gráfico 27.- Base BP-C3: Influencia de la humedad del suelo base

Si se realiza de nuevo la analogía con el razonamiento de Vaughan se puede calcular la variación en el tamaño de flóculo arrastrado en función de la humedad del suelo base y por lo tanto determinar el d_{85B} teórico. La comparación de este valor con el real de la muestra BP-C3 ($d_{85B}=0.464$ micras) demuestra de nuevo que el cálculo de Vaughan no se puede realizar directamente, sin embargo lo que sí se puede es utilizarlo como medida de comparación relativa. Si se observa la tabla se aprecia que la variación de la humedad del 7.5 % al 25 % supone una variación de hasta 8 veces en el tamaño de flóculo, lo cual es muy significativo.

ENSAYO	D _{15FL} (mm)	K _{FL} (cm/s)	δ (micras) (Vaughan 1982)	D ₈₅ (micras) (Vaughan 1982)
HUM. 7.5 %	0.9	90.6 E-3	33.86	25.24
HUM. 13.5 %	0.5	28.0 E-3	14.81	11.66
HUM. 20 %	0.5	28.0 E-3	14.81	11.66
HUM. 25 %	0.3	10.1 E-3	7.23	5.96

Tabla 43.- Base BP-C3: Influencia de la humedad del suelo base: comparación con los resultados de Vaughan y Soares (1982)

Esto puede ser una conclusión muy importante, pero se debe comprobar con la realización de más ensayos con otras bases. También hay que señalar que con la humedad del 7 %, cercana a la humedad natural, la base presenta un aspecto terroso, con agregados de partículas y su compactación puede no haber resultado uniforme.

Por otro lado, con la humedad del 25 %, superior al límite plástico, la maza tipo Army empleada en la compactación se hunde en la muestra de suelo base siendo de nuevo difícil asegurar una compactación homogénea. Por estas razones es recomendable tratar estos resultados con cautela ya que no se disponen de referencias de otros autores que hayan comprobado este efecto.

6.6.2.5 Influencia del diámetro del orificio del suelo base

Al aumentar el diámetro del orificio del suelo base se puede reducir la velocidad de filtración y la probabilidad de que un grumo o agregado de partículas de suelo base pueda quedar atrapado dentro del propio orificio sin llegar a actuar el filtro y por lo tanto, falseando los resultados del ensayo.

Para comprobar este efecto se ensayó el filtro FP-10/0.5 con la base BP-C3, obteniéndose una salida de agua muy reducida durante todo el ensayo, con un volumen total de tan sólo 380 cm³. Por lo tanto parece que este ensayo constituye una anomalía y que debe ser comprobado en la *Investigación de Fondo*, no pudiendo, por ahora, sacar conclusiones.

6.6.2.6 Influencia de la presión del ensayo

Para poder determinar la influencia de las condiciones de flujo se ha realizado una serie de ensayos en los que la presión de agua se ha reducido a la mitad, 2 kg/cm², con lo que se espera que al disminuir la velocidad de flujo, por un lado se reduzca la erosión de la muestra de suelo base y por otro, se aumente la probabilidad de retención de las partículas en el interior del filtro.

La serie de ensayos comenzó ensayando el FP-10/0.7, que dio lugar a una reducida salida de agua y hubo que reperfilar por lo que el ensayo en principio se calificó como "Éxito" pero a la espera de confirmarlo. Por ello a continuación se ensayó el FP-10/0.9 que terminó con un orificio de salida de 2 mm y un volumen total de 12.120 cm³ por lo que se consideró "Fracaso". El FP-10/0.8 tuvo que ser de nuevo reperfilarado y por ello se volvió a repetir, dando la segunda vez un volumen de 14.460 cm³ y un diámetro de 2 mm. A la vista de este resultado se decidió repetir el FP-10/0.7 que esta vez tuvo una salida de 2.220 cm³ y un orificio final de 1 mm por lo que este ensayo fue calificado como "Éxito" y por lo tanto el FP-10/0.7 como "Filtro Límite".

Para comparar este resultado con el obtenido en el ensayo "Estándar" en el que el "Filtro Límite" es el FP-10/0.5 resulta interesante no sólo fijarse en la diferencia apreciable en el D_{15FL} , sino comparar la evolución de los caudales de salida de dos ensayos con la misma muestra de suelo base y la misma de filtro, pero distinta presión de ensayo.

En el gráfico siguiente se puede comparar la evolución de los ensayos NEF-57 y NEF-244, que emplearon la muestra de suelo base BP-C3 y el filtro FP-10/0.8, pero el primer ensayo utilizó una presión de 4 kg/cm² y el segundo 2 kg/cm². Análogamente, los ensayos NEF-28 y NEF-245 utilizaron el filtro FP-10/0.7 con presiones de 4 y 2 kg/cm² respectivamente.

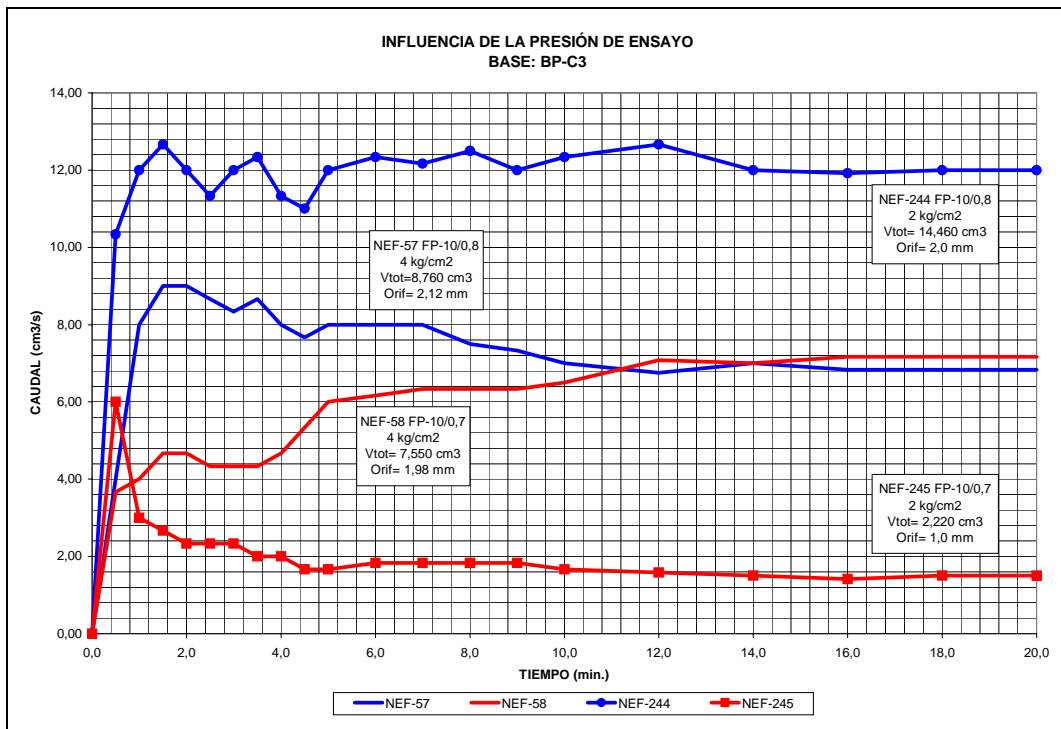


Gráfico 28.- Base BP-C3: Influencia de la presión de ensayo, (gráfica caudal-tiempo)

En los cuatro ensayos se observa un primer momento de caudales crecientes, siempre acompañado de erosión de la pastilla de suelo base, al que finalmente sigue una reducción de caudal y una estabilización final, salvo en el caso del ensayo NEF-58 en el que el caudal continua subiendo. Este último comportamiento resulta extraño y puede deberse a alguna obstrucción accidental al comienzo del ensayo.

Pero también llama la atención por su aparente incongruencia el hecho de que si bien entre el ensayo NEF-58 y NEF-245 se observa que el caudal es mayor en el ensayo de mayor presión, lo cual parece lo razonable, sin embargo, en los ensayos NEF-57 y

NEF-244 resulta al contrario, siendo el ensayo que empleó 2 kg/cm^2 de presión el que da lugar a un mayor caudal.

Estos resultados resultan hasta cierto punto desconcertantes, sin embargo hay que tener siempre presente que por las características del proceso de erosión interna e interceptación en el filtro, al ser un fenómeno probabilístico, siempre se pueden presentar resultados extraños. Lo que queda claro es que un filtro que fracasa una sola vez debe considerarse como no apto para proteger a un determinado suelo base, en cambio, un filtro inadecuado puede presentar en alguna ocasión un comportamiento satisfactorio que se traduzca en un ensayo tipo "Éxito".

Esto se puede deber a que al fin y al cabo, el proceso de interceptación de partículas en el filtro tiene una gran componente probabilística de forma que si, por ejemplo, aunque el filtro sea excesivamente grueso, se desprende una partícula o agregado del suelo base de gran tamaño, puede obturar el orificio y favorecer un comportamiento calificable como "éxito" cuando en realidad el filtro no es efectivo.

Por lo tanto, más que fijarse en la evolución particular de un determinado ensayo, para poder comparar la influencia de la presión es mejor fijarse en el resultado final de la serie, es decir, comparar el "Filtro Límite" obtenido en cada caso.

Como ya se ha comentado anteriormente, para la muestra de suelo base BP-C3 con una presión de ensayo de 4 kg/cm^2 el "Filtro Límite" es el FP-10/0.5 que tiene una permeabilidad de 28.0 E-3 cm/s ; mientras que con 2 kg/cm^2 el "Filtro Límite" es el FP-10/0.7 con 54.8 E-3 cm/s de permeabilidad. Aparte de apreciar la diferencia existente tanto en cuanto a granulometría como a la permeabilidad, resulta interesante establecer alguna relación entre ambos.

Si se tiene en cuenta que la velocidad de flujo en cada caso depende del gradiente hidráulico y de la permeabilidad del medio, se puede, **en primera aproximación**, suponer que la velocidad de flujo dependerá del producto de estos dos factores, y por lo tanto se obtiene:

$$(K1*i1) / (K2*i2) = (28E-3 * 4) / (54.8E-3 E-2 * 2) = 1.02$$

Resulta interesante observar que el resultado obtenido es muy cercano a la unidad, lo que efectivamente supondría que son en realidad las condiciones del flujo, y no sólo la granulometría y la permeabilidad, las que gobiernan el fenómeno de la erosión interna.

Esta conclusión parece razonable, pero aun es pronto para poder profundizar en ella por lo que es necesario que en la *Investigación de Fondo* se realicen más ensayos modificando la presión de ensayo y empleando muestras de suelo base diferentes.

Sin embargo, posiblemente esta influencia es mayor en el ensayo que en la realidad, ya que en el ensayo NEF se ve muy favorecido el posible bloqueo del orificio por desprendimiento de grumos, cuando posiblemente en ambas condiciones de presión la fuerza erosiva del agua sea similar.

No es ahora el momento de profundizar en esta cuestión ya que se hará en la fase de la *Investigación de Fondo*.

6.6.2.7 Influencia de la duración del ensayo

Aunque todos los ensayos se han realizado con una duración de 20 minutos y en casi todos ellos, incluso en los casos de "Fracaso", se ha llegado a estabilizar el caudal antes de ese tiempo, resulta necesario comprobar qué ocurre si se mantiene el ensayo durante un intervalo mayor.

Por esa razón se ha repetido el ensayo del filtro FP-10/0.5 que fue calificado como "Filtro Límite" para la base BP-C3, pero esta vez se mantuvo en funcionamiento durante varias horas.

A pesar de prolongar la duración del ensayo, el resultado siguió siendo de "Exito" por lo que en principio queda comprobado que, dadas las exigencias del ensayo NEF, si un filtro funciona, lo hace en los primeros instantes. Sin embargo es posible que un

filtro que al principio es incapaz de contener la erosión, poco a poco va reteniendo partículas de suelo base y puede terminar taponando o estabilizando el caudal, pero de nuevo hay que señalar que como el ensayo NEF exige la ausencia de erosión, a efectos de determinar el "Filtro Límite", es irrelevante una mayor duración del ensayo.

Aunque parece bastante lógica esta conclusión, se debe comprobar de nuevo con la realización de algún otro ensayo de larga duración.

6.6.2.8 Comprobación del Criterio "Éxito/Fracaso"

Habiéndose realizado ya una importante serie de ensayos con distintas variantes, es necesario volver a comprobar, como ya se hizo en la fase de *Preparación y Puesta a Punto del Ensayo*, si la medición del orificio de salida es suficiente para calificar un ensayo como Éxito o Fracaso, o si por el contrario, es necesario estudiar otros valores como el volumen total recogido o el caudal máximo.

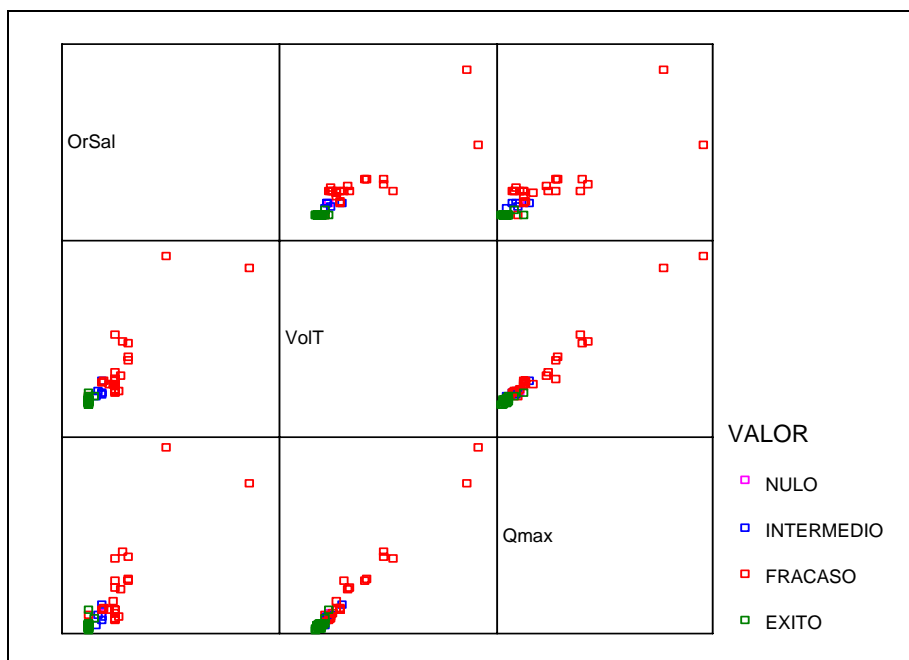


Gráfico 29.- Base BP-C3: Criterio de Éxito/Fracaso

En el anterior gráfico matricial de dispersión se ha representado las relaciones entre el orificio de salida (OrSal), el volumen total recogido (Vtot) y el caudal máximo de salida (Qmax); distinguiendo la calificación del ensayo como “Éxito”, “Intermedio”, “Fracaso” o “Nulo”.

Como se puede ver, destaca en primer lugar que efectivamente las tres variables permiten calificar los ensayos, pero la más precisa es el orificio de salida.

También hay que resaltar la relación lineal existente entre el volumen total y el caudal máximo, aunque para valores muy altos aumenta la dispersión, lo cual es totalmente lógico ya que si la erosión es muy grande, las medidas se vuelven más imprecisas.

Parece que queda confirmado por tanto la idoneidad del criterio elegido para calificar un ensayo como “Éxito” o “Fracaso”, con la simple medición del orificio de salida, siendo necesario en los caso de dudosos o de frontera utilizar las demás variables.

6.6.2.9 Análisis granulométrico de las partículas erosionadas

Además de la turbidez del agua de salida, que se debe a la cantidad de partículas del suelo base erosionadas que han atravesado todo el filtro, sería muy interesante determinar el tamaño y distribución de estas partículas.

No es posible emplear un método convencional como la granulometría por sedimentación ya que la cantidad de suelo erosionado recogida es muy pequeña y no permite realizar este ensayo, por lo que se ha recurrido a una técnica bastante compleja que consiste en determinar el tamaño de las partículas sólidas que se mantienen en suspensión en una cierta cantidad de agua mediante rayo láser.

El instrumental empleado en la presente Investigación corresponde al sistema GALAI CIS-1, perteneciente al Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada.

En las FOTOS 29 y 30 se pueden ver las instalaciones y en el ANEJO 12.3 se describe brevemente el método.

La utilización de esta técnica en la presente Investigación se decidió cuando estaba ya muy avanzada, sin embargo, a efectos metodológicos, se considera dentro de la fase de *Investigación de Choque* la toma de medidas correspondientes a la base BP-C3, puesto que precede a las demás muestras.

Con la base BP-C3 se ha determinado la granulometría de los sólidos contenidos en las mismas muestras de agua que se tomaron en el ensayo NEF-364, habiéndose reducido mucho el número de medidas por la gran carestía de este método. Pero además se ha determinado la granulometría de la fracción menor a 0.08 mm del suelo base original, con y sin dispersante, e incluso con el empleo de sulfato de aluminio como aditivo.

En la tabla siguiente aparecen los principales diámetros característicos, en milímetros, además de la granulometría por sedimentación, con y sin dispersante, de la muestra original.

%pasa	BP-C3 CD	BP-C3 SD	RLPC3HX1	RLPC3HX2	RLPC3SA1	RLPC3SA2	RL364B48	RL364B49	RL364B50	RL364B56
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
100	5	5	9,00E-03	8,50E-03	1,05E-02	7,50E-03	9,00E-03	1,15E-02	1,25E-02	1,10E-02
95			6,60E-03	4,98E-03	6,74E-03		6,43E-03	7,30E-03	7,34E-03	7,99E-03
90	7,47E-02	8,54E-02	5,64E-03	4,34E-03	5,21E-03	5,20E-03	5,60E-03	5,92E-03	5,47E-03	6,32E-03
85	4,64E-02	8,31E-02	4,98E-03		4,57E-03	4,75E-03	5,14E-03	5,49E-03		5,66E-03
80				3,67E-03	4,28E-03	4,36E-03	4,76E-03	4,86E-03	4,71E-03	5,10E-03
75			3,90E-03	3,16E-03		3,92E-03	4,41E-03	4,35E-03	4,41E-03	4,78E-03
70	2,03E-02	4,55E-02	3,40E-03	2,76E-03	3,62E-03	3,40E-03	4,12E-03		3,85E-03	
65			2,76E-03	2,36E-03	3,21E-03		3,82E-03	3,77E-03	3,85E-03	4,23E-03
60	1,08E-02	3,22E-02	2,37E-03	1,84E-03	2,73E-03	2,83E-03	3,43E-03			3,95E-03
55				1,50E-03	2,29E-03		3,03E-03	3,22E-03	3,28E-03	
50	6,80E-03	2,13E-02	1,66E-03		1,94E-03	2,24E-03	2,70E-03	2,92E-03	2,99E-03	3,35E-03
45			1,40E-03			1,88E-03	2,40E-03			
40	4,10E-03	1,54E-02			1,41E-03		2,04E-03	2,19E-03	2,41E-03	2,74E-03
35				9,60E-04		1,37E-03	1,68E-03	1,82E-03		2,45E-03
30	1,80E-03	1,34E-02	9,40E-04				1,38E-03	1,47E-03	1,74E-03	
25					9,50E-04				1,43E-03	1,86E-03
20	9,50E-04	1,26E-02				9,00E-04				
15							8,80E-04	9,30E-04		1,32E-03
10	7,00E-04	4,00E-03							8,40E-04	

Tabla 44.- Base BP-C3: granulometría por rayo láser

Donde:

- **BP-C3 CD y BP-C3 SD:** granulometría por sedimentación de la muestra **BP-C3** original, **CON Dispersante** o **SIN Dispersante**, respectivamente
- **RLPC3HX1 y RLPC3HX2:** granulometría por **Rayo Láser**, de la muestra **BP-C3** (la fracción menor de 0.08 mm), con **HeXametafosfato** sódico, **1:** con dispersión por ultrasonidos, **2:** sin dispersión por ultrasonidos.
- **RLPC3SA1 Y RLPC3SA2:** granulometría por **Rayo Láser**, de la muestra **BP-C3** (la fracción menor de 0.08 mm), con sulfato de aluminio, (**1:** con dispersión por ultrasonidos o **2:** sin dispersión).
- **RL364B48, y siguientes:** granulometría por **Rayo Láser**, de la muestra de agua n° **48** del ensayo **NEF-364** y siguientes.

En primer lugar destaca que el rango de variación de la granulometría por rayo láser en todas las muestras es muy reducido, desde cerca de 10 micras de tamaño máximo hasta cerca de 1 micra como límite inferior.

También se observa que para cualquier diámetro de comparación, por ejemplo el d_{85} , el valor es muy similar en todos los casos, oscilando entre 4.57 micras y 5.66 micras y que tampoco se observa una diferencia cuantitativa entre la granulometría de los sólidos contenidos en el agua de salida del ensayo, por ejemplo RL364B48, y la granulometría de la muestra original, por ejemplo RLPC3HX1.

De estos resultados se pueden sacar dos conclusiones contradictorias:

1. Efectivamente la variación del tamaño de las partículas es muy pequeña
2. El método de medida no es válido o no ofrece la suficiente precisión

A pesar de haberse tratado de localizar información sobre estudios realizados con el mismo instrumental para obtener granulometrías de arcillas dentro de la Universidad de Granada, la búsqueda fue infructuosa, por lo que no ha quedado más remedio que ampliar esta toma de datos a la *Investigación de Fondo* de forma que al aumentar el volumen de información disponible y la variabilidad de las muestras, se pueda obtener una mejor perspectiva del estudio.

6.7 Conclusiones de la Investigación de Choque

6.7.1 Respecto a las Instalaciones

- Se ha comprobado que la instalación diseñada funciona correctamente con muy reducidas incidencias particulares como cortes de luz que obligan a repetir el ensayo

6.7.2 Respecto al ensayo

- El mejor criterio para calificar entre "Éxito" o "Fracaso" es medir el orificio de salida y comprobar si ha aumentado. En caso de duda es necesario fijarse además en el volumen total recogido y en la evolución de la gráfica caudal-tiempo
- Los resultados de los ensayos son bastante repetitivos
- El resultado del ensayo es muy sensible a la variación del D_{15F} , pasándose de "Éxito" a "Fracaso" con una variación de una décima de milímetro
- El empleo de arena fina como “material lateral” puede conducir a errores cuando el filtro se compacta por vibración por lo que es aconsejable realizar ensayos con plastilina para comprobar su efecto

- Hay que realizar en la Investigación de Fondo más medidas de la granulometría por rayo láser de los sólidos contenidos en el agua de salida para tratar de obtener conclusiones más concretas
- En casi todos los ensayos el caudal se estabiliza en los primeros minutos, incluso en aquellos calificados como "Fracaso" por lo que los 20 minutos de duración del ensayo son suficientes
- Al reducir la presión de ensayo se aumenta el D_{15FL} , luego el gradiente hidráulico es una variable influyente cuyo efecto se debe comprobar con más ensayos

6.7.3 Respecto al material de Filtro

- Es necesario completar la caracterización del filtro mediante ensayos de densidad relativa
- En el análisis estadístico se ha obtenido una relación entre la permeabilidad y el D_{15F} , para cada tiempo de compactación
- También se ha obtenido una relación entre la porosidad y el D_{15F} para cada tiempo de compactación
- Unificando estas variables, se ha obtenido una expresión de la permeabilidad (k) en función del D_{15F} y la porosidad (n) de la forma:

$$k_F = 145.5 * D_{15F} * n^6 \quad R^2 = 0.935 \quad k_F \text{ (cm/s), } D_{15F} \text{ (mm), } n \text{ (adim.)}$$

Ecuación 118

- Se confirma la influencia del D_{15F} en el comportamiento frente a la erosión del suelo base
- Se descarta la utilización del D_{50F} como diámetro de comparación o diseño

- La pendiente de la curva granulométrica, y no sólo el D_{15F} , es también una variable influyente
- La permeabilidad del filtro es una variable influyente aunque todavía no se ha podido cuantificar
- Los criterios actuales de diseño no permiten afinar en el diseño del filtro necesario para una base concreta e incluso algunos de ellos quedan del lado de la inseguridad

6.7.4 Respecto al material de suelo base

- La caracterización de las muestras de suelo base realizada hasta ahora es correcta pero resulta interesante calcular la curva granulométrica sin emplear dispersante, para determinar la distribución del tamaño de grumos
- Los criterios que emplean el d_{85B} se aproximan bastante al resultado obtenido, en cambio no ocurre así con los que emplean el d_{50B}
- La humedad de la base es una variable influyente, a menor humedad mejor comportamiento frente a la erosión interna
- El empleo de aditivos como sulfato de aluminio potásico permite diseñar filtros menos estrictos, luego por ahora parece que la naturaleza del suelo base y no sólo su granulometría es una variable influyente
- Al haberse ensayado hasta ahora sólo dos muestras de suelo base, no es posible obtener aun resultados sobre elección de variables de diseño
- No se ha conseguido determinar la influencia del diámetro del orificio por lo que hay que realizar más ensayos de este tipo en la *Investigación de Fondo*.
- Queda descartado estudiar la influencia del empleo de bentonita como aditivo.

7 MODIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE PARTIDA

7.1 Introducción

Una vez llevada a cabo la puesta a punto del ensayo y la posterior fase de *Investigación de Choque*, ya se tiene experiencia y datos suficientes para volver a plantear todo el esquema de la investigación con el fin de ratificar aquello que se considere que ya estaba correctamente planteado y corregir o incluso modificar por completo todos aquellos aspectos que se haya comprobado que no habían sido adecuadamente concebidos o que, después de obtener los primeros resultados, hayan sido cuestionados.

7.2 Modificación de los objetivos de la Investigación

7.2.1 Objetivo General

En la *Investigación de Fondo* se ha detectado que ciertas variables como por ejemplo la presión de ensayo o la humedad del suelo base e incluso la adición de productos químicos al suelo base, pueden modificar significativamente los resultados del ensayo de filtros sin erosión y por lo tanto el diseño del filtro granular adecuado. Sin embargo hay muy pocas referencias sobre investigaciones que hayan tenido en cuenta estas variables por lo que parece que la presente investigación puede llegar a tener conclusiones originales e interesantes.

Por otra parte, durante el desarrollo de la investigación se ha establecido contacto con investigadores en Australia (Dr. Indraratna y Mr. Locke) que están tratando de desarrollar modelos matemáticos para el estudio de la erosión interna en suelos cohesivos. Esta interesante vía precisa también de los resultados obtenidos en

laboratorio por lo que se ha considerado muy interesante continuar la investigación con simulación en laboratorio para poder servir de apoyo a la investigación australiana sobre modelos numéricos.

Por ello el objetivo general enunciado inicialmente se confirma plenamente y se mantiene intacto: *simular en laboratorio el fenómeno de erosión interna en presas de materiales sueltos para la determinación de las variables que influyen en la eficacia de un filtro granular frente a la erosión interna de bases cohesivas.*

7.2.2 Objetivos Principales

En el presente apartado se reproducen los objetivos ya enunciados en el capítulo 3, y a continuación se hacen algunos comentarios o modificaciones en función de la experiencia adquirida en la fase de la *Investigación de Fondo*:

1. *“Determinar las variables correspondientes al **filtro granular**, (granulometría, porosidad, permeabilidad, etc.), que influyen en su capacidad para retener las partículas erosionadas del suelo base e intentar cuantificar su efecto”.*

Este objetivo se confirma ya que se ha observado que además del D_{15F} , hay otras variables relativas al filtro como la pendiente de la curva granulométrica, la permeabilidad o la compactación que tienen un efecto significativo que precisa un estudio con detenimiento del cual se prevé obtener conclusiones interesantes

2. *“Determinar las variables correspondientes al **suelo base**, (granulometría, humedad, densidad, plasticidad, dispersabilidad, erosionabilidad, cohesión, composición y mineralogía, empleo de aditivos y otras), que influyen en la forma en que éste puede ser erosionado y cómo éstas condicionan el diseño del filtro adecuado”.*

De nuevo este objetivo se mantiene ya que nada más empezar ya se han obtenido resultados interesantes como el efecto del sulfato de aluminio sobre el suelo base, por lo que es de prever que se detecten otras variables que no se hayan tenido en

cuenta hasta ahora y que sin embargo tengan una influencia notable en el fenómeno de la erosión interna.

Así por ejemplo, en la *Investigación de Choque* se ha comprobado que al añadir sulfato de aluminio al suelo base, el D_{15FL} aumenta, sin tenemos en cuenta que la variación en la granulometría del suelo base es despreciable, esto quiere decir que al reducirse su dispersabilidad se modifica el resultado de los ensayos NEF, lo cual va en contra de las afirmaciones de Sherard y Dunningan (1985) de que no hay diferencia entre arcillas dispersivas y no dispersivas. Para comprobar esta interesante cuestión se ensayaran muestras de material de núcleo que tengan carácter dispersivo.

3. *“Determinar de qué manera las **condiciones del flujo** pueden influir en el fracaso o éxito de un filtro granular a la hora de proteger a un determinado suelo base en caso de producirse erosión interna”.*

Los resultados obtenidos al variar la presión de ensayo no son muy precisos, pero indican una posibilidad de profundizar en el tema, ya que hasta ahora quedaba claro que las condiciones de flujo afectan a la erosión del suelo base, pero poco se ha estudiado sobre la repercusión en el proceso de interceptación dentro del filtro. Por ello este objetivo sigue vigente.

4. *“Determinar la influencia de **otras variables** como el agua del ensayo, condiciones geométricas, etc.”*

Tal y como se ha justificado en apartados anteriores, se ha decidido realizar todos los ensayos con agua del embalse del Portillo, descartando estudiar la posible influencia de su naturaleza o composición química. Tampoco se han obtenido buenos resultados al tratar de modificar las condiciones geométricas como el diámetro del orificio o el espesor de la pastilla de suelo base, por lo que no se volverá a realizar esta comparación.

Por tanto este objetivo **queda anulado**, aunque cabe la posibilidad de proponerlo para las futuras líneas de investigación.

5. *“Comprobar, mediante la experimentación directa, la **validez de los actuales criterios de diseño** de filtros granulares para el caso específico de las bases cohesivas y realizar una selección de los criterios más adecuados, señalando en cada caso el coeficiente de seguridad que contienen”.*

Se ha podido comprobar con las muestras de suelo base BP-C2 y BP-C3 que la mayoría de los criterios existentes que emplean el D_{50F} y el d_{50B} no son válidos para el diseño de filtros para bases cohesivas, sin embargo, los criterios que emplean el d_{85B} obtienen un resultado más aproximado aunque es posible ajustar mejor el diseño del filtro, incluso hay algunos criterios que quedan del lado de la inseguridad. Por ello se confirma que es interesante, para que las conclusiones sean fiables, mantener este objetivo y comprobar los criterios existentes con el mayor número posible de muestras de suelo base.

6. *“Elaborar unas **nuevas normas de diseño** de filtros granulares específicas para bases cohesivas”.*

Los resultados obtenidos en la *Investigación de Fondo* no son suficientes aun para poder elaborar unas nuevas normas de diseño de filtros específicas para bases cohesivas, sin embargo, al haberse detectado que existen otras variables influyentes no consideradas hasta ahora en las reglas de diseño existentes, es bastante probable que continuando la investigación éste objetivo sea viable.

7.2.3 Objetivos Secundarios

1. *“Comprobar la **validez del actual método de ensayo** de filtros sin erosión ideado por Sherard en 1984 y tratar de perfeccionarlo”*

En la *Investigación de Fondo* se ha podido comprobar que el ensayo NEF de Sherard es muy representativo y bastante repetitivo por lo que parece adecuado para estudiar

de forma sistemática el fenómeno de la erosión interna. Sin embargo se ha considerado conveniente introducir algunas modificaciones al ensayo como los intervalos de lectura, método de medición de turbidez, tipo de material lateral empleado, etc. que hacen interesante ampliar el objetivo inicial para tratar de *realizar unas recomendaciones sobre los ensayos de filtros granulares* que pueden ser de mucha utilidad para futuros investigadores.

2. *“Contribuir con un amplio número de ensayos de filtración a aumentar la base de datos existente en la actualidad y permitir a futuros investigadores o proyectistas disponer de mayor información sobre la cuestión”*

Este objetivo tiene mayor interés del que quizás se le pueda atribuir en un análisis previo, ya que existen interesantes referencias (Fischer y Holtz 1996) en las que se lleva a cabo un estudio estadístico recopilando todos los datos de distintos investigadores lo que permite encontrar envolventes de los resultados y por lo tanto estudiar suelos empleados en distintas zonas del mundo e incluso comparar resultados de distintos métodos de ensayo.

3. *“Tratar de **unificar las teorías** que emplean por separado la granulometría o la permeabilidad del filtro como variables de diseño”*

En la *Investigación de Choque* se ha comprobado que además del D_{15F} del filtro también influye su permeabilidad, por lo que es muy interesante tratar de unificar estos criterios y por ello este objetivo se mantiene en la *Investigación de Fondo*.

4. *“**Diseñar o comprobar el diseño**, mediante experimentación directa, de los filtros granulares más apropiados para algunas presas de materiales sueltos de la provincia de Granada y Cádiz de forma que sirva de referente a futuras construcciones con un entorno geológico similar”*

También es interesante mantener este objetivo ya que hasta ahora sólo se ha comprobado el filtro necesario para la arcilla de la presa el Portillo, verificándose que el filtro puesto en obra cumple perfectamente las recomendaciones obtenidas de

la experimentación directa. Es interesante comprobar si ocurre lo mismo con las demás presas.

5. **NUEVO OBJETIVO:** “Aplicar nuevas tecnologías como la mineralogía de suelos por difracción de rayos X o la granulometría de suelos mediante rayos láser al estudio de la erosión interna”.

Se ha añadido este objetivo a la investigación ya que para poder profundizar en el conocimiento del fenómeno de la erosión interna es muy interesante estudiar cómo puede afectar la mineralogía del suelo base a la forma en que éste puede ser erosionado. También resulta de interés medir el tamaño de las partículas contenidas en el agua de salida del ensayo y que por lo tanto han sido capaces de atravesar el filtro, para lo que se puede aplicar la técnica de granulometría por rayo láser.

7.3 Modificación de la Metodología

7.3.1 Modificación del método de ensayo

7.3.1.1 Selección del método de ensayo

En la primera fase de ajuste del ensayo se hicieron una serie de pruebas que permitieron diseñar el método de ensayo de forma que éste funcione correctamente. A lo largo de la posterior *Investigación de Choque* se ha podido comprobar que efectivamente el diseño realizado era adecuado ya que no se han presentado problemas importantes.

Por lo tanto se mantiene el ensayo NEF en la siguiente fase de la investigación ya que además se ha comprobado que es muy representativo y muy sensible a una pequeña variación en el D_{15F} del filtro.

7.3.1.2 *Variantes del ensayo*

□ *Agua*

Ya se ha justificado anteriormente que se abandona la idea de estudiar la influencia de la **naturaleza del agua** y su composición química, quedando este tema para posibles líneas futuras de investigación.

□ *Muestras de suelo base*

Se confirma el interés de ensayar las muestras de los materiales empleados en las presas ya propuestas, en particular se insiste en el interés de ensayar **arcillas dispersivas** como las de la presa de Zahara, sobre todo después de comprobar en la *Investigación de Choque* que el **sulfato de aluminio como aditivo** puede permitir diseñar filtros granulares menos estrictos.

Sin embargo no se ha conseguido obtener ningún resultado con el empleo de **bentonita** como aditivo del suelo base por la dificultad de asegurar la homogeneidad de la mezcla por lo que esta variable queda descartada para la fase de la *Investigación de Fondo*.

Igualmente se abandona la idea inicial de comprobar el efecto de un aumento del **espesor de la base**, pasando a 5 cm, con lo que se disminuiría el gradiente hidráulico y se aumentaría la superficie susceptible de erosión, ya que por otro lado, esa mayor longitud provocaría una mayor dificultad en la realización del orificio y la posibilidad de favorecer la interceptación de partículas del suelo base dentro del propio conducto, lo que falsearía los resultados del ensayo.

También se estudió la posibilidad de aumentar el **diámetro del orificio** practicado en la pastilla de suelo base pero no se han obtenido resultados concluyentes, por lo que esto no se hará más que con aquellas muestras que por el tamaño de sus partículas así lo aconsejen.

Otra variable que se estudió fue la incidencia de una **mayor compactación** del suelo base, pero al duplicar el número de golpes con la maza tipo “Army” no se obtuvieron resultados de interés. Por ello esta variable queda también descartada.

Por lo tanto, después de finalizar la *Investigación de Choque* se han descartado algunas variables que no parecen ser interesantes y nos permiten acotar mejor la investigación.

□ *Muestras de material de Filtro*

Se confirma completamente el proceso de fabricación del filtro y recomposición de su granulometría especificada, si bien se abandona el empleo de filtros con $D_{100F} = 5\text{mm}$, ante el peligro de que sufran inestabilidad interna.

En cuanto a los filtros con $D_{100F} = 20\text{ mm}$, han dado algunas dificultades al introducirlos en la probeta de ensayo ya que de forma muy frecuente las partículas más gruesas del filtro taponaban por completo la salida del orificio practicado en el suelo base.

Puesto que ya se ha comprobado la influencia del D_{100F} para un mismo D_{15F} , en la *Investigación de Fondo* se va a limitar la granulometría estudiada a filtros con $D_{100F} = 10\text{ mm}$, salvo algunos ensayos de comprobación que emplearán también filtros con $D_{100F} = 20\text{ mm}$.

□ *Material lateral*

Se debe destacar el posible efecto del material lateral de **arena** más fina que el filtro empleada en la última tongada de éste, observado en los ensayos de la *Investigación de Choque*. Es posible que al compactar por vibración, las partículas finas del material lateral migren y se coloquen sobre la superficie del filtro reduciendo el tamaño de sus poros. Este efecto se ha podido observar más claramente en los ensayos que emplea 120 segundo de vibración.

Si efectivamente se confirma que el material lateral tiene un marcado efecto en el resultado de los ensayos, al seguir la metodología propuesta por Sherard y Dunningan (1985) se podría estar cometiendo un error instrumental importante.

Para tratar de evitar este problema se ha considerado necesario sustituir la arena por un cordón de **plastilina** o **arcilla** de modelar colocado cuidadosamente para que tampoco interfiera en la compactación. Como quiera que ya se han realizado muchos ensayos con arena como material lateral y que la metodología original así lo señala y por lo tanto son muchos los investigadores que usan este material, se ha considerado importante seguir haciendo ensayos empleando los dos tipos de material lateral para tratar de cuantificar su efecto, ya que es de esperar que éste se acentúe al aumentar la compactación.

Por tanto la única modificación que se introduce en el método de ensayo es la utilización de plastilina como material lateral, si bien se seguirán realizando ensayos con arena para comparar su efecto.

□ *Condiciones de flujo*

Se confirma el estudio de la influencia de la presión de ensayo mediante la realización de ensayos con **presiones** de **4** y **2 kg/cm²** respectivamente. No se van a ensayar presiones mayores porque la probeta de perpex sufre mucho durante la compactación y el desarrollo del ensayo y no es aconsejable aumentar la presión interna. Por otro lado, el gradiente hidráulico conseguido con 4 kg/cm² ya es suficientemente alto, (incluso excesivo para algunos investigadores).

□ *Tiempo de ensayo*

Se ratifica la decisión de realizar el ensayo NEF con una **duración** de **20 minutos**, ya que en todos los ensayos de la *Investigación de Choque* se ha comprobado que el proceso de sellado tiene lugar en los primeros instantes.

No obstante se realizará algún ensayo de **larga duración** a modo de comprobación.

7.3.1.3 Parámetros a analizar

En cuanto a los parámetros a analizar hay que señalar que en los comienzos de la presente investigación se consideró que podía ser una aportación original interesante el idear un método cuantitativo para medir la **turbidez del agua** de salida del ensayo NEF y por lo tanto obtener mayor precisión que con la tradicional apreciación visual. Para ello se comenzó a utilizar el laboratorio de análisis de calidad de las aguas que la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir tiene en la Presa del Negratín.

La aplicación de la nefelometría a la medición de la turbidez ha dado lugar a resultados muy interesantes pero supone una gran dificultad ya que el elevado ritmo de realización de ensayos NEF, (hasta dos ensayos diarios), ha llegado a saturar la capacidad del laboratorio de aguas.

Por otro lado, en la revisión de los conocimientos se describe la utilización de un turbidímetro en el estudio de los ensayos de dispersabilidad, Kabasy (1993).

Ambas razones, junto al hecho de que se dispone ya de un importante número de ensayos realizados empleando medidas de turbidez, y puesto que el criterio "Exito" o "Fracaso" se basa en el diámetro del orificio; se ha decidido continuar la *Investigación de Fondo* empleando la nefelometría sólo en algunos ensayos, pero no como norma general.

□ Nuevo parámetro: granulometría de los sólidos erosionados

Resulta muy interesante conocer la granulometría de las partículas sólidas contenidas en el agua de salida del ensayo, ya que esta nos puede dar una idea del proceso de erosión-interceptación en la interfase base-filtro. Si se toman muestras en distintos momentos del ensayo se puede llegar a representar el taponamiento progresivo de los poros del filtro y por consiguiente, el paso de partículas de suelo base cada vez más finas.

Este nuevo parámetro, la **granulometría del efluente**, no se ha medido en la mayoría de las investigaciones realizadas hasta la fecha, posiblemente debido a la dificultad de recopilar el suficiente material erosionado como para poder hacer un ensayo de granulometría por sedimentación.

En la presente investigación se ha tratado de resolver este problema empleando una nueva tecnología, como es la medición de tamaños de partículas con rayo láser. Esta técnica es muy poco empleada aun y supone una novedad en este tipo de investigaciones por lo que sus conclusiones pueden ser muy interesantes.

Por esta razón, en la fase de la *Investigación de Fondo* se tomarán muestras del agua de salida del ensayo, en distintos períodos y se analizará la granulometría de los sólidos mediante rayo láser. Este nuevo parámetro es también muy costoso de medir y por ello se limitará a un reducido número de ensayos.

Más información sobre el método se puede consultar en el ANEJO 12.3.

□ *Nuevo parámetro: mineralogía de los sólidos erosionados*

En cuanto a la influencia de la mineralogía del suelo base en su mayor o menor tendencia a la dispersabilidad está ampliamente referenciada, por lo que se ha considerado interesante estudiar su efecto sobre el diseño de filtros granulares. Ya en la fase de la *Investigación de Choque* se ha caracterizado las muestras ensayadas empleando la técnica de la difracción de rayos X, pero además se ha llegado a la conclusión de que también puede ser muy interesante estudiar la **mineralogía de los sólidos** contenidos en el agua de salida del ensayo. De esta forma se podría observar si existe de alguna forma una erosión diferenciada según la naturaleza de las partículas.

Por ello se ha decidido incluir en la fase de la *Investigación de Fondo* este nuevo parámetro, si bien, teniendo en cuenta la dificultad y carestía de los ensayos de

difracción, sólo se realizarán estas medidas en determinados ensayos con objeto de recoger sólo una información representativa.

□ *Nuevo parámetro: mineralogía de las paredes del orificio*

Al igual que la mineralogía del suelo base y de los sólidos erosionados, se ha considerado interesante tomar una muestra del material que ha quedado sin erosionar, al finalizar el ensayo, en las paredes del orificio practicado en la pastilla de suelo base y determinar su mineralogía para compararla con la de los sólidos erosionados.

Es muy difícil que se obtengan diferencias significativas puesto que, de existir algún tipo de erosión selectiva o preferencial, la precisión del método de toma de muestras no sea suficiente.

En cualquier caso se trata de un intento novedoso que puede dar lugar al planteamiento de futuras líneas de investigación.

8 INVESTIGACIÓN DE FONDO

8.1 Introducción

En la fase de *Investigación de Choque* se ha comprobado que es posible obtener conclusiones interesantes mediante la realización de series de ensayos con las variantes del ensayo NEF "Estándar" descritas en el capítulo de Metodología.

En la presente fase se ha procedido a ampliar la investigación a todas las muestras de suelo base disponibles y con dichas variantes del ensayo NEF.

Por supuesto que no se han ensayado cada muestra con todas las variantes del ensayo, tanto por imposibilidad técnica y económica como por no ser necesario, sino que se tratará de comprobar, a raíz de los resultados de la *Investigación de Choque*, el efecto de cada variable sobre un cierto número de bases de forma que se puedan obtener conclusiones aceptables.

8.2 Descripción de las muestras ensayadas

8.2.1 Filtro

Las muestras de material de filtro ensayadas en la *Investigación de Fondo* tienen las mismas características que las utilizadas en la fase de la *Investigación de Choque*, por lo que ya se han descrito anteriormente.

8.2.2 Suelo Base

Además de las muestras correspondientes a la **Presa del Portillo** ya ensayadas y descritas en la *Investigación de Choque*, (BP-C1, BP-C2 y BP-C3), se han ensayado las muestras BP-C2-0.32, BP-C2-0.63, BP-C2-1.25, BP-C4 y BP-C5, correspondientes a la misma Presa.

Además de estas muestras se han ensayado las siguientes:

- **Presa de Barbate**, río Barbate, Cádiz.- muestra BBA-C1
- **Presa de Canales**, río Genil, Granada.- muestras BCA-C1 y BCA-C2
- **Presa de Francisco Abellán**, río Fardes, Granada.- muestras BFA-C1 y BFA-C2
- **Presa de Jesús del Valle**, río Darro, Granada (en proyecto).- muestras BJV-C1, BJV-C2, BJV-C3, BJV-C4, BJV-C5, BJV-C6, BJV-C7, BJV-C8 y BJV-C9
- **Presa de San Clemente**, río Guardal, Granada.- BSC-C1, BSC-C4 y BSC-C5
- **Presa de Zahara**, río Guadalete, Cádiz.- muestra BZA-C1

Los ensayos de caracterización de estas muestras han dado los siguientes resultados:

BCLAVE	d100	d90	d85	d70	d60	d50	d40	d30	d20	d10	%<5	%<0,08	%<0,002	Cu	Cc
BBA-C1	5,00	0,0580	0,0431	0,0141	0,0050	0,0014	0,0010	0,0009	0,0008	0,0005	100,00	90,36	52,00	10,00	3,09
BCA-C1	0,10	0,0166			0,0020	0,0010						98,00	60,00		
BCA-C2	5,00	0,4770	0,0324	0,0054	0,0030	0,0017	0,0011	0,0009	0,0008	0,0005	100,00	86,84	52,30	6,00	1,85
BFA-C1	10,00	2,0600	0,7760	0,1100	0,0450	0,0160	0,0065	0,0030	0,0012	0,0004	94,23	66,03	25,00	128,57	1,75
BFA-C2	5,00	1,3000	0,6300	0,0981	0,0337	0,0111	0,0054	0,0022	0,0010	0,0008	100,00	67,98	28,50	42,13	5,57
BJV-C1	5,00	0,5900	0,3000	0,0900	0,0571	0,0317	0,0149	0,0074	0,0033	0,0013	100,00	68,00	14,00	43,92	1,36
BJV-C2	5,00	0,0559	0,0411	0,0202	0,0156	0,0112	0,0076	0,0047	0,0021	0,0009	100,00	93,12	19,50	17,33	0,64
BJV-C3	5,00	0,5900	0,3000	0,0900	0,0571	0,0317	0,0149	0,0074	0,0033		100,00	68,00	14,00		
BJV-C4	5,00	0,0559	0,0411	0,0202	0,0156	0,0112	0,0076	0,0047	0,0021	0,0009	100,00	93,12	19,50	17,33	0,64
BJV-C5	5,00	0,0499	0,0323	0,0126	0,0086	0,0060	0,0037	0,0021	0,0012	0,0008	100,00	92,00	30,00	10,75	1,56
BJV-C6	5,00	0,0800	0,0615	0,0272	0,0164	0,0102	0,0061	0,0035	0,0017	0,0009	100,00	90,00	25,00	18,22	1,20
BJV-C7	5,00	2,0000	1,2500	0,1250	0,0611	0,0424	0,0166	0,0073	0,0034	0,0015	100,00	64,00	16,00	40,73	1,72
BJV-C8	80,00	16,00	8,0000	1,8000	0,4000	0,1000	0,0375	0,0170	0,0065		80,47	46,66	10,00		
BJV-C9	80,00	2,0000	0,6300	0,0544	0,0281	0,0140	0,0072	0,0036	0,0017		94,02	72,73	23,00		
BP-C1	2,00	0,3200	0,1000	0,0320	0,0180	0,0095	0,0065	0,0028	0,0018	0,0010	100,00	81,00	27,00	18,00	2,30
BP-C2	2,00	0,0800	0,0650	0,0220	0,0150	0,0095	0,0065	0,0050	0,0015	0,0009	100,00	88,00	21,00	16,67	0,54
BP-C2-0,32	2,00	0,0530	0,0310	0,0140	0,0079	0,0051	0,0035	0,0026	0,0018	0,0010	100,00	96,00	23,00	7,90	1,17
BP-C2-0,63	2,00	0,2900	0,0700	0,0211	0,0114	0,0073	0,0050	0,0028	0,0018	0,0010	100,00	86,00	24,00	11,40	1,45
BP-C2-1,25	2,00	0,3200	0,1000	0,0264	0,0150	0,0082	0,0042	0,0028	0,0018	0,0010	100,00	82,00	18,00	15,00	1,91
BP-C3	5,00	0,0747	0,0464	0,0203	0,0108	0,0068	0,0041	0,0018	0,0010	0,0007	100,00	89,50	30,00	15,43	2,33
BP-C4	5,00	0,4900	0,1000	0,0194	0,0108	0,0054	0,0027	0,0010				71,00	36,65		
BP-C5	5,00	0,1500	0,0600	0,0180	0,0085	0,0043	0,0018	0,0067				88,20	42,00		
BSC-C1			0,0700									88,05			
BSC-C4	5,00	0,3000	0,0933	0,0271	0,0128	0,0063	0,0038	0,0020	0,0013	0,0008	100,00	83,19	30,00	16,00	2,56
BSC-C5			0,0600									94,20			
BZA-C1	5,00	0,0053	0,0033	0,0012	0,0009	0,0008	0,0007	0,0005	0,0003	0,0001	100,00	99,25	78,00	8,50	0,34

Tabla 45.- Granulometría de las muestras ensayadas, (Con Dispersante): valores en milímetros

En algunas muestras se ha obtenido además la granulometría por tamizado y sedimentación pero sin dispersante, para poder estudiar el posible influjo de la floculación natural de las partículas de arcilla sobre su comportamiento frente a la erosión interna.

BCLAVE	d100SD	d90SD	d85SD	d70SD	d60SD	d50SD	d40SD	d30SD	d20SD	d10SD	%<5	%<0.08	%<0.002	Cu	Cc
BBA-C1	5,00	0,1200	0,1000	0,0544	0,0402	0,0287	0,0205	0,0135	0,0085	0,0050	100,00	90,36	0,00	8,04	1,10
BCA-C2	5,00	0,4770	0,1600	0,0708	0,0381	0,0216	0,0142	0,0080	0,0040	0,0018	100,00	72,20	11,00	21,17	1,07
BFA-C2	5,00	1,3000	0,6300	0,0981	0,0607	0,0360	0,0242	0,0152	0,0109	0,0080	100,00	67,98	0,00	7,59	2,10
BJV-C2	5,00	0,0485	0,0400	0,0210	0,0171	0,0153	0,0144	0,0138	0,0132	0,0110	100,00	95,00	0,00	1,55	0,99
BP-C2	2,00	0,2300	0,1500	0,0400	0,0160	0,0120	0,0100	0,0090	0,0080	0,0020	100,00	78,00	1,00	8,00	0,40
BP-C3	5,00	0,0854	0,0831	0,0455	0,0322	0,0213	0,0154	0,0134	0,0126	0,0040	100,00	86,00	2,00	8,05	0,72
BSC-C4	5,00	0,3000	0,1056	0,0769	0,0503	0,0341	0,0235	0,0151	0,0078	0,0030	100,00	71,00	8,00	16,77	0,66
BZA-C1	5,00	0,1396	0,0933	0,0328	0,0190	0,0095	0,0059	0,0034	0,0012	0,0012	100,00	84,00	19,00	15,83	1,97

Tabla 46.- Granulometría de las muestras ensayadas, (Sin Dispersante)

En ambas tablas los diámetros están medidos en milímetros. En cuanto a la densidad y humedad próctor y la plasticidad, se tiene:

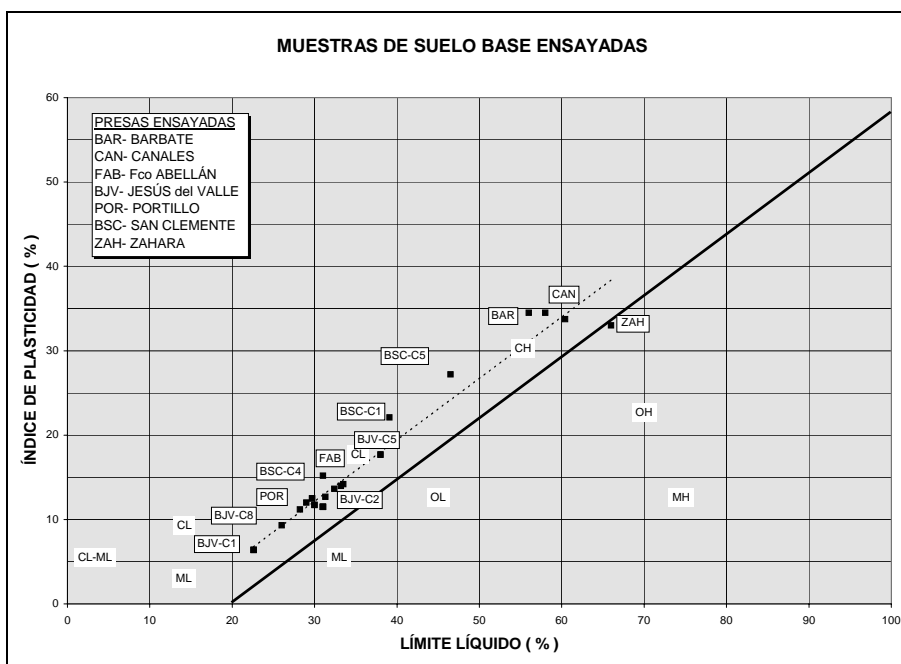


Gráfico 30.- Gráfico de Plasticidad de las Bases ensayadas

Y además la siguiente tabla:

BCLAVE	HN	Hopt	Dmax	LL	LP	IP
	%	%	gr/cm3	%	%	
BBA-C1		21,94	1,616	56,00	21,50	34,50
BCA-C2		17,90	1,635	60,40	26,64	33,76
BFA-C1		13,34	1,874			
BFA-C2		12,65	1,847	32,40	18,76	13,64
BJV-C1	10,60	10,50	1,982	22,60	16,20	6,40
BJV-C2	9,50	13,34	1,800	31,00	19,50	11,50
BJV-C3	10,60	10,50	1,982	22,60	16,20	6,40
BJV-C4	9,50	13,34	1,800	31,00	19,50	11,50
BJV-C5	12,24	11,70	1,855	38,00	20,30	17,70
BJV-C6	11,31	11,30	1,855	30,00	18,30	11,70
BJV-C7	3,57	10,30	1,975	29,70	17,20	12,50
BJV-C8	6,30	9,00	2,065	26,00	16,70	9,30
BJV-C9	8,08	8,50	1,955	31,30	18,60	12,70
BP-C1		13,70	1,870			
BP-C2		12,96	1,886	33,20	19,20	14,00
BP-C3		12,83	1,876	33,50	19,32	14,18
BP-C4		13,70	1,870	28,20	17,00	11,20
BP-C5		13,70	1,870	29,00	17,00	12,00
BSC-C1	14,60	14,10	1,773	39,10	17,00	22,10
BSC-C4		16,10	1,766	31,00	15,80	15,20
BSC-C5	14,60	18,80	1,656	46,50	19,30	27,20
BZA-C1		24,40	1,554	66,00	33,00	33,00

Tabla 47.- Densidad y Humedad Próctor y Límites de Atterberg de las Bases ensayadas

Como se puede ver, la muestras ensayadas corresponden a arcillas de baja y alta plasticidad, pero en ningún caso se trata de limos o arenas finas, puesto que se pretendía estudiar precisamente bases cohesivas.

También se ha obtenido, aunque sólo para algunas muestras, la mineralogía de las bases mediante difracción de rayos X. Estos ensayos han sido realizados bajo la dirección de D. Miguel Ortega, Catedrático de Mineralogía de la Universidad de Granada

BCLAVE	Cuarzo	Calcita	Dolomi	Feldes	Arcill	Esmec	Ilita	Caolin	Clorit	Parag
	%	%	%	%	%	%SA	%SA	%SA	%SA	%SA
BBA-C1	38	3	0	3	56	82	0	18	0	0
BCA-C2	17	11	10	0	62	51	36	13	0	0
BFA-C2	30	0	9	9	52	22	63	6	9	0
BJV-C2	48	5	20	5	22	40	50	6	0	4
BJV-C6	19	4	51	4	22	46	44	0	10	0
BJV-C7	41	13	20	4	22	45	41	7	7	0
BJV-C8	48	6	25	1	20	38	52	0	10	0
BJV-C9	41	5	24	4	26	47	40	5	9	0
BP-C3	45	11	0	5	39	53	30	12	5	0
BSC-C4	9	82	0	0	9	63	21	16	0	0
BZA-C1	30	0	0	0	70	72	4	24	0	0

Tabla 48.- Mineralogía de las Bases ensayadas

Donde las 5 primeras columnas se refieren a la proporción en porcentaje sobre la muestra total, mientras que las 5 columnas restantes se refieren a al porcentaje respecto a la fracción arcilla.

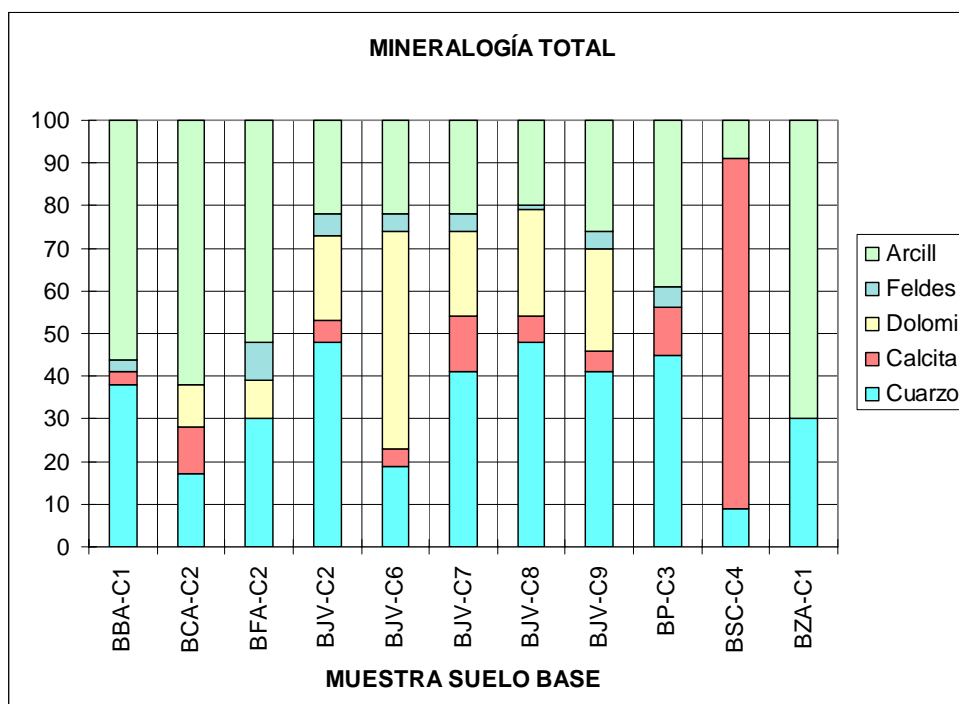


Gráfico 31.- Mineralogía de las muestras de suelo base

Destacan como minerales mayoritarios el la arcilla y el cuarzo, mientras que dentro de los minerales arcillosos, es la esmectita la más abundante, seguido de la ilita, (salvo en la muestra BBA-C1), mientras que la paragonita sólo aparece de forma significativa en las muestras de la Presa de Jesús del Valle.

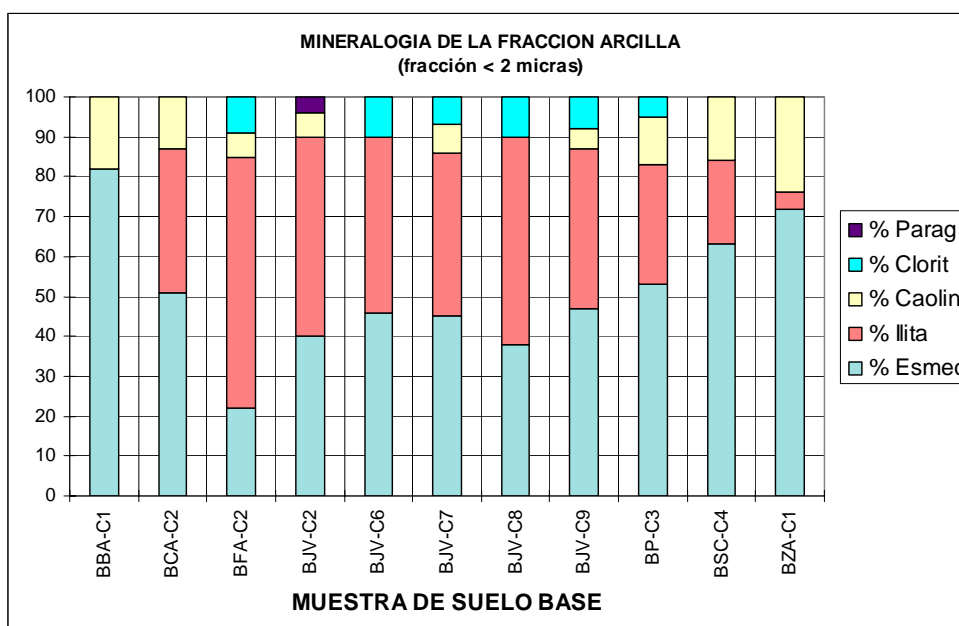


Gráfico 32.- Mineralogía de la fracción arcilla

La muestra de la Presa de Zahara, BZA-C1, de carácter dispersivo, destaca por la ausencia de carbonatos y feldspatos y un mayor porcentaje de clorita respecto a las demás.

Otros datos de interés se muestran en la tabla que se presenta a continuación, donde las dos primeras columnas corresponden a la cohesión y el ángulo de rozamiento interno, las tres siguientes al porcentaje de carbonatos, sulfatos y sales solubles; a continuación está el peso específico de las partículas y la permeabilidad, y por último, la dispersabilidad según el ensayo de Pin-hole.

BCLAVE	Cohes	ϕ	Carb	Sulf	SS	Pesp	Permeab	Disp
	kg/cm2	°	%	%	%	gr/cm3	cm/s	
BBA-C1			4,30			2,74	1,83E-08	ND-1
BCA-C1			17,56	1,35	2,50	2,77	1,00E-08	ND-1
BCA-C2			21,70		2,50	2,75	1,00E-08	ND-1
BFA-C1								
BFA-C2			18,33	1,44	0,11	2,79		ND-1
BJV-C1			28,70	0,09		2,78		ND-1
BJV-C2			29,00	0,09		2,80	6,22E-08	ND-1
BJV-C3			28,70	0,09		2,78		ND-1
BJV-C4			29,00	0,09		2,80	6,22E-08	ND-1
BJV-C5	0,09	27,00	29,50	0,09		2,80	6,22E-08	ND-1
BJV-C6	0,15	26,50	33,00	0,09		2,81	3,49E-07	ND-1
BJV-C7	0,15	26,50	27,80	0,08		2,81	3,40E-07	ND-1
BJV-C8	0,03	31,00	32,60	0,07		2,76	3,40E-07	ND-1
BJV-C9	0,06	28,00	27,90	0,14		2,77	2,26E-07	ND-1
BP-C1			38,00	2,55		2,69		
BP-C2			26,22	7,44	7,21	2,66		ND-1
BP-C3			30,79	0,53	1,41	2,74	1,28E-07	ND-1
BP-C4	0,32	24,00	30,41	1,35	2,02	2,67	2,40E-08	ND-1
BP-C5	0,10	27,00	31,53	0,80	1,29	2,68	2,29E-08	ND-1
BSC-C1	0,25	22,62	31,36	1,72	2,53	2,71	8,86E-09	ND-1
BSC-C4	0,15		77,13	0,03	0,94	2,71	2,78E-08	ND-1
BSC-C5	0,15	27,56	53,47	1,02	1,79	2,66	1,55E-08	ND-1
BZA-C1	0,12	22,00				2,76		ND-3

Tabla 49.- Otras características de las Bases ensayadas

Como se puede ver en las tablas anteriores, se dispone de un amplio número de muestras de bases cohesivas, incluyendo una arcilla dispersiva, (BZA-C1), abarcando por tanto un amplio espectro de suelos de grano fino.

8.3 Bases: Estudio Estadístico

8.3.1 Introducción

Al ser muy elevado el número de bases ensayadas así como el de variables tales como granulometría, plasticidad, próctor, mineralogía, etc., antes de poder estudiar la influencia de cada una de estas variables en el comportamiento del suelo base frente

a la erosión interna es preciso realizar un estudio estadístico que permita detectar relaciones de las propias variables del suelo base entre sí.

Así por ejemplo, es conocida la relación entre la humedad óptima y la densidad máxima, por lo que si al estudiar los resultados de los ensayos NEF se observa una influencia de la densidad y otra de la humedad, en realidad no se trata de variables independientes sino interrelacionadas.

A diferencia del caso de los filtros, en el que interesaba cuantificar las relaciones entre las distintas variables para, por ejemplo, poder estimar la permeabilidad en función del D_{15F} y la porosidad; en el caso de las bases interesa sobre todo buscar relaciones cualitativas y estudiar su coeficiente de correlación, pero no se van a buscar las expresiones matemáticas de los modelos de regresión, tanto por simplificar, como por su escasa utilidad²⁰.

8.3.2 Detección de variables interdependientes o correlacionadas

Dada la potencia de cálculo del programa SPSS, es posible obtener una matriz de correlaciones entre todas las variables, dos a dos, con expresión del coeficiente de correlación, la significación bilateral y el número de casos.

Esta matriz, de 41x41, permite detectar rápidamente aquellas relaciones más significativas, destacando los siguientes resultados:

8.3.2.1 Relaciones de la granulometría con otras variables del suelo base

□ Relación de las variables granulométricas entre sí

Los distintos diámetros d_{xB} , donde -x- representa el porcentaje en peso menor que dicho diámetro, están muy correlacionados entre sí, destacando por ejemplo la

²⁰ En cualquier caso, los modelos se han calculado, aunque no se han adjuntado en el texto para simplificar

relación d_{85B} - d_{50B} , con $R^2= 0.83$, o la correlación d_{85B} - d_{70B} con $R^2=0.99$; pero en cualquier caso, todos los diámetros cercanos tienen una correlación muy alta.

Para permitir la representación de los resultados, se han seleccionado las siguientes variables granulométricas: el d_{85B} y el d_{50B} , por ser los diámetros más frecuentemente empleados; el porcentaje de finos, ($\%<0.08$ mm, ó B08), y el porcentaje de fracción arcillosa, ($\%<0.002$ mm, ó B002).

Con esta simplificación se tiene:

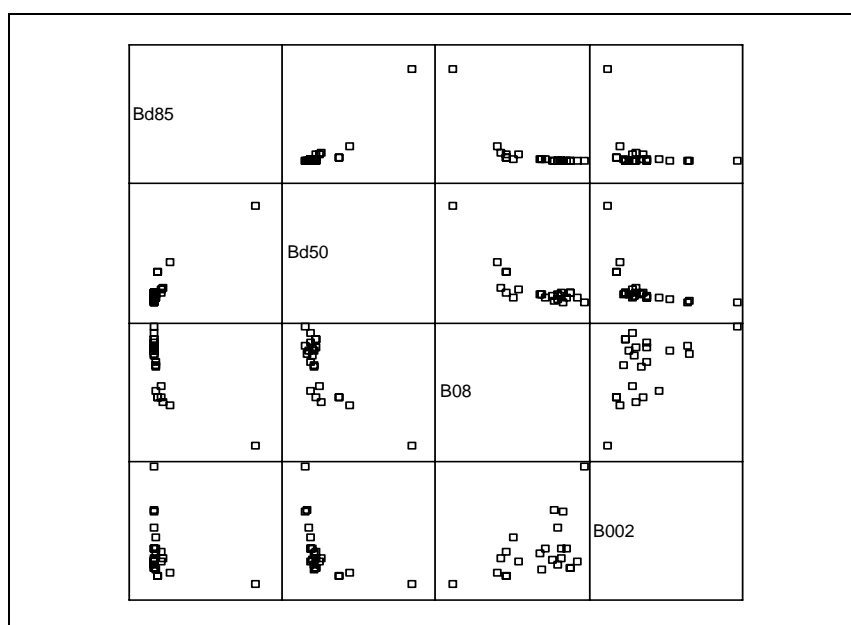


Gráfico 33.- Bases: relaciones entre variables granulométricas

En cuanto a los coeficientes de correlación se tiene:

Correlaciones				
	Bd85	Bd50	B08	B002
Bd85				
Correlación de Pears				
Sig. (bilateral)				
N				
Bd50				
Correlación de Pears	,924**			
Sig. (bilateral)	,000			
N	23			
B08				
Correlación de Pears	-,683**	-,787**		
Sig. (bilateral)	,000	,000		
N	25	24		
B002				
Correlación de Pears	-,322	-,527**	,549**	
Sig. (bilateral)	,134	,008	,005	
N	23	24	24	

** .La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Tabla 50.- Bases: correlación entre variables granulométricas

Efectivamente, la relación entre los diámetros superiores como el d_{85B} y el porcentaje de finos o la fracción arcillosa es muy pequeña por lo que estas variables seleccionadas se puede decir que son relativamente independientes, (salvo, claro está, la relación ya comentada d_{85B} - d_{50B}).

□ *Relación entre la granulometría con y sin dispersante*

A continuación se ha estudiado la relación entre las variables granulométricas obtenidas por el método normalizado, (por sedimentación con dispersante), y las correspondientes a la granulometría obtenida sin dispersante, (para las que se utiliza la nomenclatura BdxSD).

En este caso es menor el número de datos disponibles, 9, por lo que hay que ser cautos con el resultado, pero sólo es significativa la relación, entre el B08 con y sin dispersante, (B08-B08SD, $R^2=0.70$), y entre el B002-B002SD ($R^2=0.65$).

Parece por tanto que existe poca relación, o al menos difícil de cuantificar, entre las granulometrías con y sin dispersante, pero a continuación se ha estudiado si las diferencias encontradas tienen alguna relación con la mineralogía,

Para ello se ha calculado la correlación de las variables mineralógicas con la ratio, por ejemplo, Bd85/Bd85SD, no habiéndose encontrado ninguna relación suficientemente significativa.

□ Relación de la Granulometría con el “Próctor” y la Plasticidad

En principio parece posible, por ejemplo, que una base que tenga un porcentaje de arcilla alto, tenga a su vez alta la plasticidad, pero es preciso comprobarlo.

Para ello se ha vuelto a hacer una matriz de correlaciones bivariadas observándose que los diámetros d_{85} y d_{50} no tienen ninguna relación con el Próctor y la Plasticidad, al igual que ocurre con las variables granulométricas sin dispersante.

Sin embargo se han obtenido los siguientes resultados interesantes:

Correlaciones								
		B08	B002	BHO	BDM	BLL	BLP	BIP
B08	Correlación de Pearson							
	Sig. (bilateral)							
	N							
B002	Correlación de Pearson	,549**						
	Sig. (bilateral)	,005						
	N	24						
BHO	Correlación de Pearson	,611**	,898**					
	Sig. (bilateral)	,003	,000					
	N	22	20					
BDM	Correlación de Pearson	-,747**	-,869**	-,940**				
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000				
	N	22	20	22				
BLL	Correlación de Pearson	,599**	,901**	,874**	-,888**			
	Sig. (bilateral)	,004	,000	,000	,000			
	N	21	19	20	20			
BLP	Correlación de Pearson	,531*	,831**	,727**	-,724**	,876**		
	Sig. (bilateral)	,013	,000	,000	,000	,000		
	N	21	19	20	20	21		
BIP	Correlación de Pearson	,584**	,881**	,871**	-,892**	,979**	,758**	
	Sig. (bilateral)	,005	,000	,000	,000	,000	,000	
	N	21	19	20	20	21	21	

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).
* La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 51.- Bases: correlaciones entre Granulometría, Próctor y Plasticidad

El porcentaje de finos, (B08) no tiene una alta correlación, sin embargo no ocurre lo mismo con el porcentaje de fracción arcillosa, (B002).

La fracción arcillosa tiene una clara influencia en la humedad óptima y en el índice de plasticidad, ya que al aumentar el porcentaje de arcilla, aumentan las otras dos variables, tal y como se observa en el gráfico siguiente:

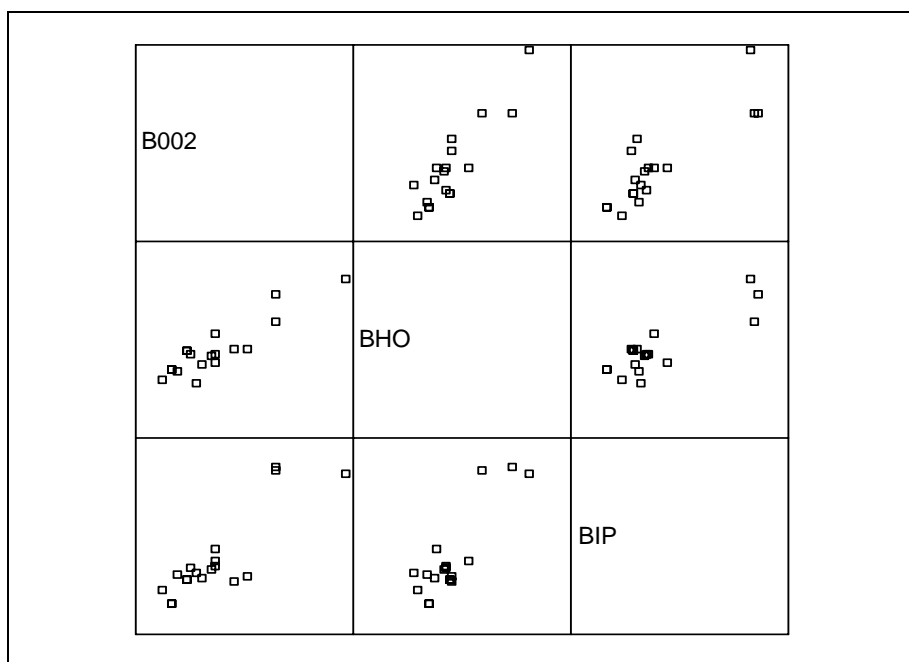


Gráfico 34.- Bases: relación entre porcentaje de Arcilla, Humedad Óptima e Índice de Plasticidad

Pero también hay que destacar la relación entre la densidad máxima (BDM) y la humedad óptima (BHO) del ensayo próctor normal, ya que es prácticamente lineal como aparece en el siguiente gráfico:

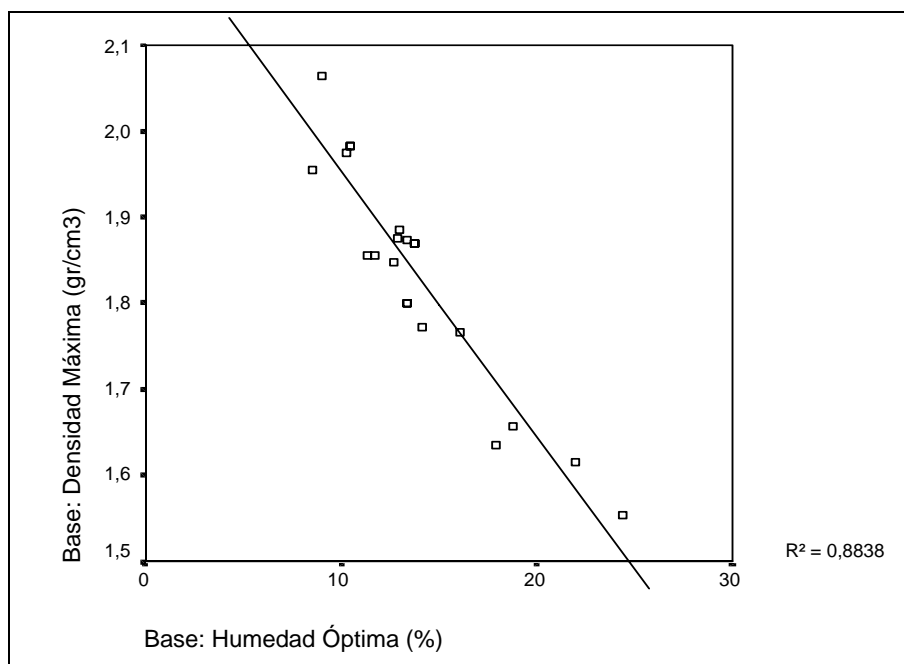


Gráfico 35.- Bases: relación entre Humedad Óptima y Densidad Máxima

También se observa la relación entre el índice de plasticidad y el límite líquido, tal y como se suele representar en el gráfico de Casagrande. Esta relación, no por conocida tiene menos interés, ya que permite comprobar que efectivamente los datos disponibles son razonables.

□ *Relación de la granulometría con la mineralogía*

En este caso se puede decir que la mayor o menor presencia de un determinado mineral en un suelo base no tiene relación con la granulometría. Sólo cabe destacar la buena relación encontrada entre el porcentaje menor de 0.002 mm, es decir, la fracción denominada arcilla, y el porcentaje de mineral arcilloso presente en cada muestra, (obtenido por difracción de rayos-x), tal y como aparece en el siguiente gráfico:

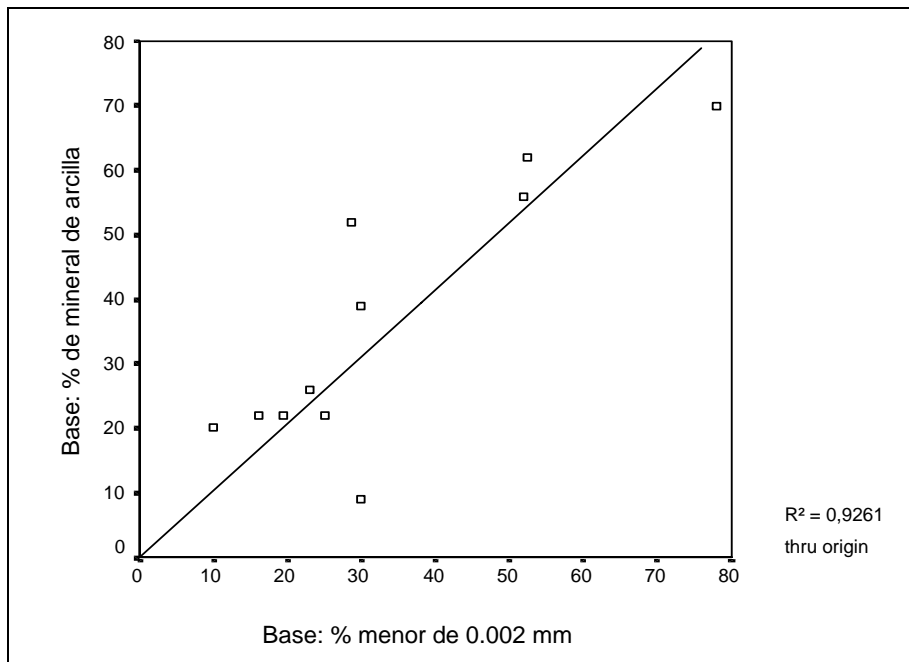


Gráfico 36.- Base: relación entre la fracción arcilla y el contenido de mineral de arcilla

De nuevo esta relación sólo tiene interés porque corrobora la validez de los datos, ya que muestran una relación entre dos formas muy diferentes de “denominar” a la arcilla, por la granulometría o por la mineralogía.

□ Relación entre la granulometría y otras variables

Como era de esperar, no se han encontrado relaciones significativas entre la granulometría y otras variables como la cohesión, el ángulo de rozamiento o la composición química. Sí se ha detectado una lógica influencia del porcentaje de fracción arcilla, (B002) con la permeabilidad, pero no es digna de un estudio más en profundidad.

8.3.2.2 Relaciones entre otras variables del suelo base

De entre todas las demás variables sólo son destacables las siguientes relaciones:

- **Humedad óptima- Caolín:** hay sólo 11 datos, pero el coeficiente de correlación es muy alto, $R^2=0.82$, sin embargo también aparecen coeficientes altos entre la humedad óptima y el resto de los minerales de la arcilla, lo cual no parece tener mucho sentido. Parece razonable pensar que esta relación pueda ser casual, pero en cualquier caso hay que tenerla en cuenta cuando se correlacionen estas variables con los resultados de los ensayos NEF.
- **Carbonatos-calcita:** con una correlación de $R^2=0.81$, la relación entre el % de carbonatos medidos en el calcímetro y el % de mineral de calcita, medido por difracción de rayos-x, permite comprobar de nuevo que los datos son correctos, pero no tiene interés para los estudios posteriores
- **Plasticidad:** en la plasticidad, representada por el índice de plasticidad, la variable más influyente es el porcentaje de fracción arcilla, (B002), como se ha visto anteriormente, pero también tiene una cierta influencia la presencia de caolín. En cualquier caso, no hay datos suficientes para proponer relaciones cuantitativas.

8.4 Resultados de los ensayos NEF “Estándar”

8.4.1 Introducción

La primera y más importante fase de la *Investigación de Fondo* ha consistido en la realización de una serie de ensayos NEF siguiendo las mismas especificaciones de Sherard y Dunningan (1985), por lo que se ha denominado a este tipo de ensayo el “NEF Estándar”²¹.

Estos ensayos NEF “Estándar” se han realizado con la totalidad de las muestras de suelo base ya que uno de los objetivos principales de esta investigación es poder

²¹ En el apartado de “Metodología” se puede ver la descripción completa de este ensayo

obtener resultados que sean comparables con los de otros investigadores que hayan seguido la misma metodología.

Se han realizado por tanto 182 ensayos NEF del tipo “Estándar”, de los cuales se consideran válidos 179, habiéndose ensayado 26 muestras de suelo base que corresponden a 7 presas españolas.

8.4.2 Muestras ensayadas

8.4.2.1 Filtro

Tal y como se ha explicado en el apartado de “Metodología”, todas las muestras de filtro ensayadas tienen una granulometría lineal definida por el D_{100F} y el D_{15F} , en particular, en los ensayos NEF "Estándar", sólo 2 muestras de filtro (1.1% del total), tienen $D_{100F}=5$ mm, mientras que 153 muestras (85.5% del total) tienen $D_{100F}=10$ mm y 20 muestras, (13.4% del total), tienen el $D_{100F}=20$ mm.

Por lo tanto es posible estudiar la influencia no sólo del D_{15F} sino también de otras variables granulométricas como pueden ser el D_{100F} , Cu, Cc, etc.

En cuanto al D_{15F} de los filtros ensayados, tiene un amplio rango de variación, desde 0.2 mm, (el más fino que se ha podido fabricar sin que sea inestable), hasta 3.0 mm, si bien han sido los resultados de los ensayos NEF los que han ido determinando qué filtros era necesario ensayar.

A continuación se adjunta un gráfico que muestra la frecuencia de cada D_{15F} ensayado:

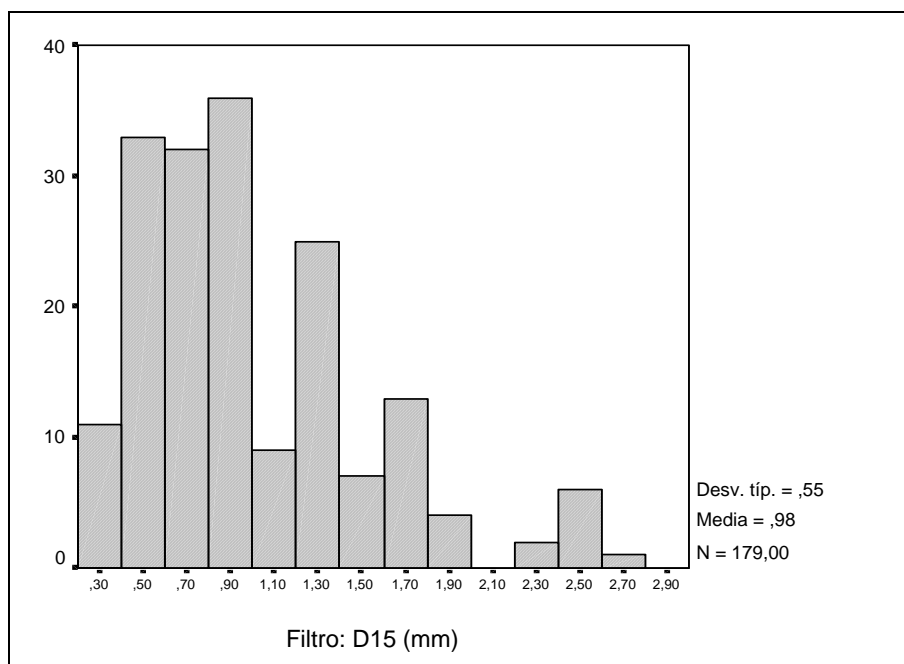


Gráfico 37.- D₁₅ de los filtros ensayados: histograma

Como se puede ver, los tamaños más frecuentes se encuentran en el rango de D_{15F} entre 0.4 y 1.0 mm, siendo muy minoritarios los D_{15F} superiores a 1.8 mm, ya que éstos sólo se han ensayado con las muestras de suelo base más gruesas.

8.4.2.2 Suelo Base

Como ya se ha comentado en el apartado de introducción, en la fase de ensayos NEF "Estándar" se han ensayado la totalidad de las muestras de suelo base disponibles en la presente investigación, (26 muestras diferentes), habiendo sido seleccionadas para tener una muestra representativa de las presas de la provincia de Granada y además una muestra de las bases cohesivas en general, debido a lo cual se han ensayado las arcillas de la Presa de Zahara y de Barbate, por su carácter dispersivo y su elevada plasticidad.

Aunque las características de estas muestras ya han sido descritas anteriormente, a continuación se adjunta una tabla con los rangos de variación de cada una de sus propiedades más interesantes:

	Mínimo	Máximo
Bd100	,10	80,00
Bd85	,003	8,000
B08	46,66	99,25
B002	10,00	78,00
BHO	8,50	24,40
BDM	1,55	2,07
BIP	6,40	34,50

Tabla 52.- Bases ensayadas: rango de variación de sus características

Donde aparecen, por orden, el d_{100B} y el d_{85B} (en milímetros); el % menor de 0.08mm, el % menor de 0.002 mm, la humedad óptima, (en %), la densidad máxima, (en gr/cm^3) y el índice de plasticidad, (en %).

Interesa especialmente destacar que el porcentaje en peso de la muestra que pasa por el tamiz de 0.08 mm, (B08), oscila entre el 46.66% y el 99.25%, por lo tanto las muestras ensayadas pertenecen a los grupos 1 y 2 de la clasificación de Sherard et al (1985).

También es de destacar la gran variación existente en el Índice de Plasticidad, (BIP): entre 6.40 y 34.50.

Por ello se puede considerar que las muestras ensayadas abarcan un amplio espectro de las bases cohesivas.

8.4.3 Preparación del ensayo: parámetros analizados

8.4.3.1 Preparación del Filtro

En los ensayos NEF "Estándar" el filtro se compacta en 4 tongadas de 2.54 cm de espesor mediante una sobrecarga de 9.07 kg sometida a 60 segundos de vibración por tongada.

Finalizada la compactación de las cuatro tongadas, por diferencia de pesadas y niveles se calcula el peso del filtro y su volumen, y a partir de ahí se calcula la

densidad seca y por lo tanto la porosidad. Lógicamente también se mide la humedad del filtro, pero en este caso es una variable poco significativa.

Puesto que el parámetro más importante medido al finalizar la fase de preparación del ensayo es la porosidad, interesa estudiar la precisión de las medidas y si este parámetro depende de otras variables como la granulometría del filtro.

En la fase de la *Investigación de Choque* se realizó un estudio estadístico de todas las variables relativas al filtro, obteniéndose que la porosidad, (n), tiene relación con el D_{15F} , para cada energía de compactación. En particular, para el caso de 60 segundos de vibración, se obtuvo la siguiente expresión:

$$n=0.303 + 0.0216*D_{15F} \quad R^2=0.734 \quad (D_{100F}=10\text{mm. } D_{15F} \text{ en mm})$$

Ecuación 119

Efectivamente la correlación no es suficientemente alta pero la influencia cualitativa queda bastante clara, de forma que al aumentar el D_{15F} aumenta ligeramente la porosidad.

En esta fase se han tomado 179 medidas de la porosidad del filtro, de forma que al relacionarlas con el D_{15F} se obtiene el siguiente gráfico de dispersión que representa en abscisas el D_{15F} y en ordenadas la porosidad, distinguiendo en cada caso el tamaño máximo del filtro, (D_{100F}).

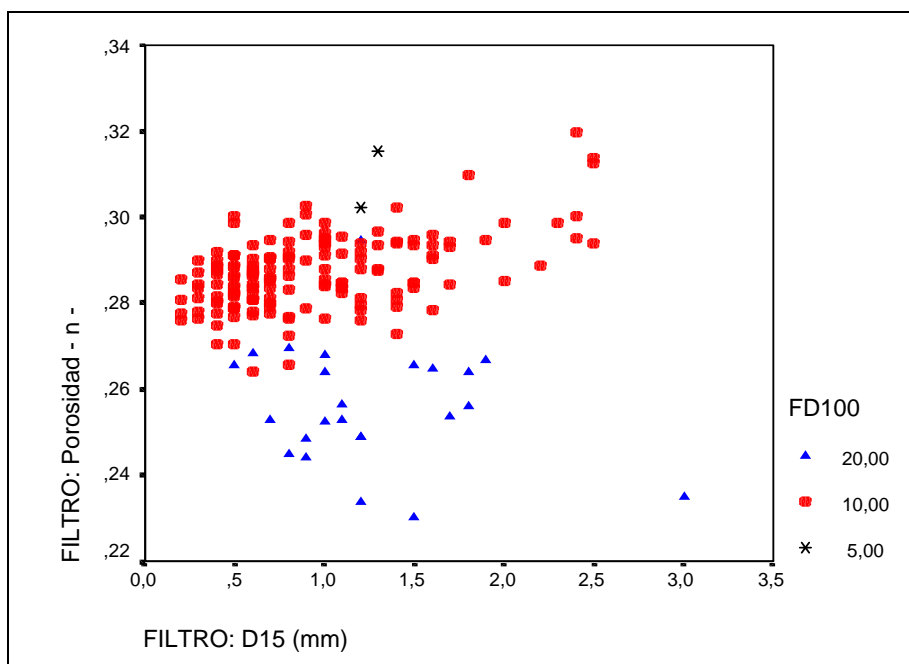


Gráfico 38.- Ensayos NEF Estándar: relación porosidad-D_{15F}

Como se puede ver, en el rango de porosidad entre 0.22 y 0.34, la variación es muy amplia, sin embargo ahora no se aprecia claramente la influencia del D_{15F} aunque sí se aprecia perfectamente la influencia del D_{100F}, de forma que para un mismo D_{15F}, la porosidad es mayor cuanto menor es el D_{100F}.

Esta variación se refleja mejor en el siguiente gráfico que muestra el intervalo de confianza del 95% para la porosidad, en función del D_{100F} y el D_{15F}:

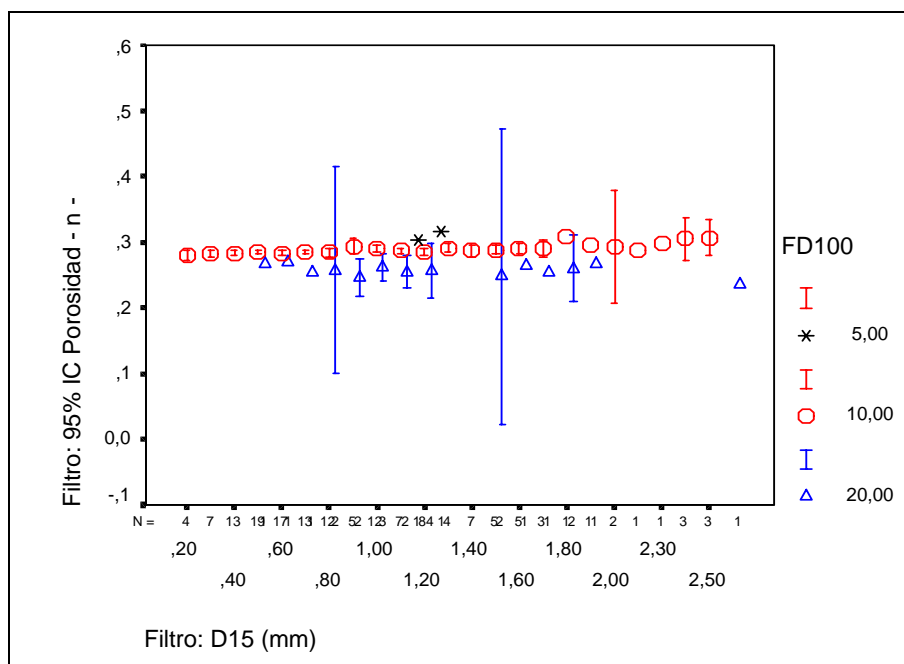


Gráfico 39.- Ensayos NEF Estándar: relación entre la porosidad y el D_{15F} según el D_{100F}

Ahora se aprecia una ligera tendencia ascendente de la porosidad en función del D_{15F} , para $D_{100F} = 10$ mm, y una gran dispersión en el caso de $D_{100F} = 20$ mm.

Esa dispersión puede ser debida a errores en la medida o a la propia variabilidad del fenómeno, en cualquier caso interesa comprobar la posible existencia de datos anómalos o de algún tipo de sesgo en el error.

Para ello se estudia a continuación la regresión lineal entre la porosidad, como variable dependiente, y el D_{15F} y D_{100F} , como variables independientes. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Correlaciones

		EFn	FD15	FD100
Correlación de Pearson	EFn	1,000	,095	-,755
	FD15	,095	1,000	,183
	FD100	-,755	,183	1,000
Sig. (unilateral)	EFn	,	,104	,000
	FD15	,104	,	,007
	FD100	,000	,007	,
N	EFn	179	179	179
	FD15	179	179	179
	FD100	179	179	179

Resumen del modelo^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,791 ^a	,625	,621	8,8397E-03

a. Variables predictoras: (Constante), FD100, FD15

b. Variable dependiente: EFn

Tabla 53.- Regresión lineal entre Porosidad-D_{15F}-D_{100F}

Como se puede ver, la correlación no es muy alta, pero sí se puede considerar significativa, aunque más en el caso de la influencia del D_{100F} en la porosidad que en el del D_{15F}.

Coefficientes^a

Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%	
		B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	,314	,002		131,654	,000	,310	,319
	FD15	6,299E-03	,001	,241	5,134	,000	,004	,009
	FD100	-3,30E-03	,000	-,799	-17,021	,000	-,004	-,003

a. Variable dependiente: EFn

Correlaciones de los coeficientes^b

Modelo		FD100	FD15
1	Correlaciones	FD100	1,000
		FD15	-,183
	Covarianzas	FD100	3,753E-08
		FD15	-4,35E-08

a. Variable dependiente: EFn

Tabla 54.- Regresión lineal entre Porosidad-D_{15F}-D_{100F}: coeficientes y correlaciones

Efectivamente las tablas anteriores muestran que el intervalo de confianza del 95% para cada uno de los coeficientes del modelo, no contiene nunca al valor 0, por lo que se descarta la no influencia de las variables estudiadas.

A continuación se estudia la posibilidad de existencia de datos anómalos mediante el cálculo de los residuos tipificados:

Diagnósticos por caso^a

Número de caso	Residuo tip.	EFn	Valor pronosticado	Residual
12	4,394	,295	,25587	3,88E-02
28	-3,633	,235	,26721	-3,2E-02
30	-3,119	,230	,25776	-2,8E-02

a. Variable dependiente: EFn

Tabla 55.- Regresión lineal entre Porosidad-D_{15F}-D_{100F}: residuos tipificados

Hay tres ensayos en los que el valor de la porosidad se puede considerar anómalo, al ser su residuo tipificado superior a 3, los ensayos NEF- 11, 27 y 29, (ver que la numeración de los ensayos NEF corresponde a una unidad inferior al expresado en las tablas).

En cualquier caso, la existencia de sólo 3 datos anómalos entre 179 muestras, no es preocupante y entra dentro de lo que puede considerarse razonable. Lo que si es importante es comprobar si los errores siguen una distribución normal:

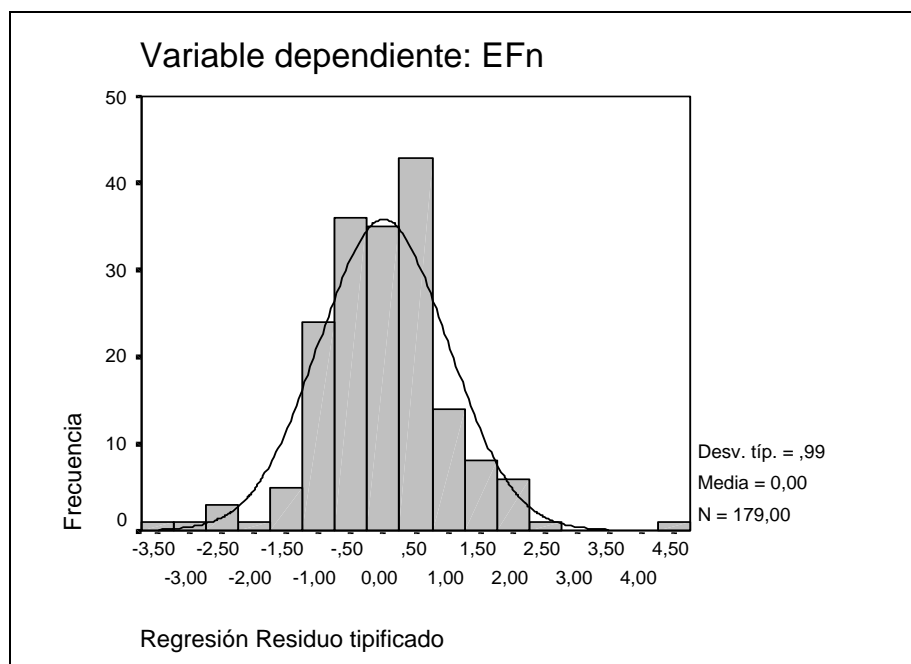


Gráfico 40.- Regresión entre Porosidad-D_{15F}-D_{100F}: histograma de residuos

Efectivamente, el histograma muestra que la distribución de los residuos tipificados es prácticamente simétrica y siguiendo una ley Normal.

De todo esto se puede deducir que la dispersión de los datos de porosidad se debe a factores aleatorios o de precisión de las medidas, pero no hay errores sistemáticos o instrumentales de consideración.

En cuanto a la permeabilidad del filtro, en la *Investigación de Choque* se obtuvieron unas fórmulas que expresan la permeabilidad en función del D_{15F} para cada tiempo de vibrado, (FKD15TV) y también se obtuvo una expresión que calcula la permeabilidad en función del D_{15F} y la porosidad -n-, (FKD15n).

En el siguiente gráfico matricial de dispersión se puede ver el resultado de cada expresión según los datos de los ensayos NEF:

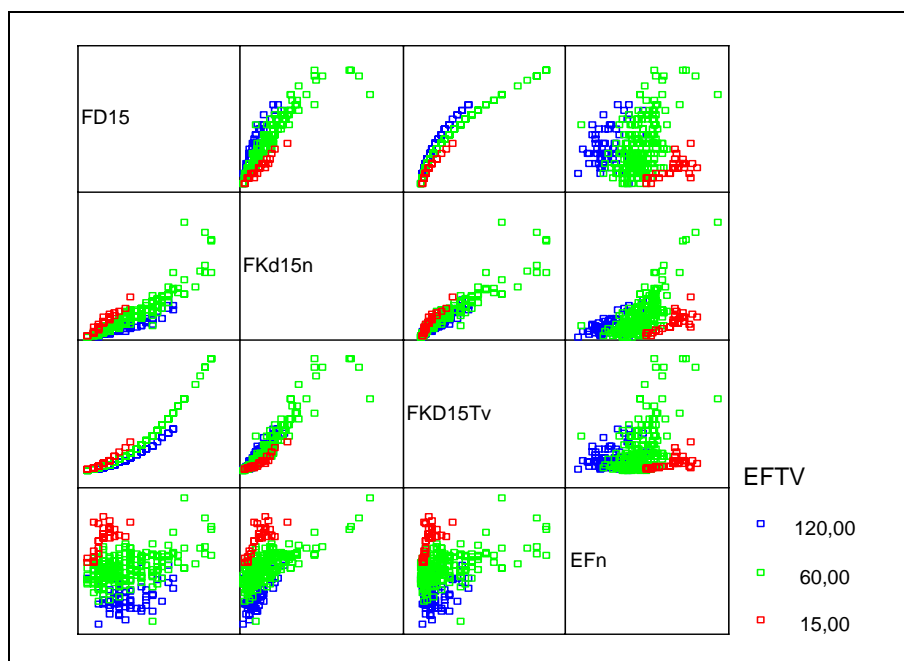


Gráfico 41.- Gráfico matricial de dispersión, D_{15F} -Permeabilidad-Porosidad

Donde $FKd15n$ se refiere a la permeabilidad del filtro, en cm/s , según la ley que emplea el D_{15F} y la porosidad; $FKD15Tv$ se refiere a la permeabilidad del filtro, en cm/s , según la ley que emplea el D_{15F} y el tiempo de vibrado; Efn es la porosidad del filtro y $EFTV$ es el tiempo de vibrado del filtro.

Efectivamente la porosidad presenta una elevada dispersión por lo que produce un efecto de “ruido” que distorsiona los resultados, además, en la gráfica $FD15$ - $FKD15n$ se ve que la consideración de la porosidad no permite unificar la expresión de la permeabilidad para cualquier tiempo de compactación por vibrado.

Por estos motivos se ha considerado que las expresiones que mejor permiten estimar el valor de la permeabilidad del filtro según su granulometría y la compactación son las que tienen en cuenta el D_{15F} y el tiempo de vibración:

- Si $T_v = 60$ segundos: $k_F = 0.1118 * D_{15F}^2$ $k_F, (cm/s), D_{15F} (mm)$

Ecuación 120

Para terminar con la fase de preparación del filtro, queda señalar que en la última tongada de filtro se coloca un material lateral, de arena más fina que el filtro, para impedir una filtración preferencial entre el filtro y las paredes de la probeta.

Al comenzar los ensayos se empleó arena de 0.16 mm, tal y como señalan Sherard y Dunningan (1985), pero ante la sospecha de que al compactar por vibración se pudiera producir migración de esas partículas finas hacia la superficie del filtro, en algunos ensayos se ha sustituido la arena por plastilina.

En concreto, se han realizado 128 ensayos NEF "Estándar" con arena y 51 con plastilina.

Más adelante se estudiará si el material lateral empleado tiene alguna influencia en el resultado de los ensayos.

8.4.3.2 Preparación de las muestras de suelo Base

En los ensayos NEF "Estándar", la muestra de material de suelo base se compacta en dos tongadas de media pulgada de espesor (1.27 cm), mediante 50 golpes con la maza tipo "Army", teniendo la muestra una humedad un 1% por encima de la humedad óptima del ensayo próctor normal.

En la fase de preparación de la muestra de suelo base se mide la humedad, el peso, el espesor y de ahí se calcula la densidad y la porosidad.

Es por tanto interesante estudiar en primer lugar, si existe alguna relación entre estos parámetros y si se han cometido errores significativos o sesgados en su medida.

Para estudiar la relación entre estos parámetros es muy útil realizar un gráfico de dispersión matricial en el que además se ha introducido las variables "RATBHUM", que es la ratio entre la humedad de la base y la humedad óptima, y la variable "RATBDEN" que es la ratio entre la densidad de la base y la densidad máxima próctor:

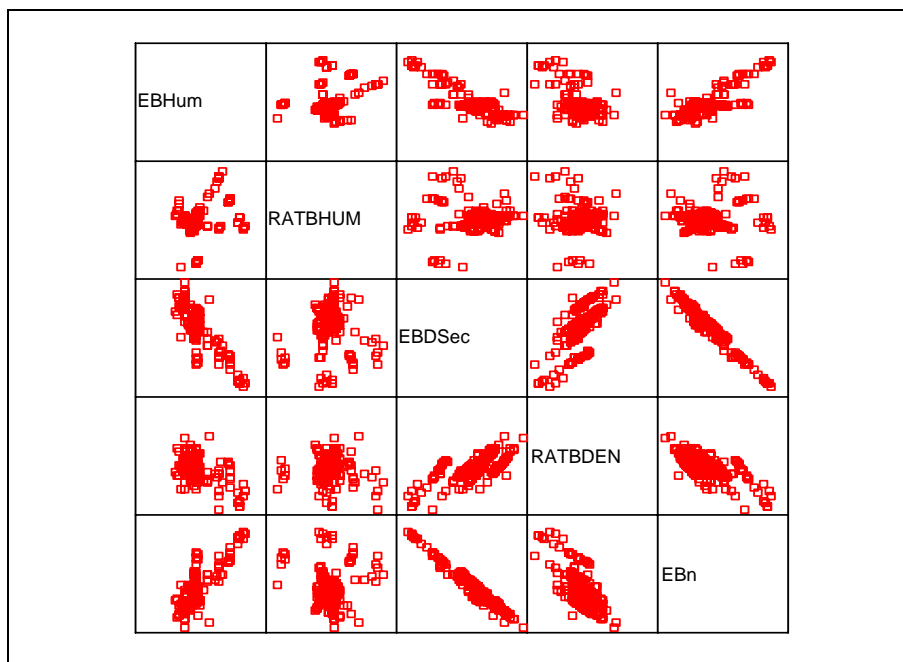


Gráfico 42.- Suelo base: relación entre la humedad y la compactación

Como se puede ver, la relación más clara es la existente entre la humedad y la densidad seca, ya que la relación densidad-porosidad es prácticamente matemática, (salvo la variación del peso específico de cada muestra).

Esta relación también se encontró en el estudio estadístico de las bases, pero entre la humedad óptima y la densidad máxima, por lo que el resultado es razonable.

A continuación se representan ambas relaciones a la vez:

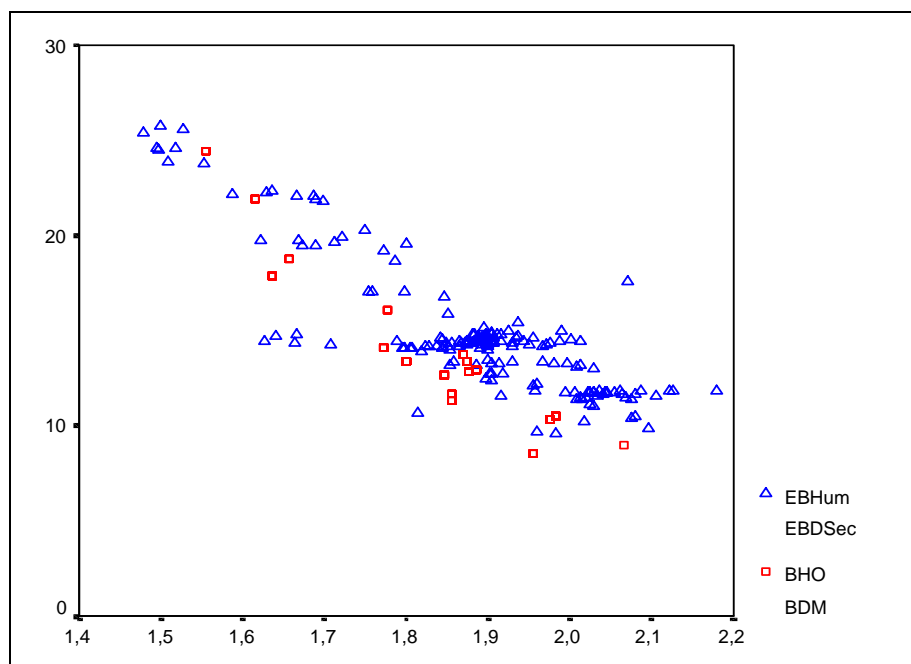


Gráfico 43.- Ensayos NEF Estándar: relación entre humedad y densidad de las bases

Como se puede ver, las relaciones humedad-densidad y humedad óptima-densidad máxima son muy similares.

Para cuantificar la relación existente y detectar posibles valores anómalos, se realiza una regresión lineal:

Correlaciones

		EBDSec	EBHum
Correlación de Pearson	EBDSec	1,000	-,865
	EBHum	-,865	1,000
Sig. (unilateral)	EBDSec	,	,000
	EBHum	,000	,
N	EBDSec	179	179
	EBHum	179	179

Resumen del modelo^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,865 ^a	,748	,747	7,268E-02

a. Variables predictoras: (Constante), EBHum

b. Variable dependiente: EBDSec

Coefficientes^a

Modelo	Coefficients no estandarizados		Coefficient es estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%	
	B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior
1 (Constante)	2,399	,024		101,764	,000	2,352	2,446
EBHum	-3,50E-02	,002	-,865	-22,933	,000	-,038	-,032

a. Variable dependiente: EBDSec

Tabla 56.- Regresión lineal entre la humedad y la densidad de las bases

En este caso se puede concluir que la correlación es muy alta y significativa, con poca variación de los coeficientes.

Existen sin embargo cuatro valores anómalos, que corresponden a las bases BP-C1 y BCA-C2. El primero de ellos tiene poca importancia ya que la base BP-C1 se ensayó sólo en la fase de preparación y ajuste del ensayo, pero no se han obtenido resultados concretos de los ensayos NEF. Los otros tres ensayos, con la base BP-C2, son consecutivos, lo que parece indicar algún error en la operación de compactar, no en el proceso de medida.

Diagnósticos por caso^a

Número de caso	Residuo tip.	EBDsec	Valor pronosticado	Residual
3	3,948	2,07	1,7831	,2869
83	-3,654	1,63	1,8916	-,2656
84	-3,332	1,64	1,8832	-,2422
86	-3,189	1,66	1,8958	-,2318

a. Variable dependiente: EBDSec

Tabla 57.- Regresión lineal entre la humedad y la densidad de las bases: estudio de los residuos

Si se excluyen estos 4 datos del estudio, la regresión lineal tiene la siguiente expresión:

$$\text{Dens} = 2.411 - 0.0356 * \text{Hum} \quad R^2=0.812 \quad (\text{Dens. gr/cm}^3, \text{Hum. \%})$$

Ecuación 121

8.4.4 Ejecución del ensayo: parámetros analizados

Durante la ejecución del ensayo NEF se toman medidas de caudal y turbidez y al finalizar el ensayo se mide el diámetro del orificio de entrada y el de salida.

De estos parámetros se han seleccionado ambos orificios, el volumen total de agua recogida, el caudal máximo durante el ensayo, el caudal final y además se ha calculado la velocidad media, (suponiendo variación lineal de la sección del orificio) y la velocidad final.

A la hora de decidir si un ensayo se considera ÉXITO, FRACASO o INTERMEDIO, se atiende fundamentalmente a que el orificio de salida no haya aumentado ni se haya recogido un volumen excesivo.

Es lógico pensar que haya alguna relación entre estos parámetros, para lo cual se ha realizado un gráfico matricial de dispersión, y a continuación se ha calculado el coeficiente de correlación de Pearson entre cada pareja:

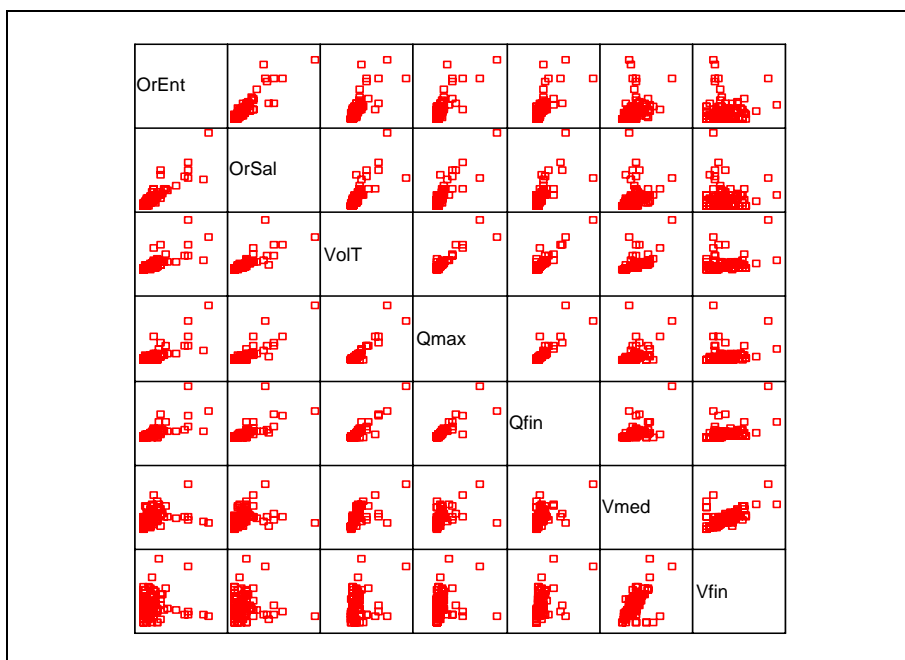


Gráfico 44.- Ejecución del ensayo: gráfico matricial de dispersión

Correlaciones

	OrEnt	OrSal	VolT	Qmax	Qfin	Vmed	Vfin
OrEnt	Correlación de Pearson Sig. (bilateral) N						
OrSal	Correlación de Pearson Sig. (bilateral) N	,965** ,000 149					
VolT	Correlación de Pearson Sig. (bilateral) N	,695** ,000 142	,710** ,000 155				
Qmax	Correlación de Pearson Sig. (bilateral) N	,883** ,000 104	,826** ,000 114	,919** ,000 112			
Qfin	Correlación de Pearson Sig. (bilateral) N	,703** ,000 102	,728** ,000 112	,936** ,000 112	,861** ,000 112		
Vmed	Correlación de Pearson Sig. (bilateral) N	,347** ,000 102	,288** ,002 112	,639** ,000 112	,440** ,000 112	,543** ,000 112	
Vfin	Correlación de Pearson Sig. (bilateral) N	,051 ,609 102	-,029 ,761 112	,253** ,007 112	,189* ,046 112	,400** ,000 112	,602** ,000 112

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 58.- Ejecución del ensayo: tabla de correlaciones entre parámetros

Como se puede ver, efectivamente existen algunas correlaciones interesantes, destacando la relación entre el orificio de salida y el caudal máximo o el volumen total, si bien hay que tener en cuenta que estos dos parámetros dependen a su vez de la permeabilidad del filtro.

Sin embargo, puesto que el criterio de ÉXITO en el ensayo NEF es muy exigente, (erosión nula), pero cabe la posibilidad de que habiéndose producido una gran erosión el orificio de la pastilla de suelo base quede taponado al final del ensayo, es preciso comprobar la relación entre el orificio de salida y el volumen total, no buscando una ley cuantitativa, sino permitiendo detectar esas posibles anomalías.

Realizado el estudio de regresión lineal siguiendo el mismo proceso que en los casos anteriores, se han detectado como datos anómalos los ensayos NEF-80, 118, 288 y 390, tal y como se muestra en la siguiente tabla²²:

²² Se recuerda que en todas las tablas, el número de caso – n - corresponde al ensayo NEF – n-1 -

Diagnósticos por caso^a

Número de caso	Residuo tip.	VoIT	Valor pronosticado	Residual
81	-4,486	89760,00	164518,8502	-74758,9
119	3,076	77848,00	26590,9608	51257,04
289	8,405	179180,0	39129,8599	140050,1
391	4,011	85060,00	18231,6948	66828,31

a. Variable dependiente: VoIT

Tabla 59.- Ejecución del ensayo: Estudio de datos anómalos

En todos los casos se observa que la erosión ha sido significativa dado el elevado volumen recogido, por lo que todos se corresponden lógicamente con ensayos calificados como FRACASO y por lo tanto las desviaciones encontradas no tienen una repercusión apreciable en los resultados.

Efectivamente, en el siguiente gráfico se puede apreciar que la consideración ÉXITO / FRACASO / INTERMEDIO realizada al finalizar un ensayo NEF, es muy consistente y repetitiva:

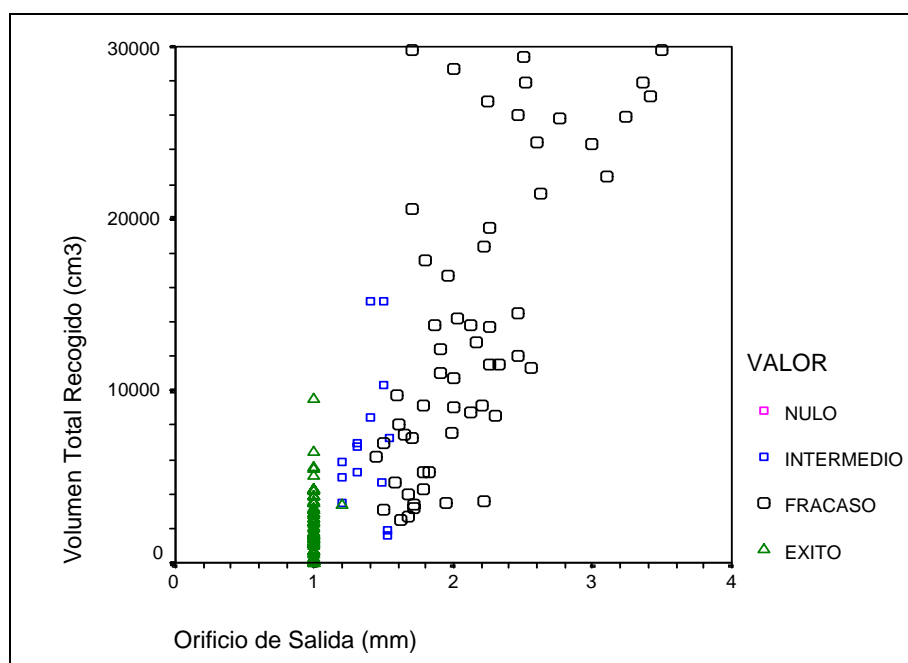


Gráfico 45.- Criterio de Éxito/Fracaso según el orificio de salida y el volumen total

También se ha estudiado, gracias a los datos de turbidez por nefelometría, la relación existente entre el diámetro final del orificio practicado en la pastilla de suelo base y el residuo seco total contenido en el agua de salida, el cual se ha calculado a partir de la concentración del agua de salida y el volumen parcial de cada intervalo de medida.

En el siguiente gráfico se han representado estos dos parámetros:

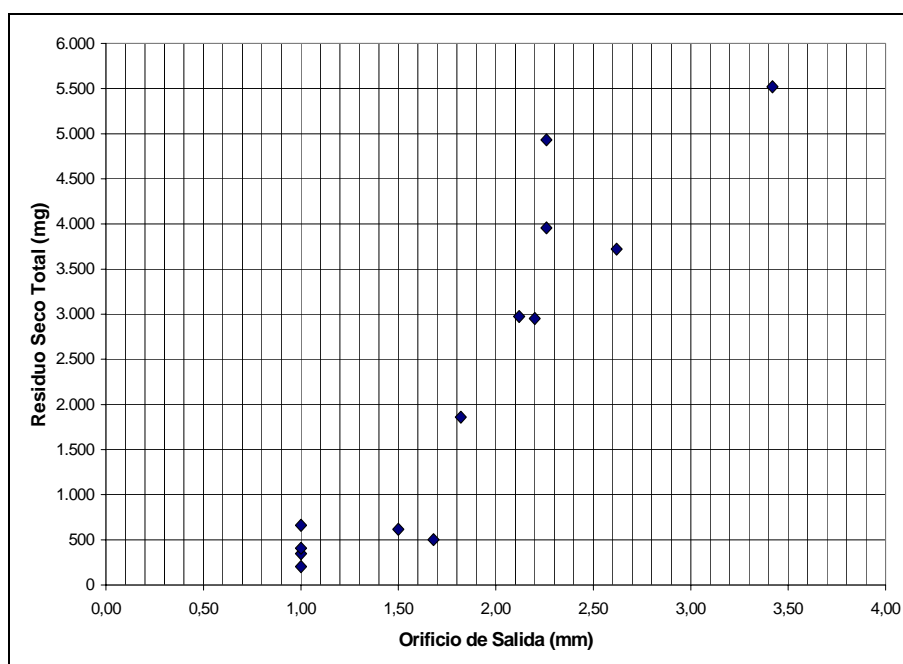


Gráfico 46.- Ejecución del ensayo: relación entre el orificio de salida y el residuo seco total

Como es lógico, al principio hay un tramo vertical, correspondiente a los ensayos con erosión prácticamente nula, pero luego hay una relación lineal.

Por lo tanto se puede concluir que los parámetros medidos durante la realización de los ensayos NEF y al final de éste, son suficientes para poder calificar el resultado de un ensayo como de ÉXITO o FRACASO, pero que es necesario estudiarlos de forma conjunta porque siempre hay casos intermedios de difícil interpretación.

8.4.5 Selección del “Filtro Límite” por el método “Determinista”

Una vez realizado el estudio estadístico de los parámetros medidos en la preparación y la ejecución de los ensayos NEF que ha permitido detectar relaciones entre parámetros y datos anómalos, se debe proceder a elegir para cada muestra de suelo base el denominado “Filtro Límite”.

En general este filtro se corresponde con el filtro más grueso que no da lugar a FRACASO, es decir: con una determinada muestra de suelo base se ensaya un filtro definido por su D_{15F} , si el filtro fracasa, se ensaya un filtro con D_{15F} inferior y así sucesivamente hasta que un cierto D_{15F} señala la frontera entre el ÉXITO y el FRACASO. A ese filtro de frontera, se le denomina “filtro límite”, (D_{15FL}).

Hay que tener especial cuidado en quedar siempre del lado de la seguridad, ya que es posible que tras una serie de ensayos con D_{15F} decrecientes que han dado lugar a fracasos, aparezca a continuación un D_{15F} menor que de lugar a éxito, sin embargo, si se sigue experimentando filtros de D_{15F} inferiores, es posible que aparezcan nuevos fracasos.

Este aparente comportamiento ilógico tiene una sencilla explicación: un filtro inadecuado puede funcionar circunstancialmente debido a un posible bloqueo accidental de partículas, pero un filtro adecuado no puede nunca presentar un comportamiento considerado como fracaso, salvo claro está, que ese ensayo se pueda considerar anómalo y por tanto se deba anular.

Por lo tanto la elección del “Filtro Límite” es muy compleja y hay que atender no sólo al resultado particular de un ensayo, sino a toda la secuencia.

A continuación se expone detalladamente el proceso de elección para cada una de las bases ensayadas.

En primer lugar se presenta una tabla con los resultados de los ensayos realizados, y a continuación un gráfico que relaciona el D_{15F} con el diámetro del orificio de salida y el volumen total recogido. Finalmente se explica la elección realizada.

8.4.5.1 Base BBA-C1

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
17/03/98	NEF-357	0,30	FP-10/0,3	BBA-C1	ESTAND			NULO
19/03/98	NEF-359	0,30	FP-10/0,3	BBA-C1	ESTAND	1,00	1375	EXITO
17/03/98	NEF-356	0,40	FP-10/0,4	BBA-C1	ESTAND	1,00	2775	EXITO
16/03/98	NEF-355	0,50	FP-10/0,5	BBA-C1	ESTAND	1,70	29780	FRACASO
16/03/98	NEF-354	0,60	FP-10/0,6	BBA-C1	ESTAND	2,00	31160	FRACASO

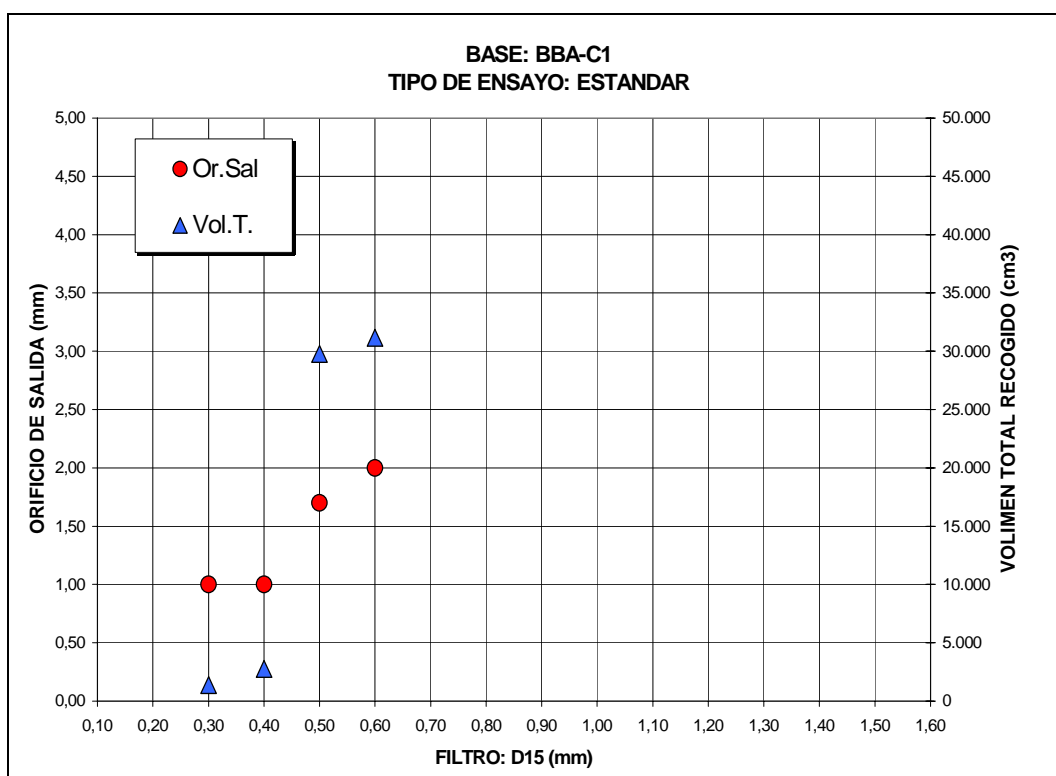


Gráfico 47.- Ensayos NEF Estándar: Base BBA-C1

OBSERVACIONES:

Se puede decir que esta muestra de suelo base ha dado unos resultados en el ensayo NEF muy coherentes, de forma que con D_{15F} de 0.3 y 0.4 mm, el orificio de salida permanece intacto y el volumen total de agua recogida es muy reducido, sin embargo, para D_{15F} 0.5 y 0.6 mm, la erosión es significativa al igual que el aumento de la salida de agua.

Queda claro por tanto que se el “Filtro Límite” corresponde al $D_{15FL}=0.4$ mm.

8.4.5.2 Base BCA-C1

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
10/12/96	NEF-56	0,20	FP-10/0,2	BCA-C1	ESTAND	1,52	1840	INTERMEDIO
05/12/96	NEF-54	0,30	FP-10/0,3	BCA-C1	ESTAND	2,76	25840	FRACASO
27/11/96	NEF-45	0,40	FP-10/0,4	BCA-C1	ESTAND			NULO
04/12/96	NEF-52	0,40	FP-10/0,4	BCA-C1	ESTAND			NULO
04/12/96	NEF-53	0,40	FP-10/0,4	BCA-C1	ESTAND	2,16	12820	FRACASO

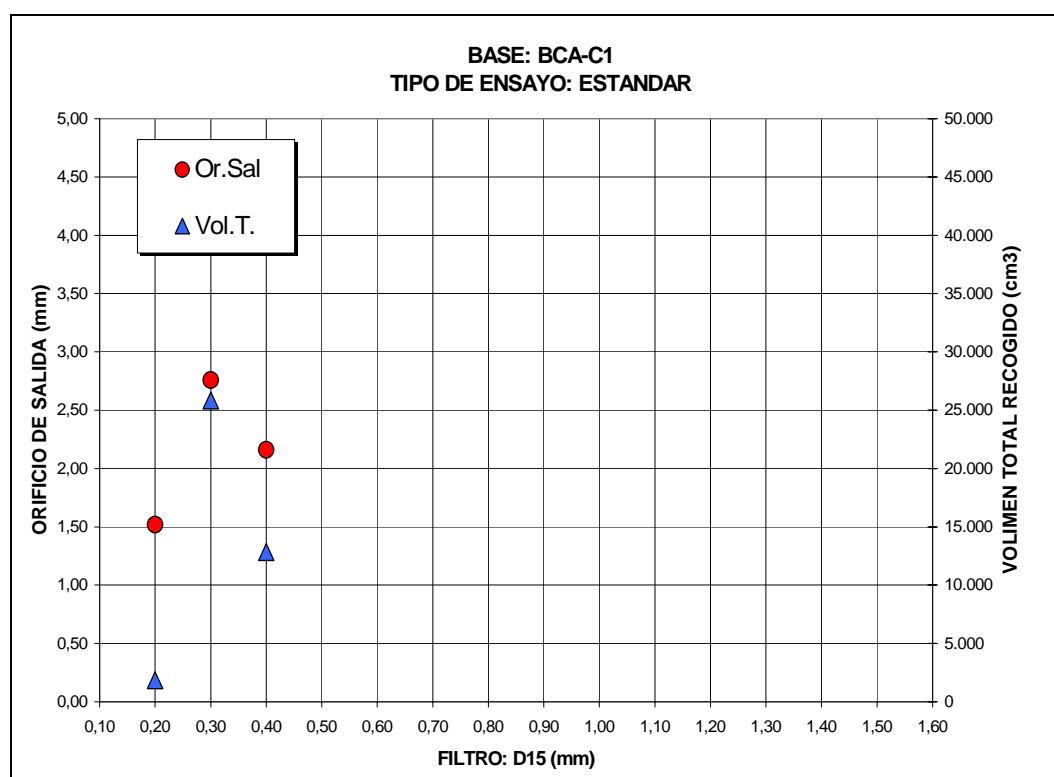


Gráfico 48.- Ensayos NEF Estándar: Base BCA-C1

OBSERVACIONES:

El resultado de esta serie de ensayos también puede considerarse coherente, siendo el $D_{15FL}=0.2$ mm, ya que para 0.3 mm, el orificio aumenta considerablemente. Como se puede ver, para $D_{15F} = 0.4$ mm el orificio de salida y el volumen recogido es menor que para 0.3mm, pero esto no se puede considerar como “anómalo” ya que siempre es posible encontrar un resultado de los ensayos NEF de este tipo debido ha posibles taponamientos accidentales.

8.4.5.3 Base BCA-C2

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
17/12/96	NEF-63	0,20	FP-10/0,2	BCA-C2	ESTAND	1,00	2860	EXITO
30/10/97	NEF-282	0,30	FP-10/0,3	BCA-C2	ESTAND	1,00	2320	EXITO
17/11/97	NEF-295	0,30	FP-10/0,3	BCA-C2	ESTAND	1,00	1120	EXITO
16/12/96	NEF-62	0,30	FP-10/0,3	BCA-C2	ESTAND	2,46	12040	FRACASO
17/11/97	NEF-296	0,40	FP-10/0,4	BCA-C2	ESTAND	1,00	1570	EXITO
18/11/97	NEF-298	0,40	FP-10/0,4	BCA-C2	ESTAND	1,30	6710	INTERMEDIO
05/02/97	NEF-85	0,40	FP-10/0,4	BCA-C2	ESTAND	1,00	5020	EXITO
18/11/97	NEF-297	0,50	FP-10/0,5	BCA-C2	ESTAND	2,50	33570	FRACASO
04/02/97	NEF-83	0,50	FP-10/0,5	BCA-C2	ESTAND	1,40	15240	INTERMEDIO
04/02/97	NEF-84	0,50	FP-10/0,5	BCA-C2	ESTAND	1,00	9540	EXITO
03/02/97	NEF-82	0,70	FP-10/0,7	BCA-C2	ESTAND	1,59	9720	FRACASO
03/02/97	NEF-81	0,80	FP-10/0,8	BCA-C2	ESTAND	1,64	7410	FRACASO
17/12/96	NEF-64		FP-NAT-I	BCA-C2	ESTAND	2,00	2560	FRACASO

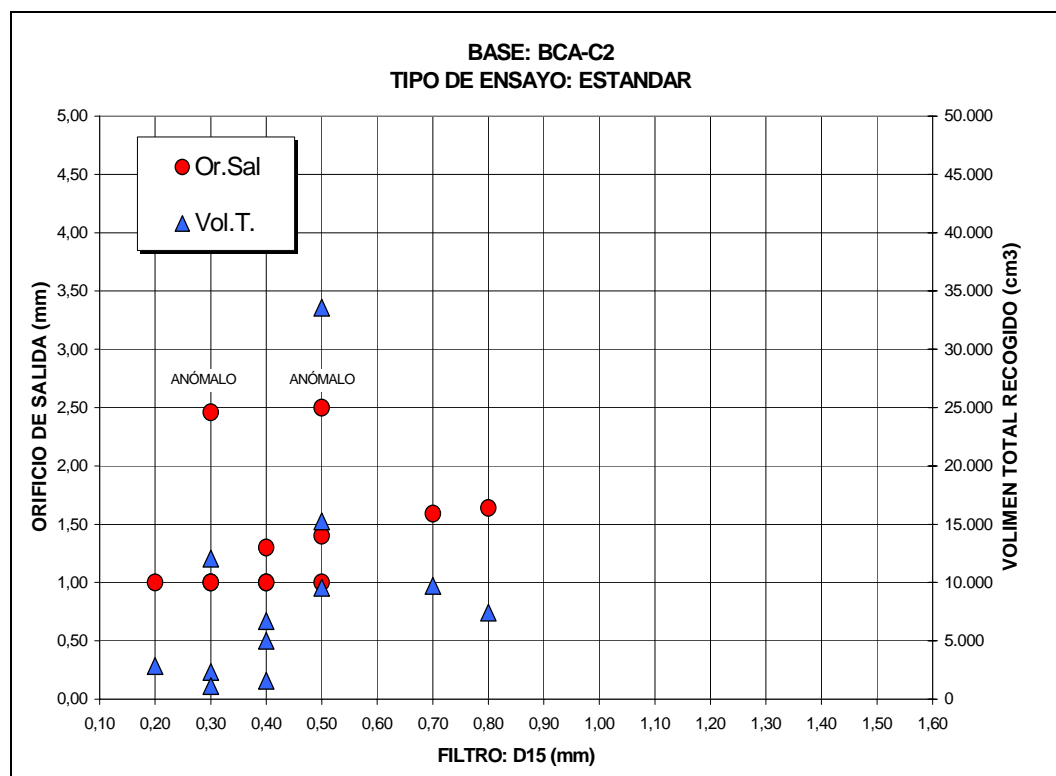


Gráfico 49.- Ensayos NEF Estándar: Base BCA-C2

OBSERVACIONES:

En este caso se observa perfectamente una secuencia lógica salvo dos datos claramente anómalos, (NEF-62 y NEF-297). Como se puede ver en el gráfico, ambos ensayos han sido repetidos obteniéndose resultados más razonables según la tendencia seguida por el conjunto de ensayos. Parece razonable no tomar en consideración los dos resultados anómalos con lo que se tiene que el D_{15FL} corresponde al 0.4 mm, aunque hay que observar que se encuentra muy cercano del 0.5mm.

Es muy importante resaltar este comportamiento ya que cuando se emplea el método “determinista” aparecerán frecuentemente situaciones como esta en las que es necesario “juzgar” los resultados, en cambio, un método “probabilista” no es fácil que realice este tipo de juicios.

8.4.5.4 Base BFA-C1

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
22/04/97	NEF-164	1,40	FP-10/1,4	BFA-C1	ESTAND	1,00	3520	EXITO
22/04/97	NEF-163	1,50	FP-10/1,5	BFA-C1	ESTAND	1,78	9090	FRACASO
21/11/96	NEF-38	1,60	FP-10/1,6	BFA-C1	ESTAND	3,36	27880	FRACASO
20/11/96	NEF-36	1,70	FP-10/1,7	BFA-C1	ESTAND	2,46	26030	FRACASO
31/10/96	NEF-16	1,50	FP-20/1,5	BFA-C1	ESTAND	1,00	3840	EXITO
04/11/96	NEF-17	1,60	FP-20/1,6	BFA-C1	ESTAND	1,00	1345	EXITO
05/11/96	NEF-19	1,80	FP-20/1,8	BFA-C1	ESTAND			NULO
11/11/96	NEF-26	1,80	FP-20/1,8	BFA-C1	ESTAND	2,26	11570	FRACASO
04/11/96	NEF-18	1,90	FP-20/1,9	BFA-C1	ESTAND	2,20	9100	FRACASO

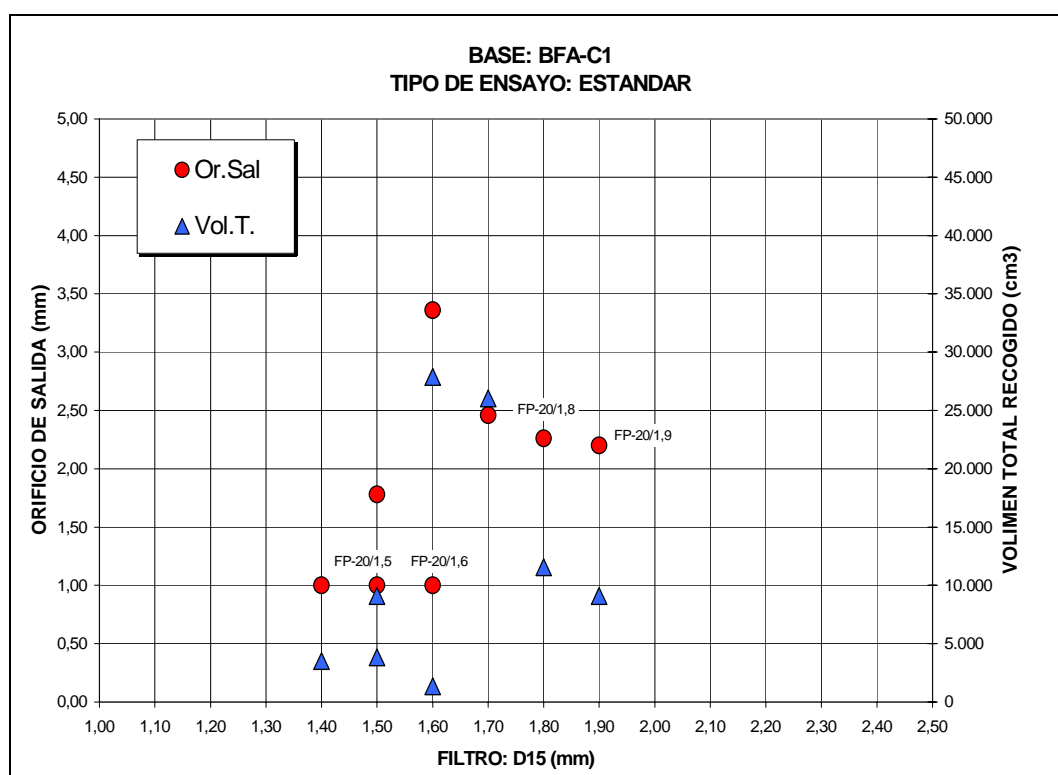


Gráfico 50.- Ensayos NEF Estándar: Base BFA-C1

OBSERVACIONES:

Con la base BFA-C1 se han realizado ensayos con D_{100F} de 10 y 20 mm respectivamente. En el caso de $D_{100F} = 10$ mm se observa un comportamiento coherente, siendo el $D_{15FL} = 1.4$ mm, teniendo en cuenta que en todos estos ensayos

se ha empleado arena como material lateral, sin embargo, en el caso de $D_{100F}=20\text{mm}$, el filtro límite corresponde con el $D_{15F}=1.6\text{mm}$, aunque hay que señalar que queda muy cercano al 1.7mm.

Este resultado es muy interesante puesto que significaría que no sólo interviene el D_{15F} sino también otros factores como la pendiente de la curva granulométrica.

8.4.5.5 Base BFA-C2

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
12/11/97	NEF-292	0,40	FP-10/0,4	BFA-C2	ESTAND	1,00	1470	EXITO
27/11/97	NEF-309	0,40	FP-10/0,4	BFA-C2	ESTAND	1,00	1740	EXITO
12/11/97	NEF-291	0,50	FP-10/0,5	BFA-C2	ESTAND	1,20	5910	INTERMEDIO
27/11/97	NEF-310	0,50	FP-10/0,5	BFA-C2	ESTAND	1,30	6940	INTERMEDIO
17/12/97	NEF-329	0,60	FP-10/0,6	BFA-C2	ESTAND	1,00	70	EXITO
17/12/97	NEF-330	0,60	FP-10/0,6	BFA-C2	ESTAND	1,00	3200	EXITO
11/11/97	NEF-290	0,70	FP-10/0,7	BFA-C2	ESTAND	1,70	20530	FRACASO
27/04/98	NEF-394	0,70	FP-10/0,7	BFA-C2	ESTAND	1,00	2370	EXITO
21/04/98	NEF-389	0,80	FP-10/0,8	BFA-C2	ESTAND	1,00	3900	EXITO
22/04/98	NEF-390	0,90	FP-10/0,9	BFA-C2	ESTAND	2,50	85060	FRACASO
11/11/97	NEF-289	1,00	FP-10/1,0	BFA-C2	ESTAND	3,50	54600	FRACASO
26/11/97	NEF-308	1,00	FP-10/1,0	BFA-C2	ESTAND	1,00	4220	EXITO
25/11/97	NEF-306	1,10	FP-10/1,1	BFA-C2	ESTAND	1,00	3920	EXITO
26/11/97	NEF-307	1,10	FP-10/1,1	BFA-C2	ESTAND	1,50	10300	INTERMEDIO
25/11/97	NEF-305	1,20	FP-10/1,2	BFA-C2	ESTAND	1,20	4980	INTERMEDIO
18/12/97	NEF-331	1,20	FP-10/1,2	BFA-C2	ESTAND	2,25	26780	FRACASO
18/12/97	NEF-332	1,20	FP-10/1,2	BFA-C2	ESTAND	1,00	1620	EXITO
15/04/97	NEF-156	1,40	FP-10/1,4	BFA-C2	ESTAND	1,00	4270	EXITO
10/11/97	NEF-288	1,40	FP-10/1,4	BFA-C2	ESTAND	5,00	179180	FRACASO
24/11/97	NEF-304	1,40	FP-10/1,4	BFA-C2	ESTAND	2,00	28750	FRACASO
15/04/97	NEF-155	1,50	FP-10/1,5	BFA-C2	ESTAND	1,80	17630	FRACASO
10/04/97	NEF-152	1,60	FP-10/1,6	BFA-C2	ESTAND	1,00	270	NULO
14/04/97	NEF-154	1,60	FP-10/1,6	BFA-C2	ESTAND	2,30	8580	FRACASO
10/04/97	NEF-153	1,70	FP-10/1,7	BFA-C2	ESTAND	7,20	90310	FRACASO

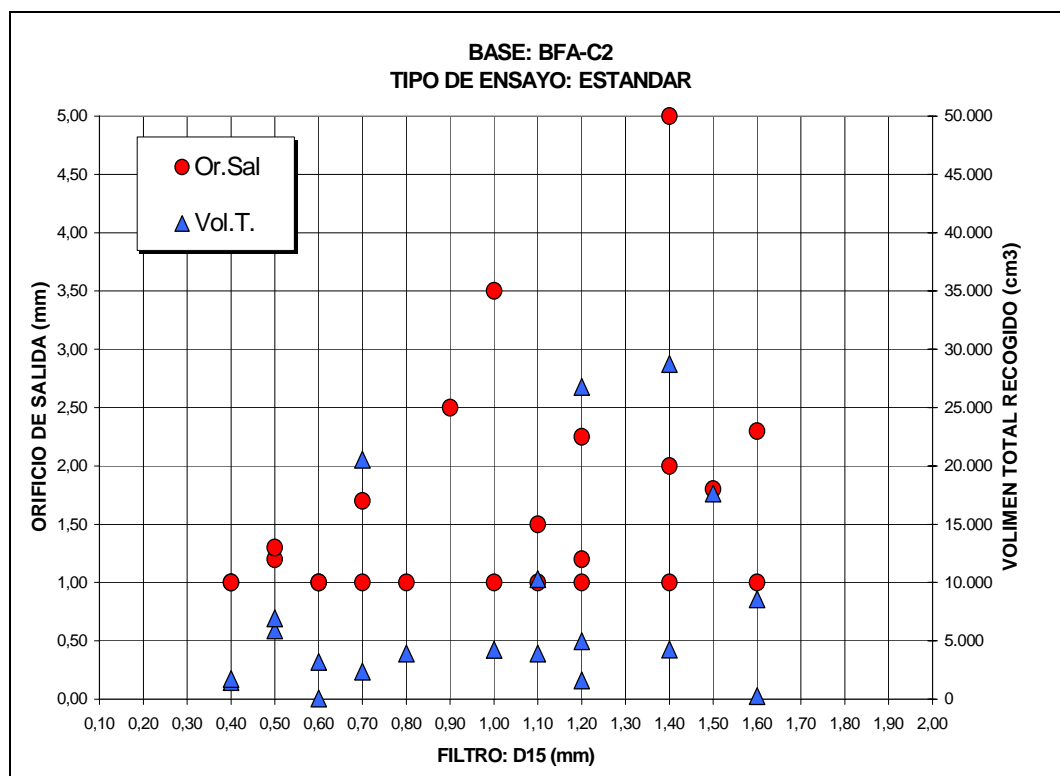


Gráfico 51.- Ensayos NEF Estándar: Base BFA-C2

OBSERVACIONES:

Como se puede ver en el gráfico y en la tabla de resultados, con la base BFA-C2 se ha realizado un número muy alto de ensayos, algunos con arena como material lateral y otros con plastilina. Como se puede ver en el gráfico, no hay una sucesión lógica, ya que para un mismo D_{15F} se presentan algunos ensayos sin erosión, calificados como éxito y otros que corresponden a fracaso.

Parece claro que hay que discriminar necesariamente el efecto del material lateral.

BFA-C2.- MATERIAL LATERAL DE ARENA:

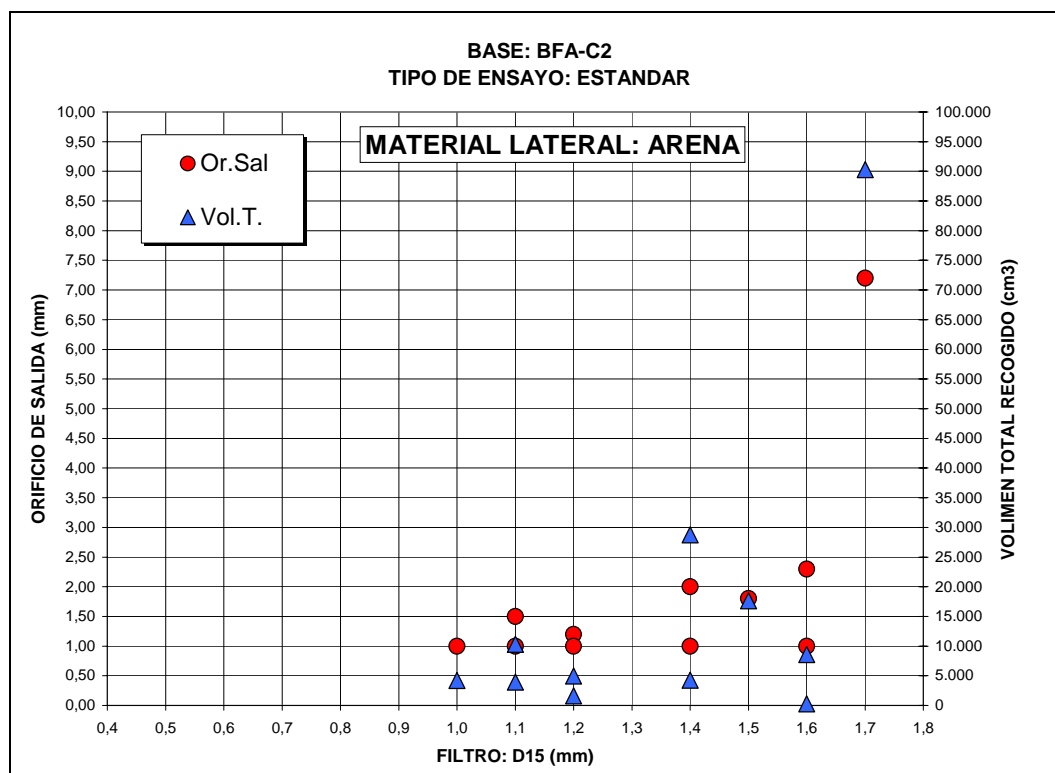


Gráfico 52.- Ensayos NEF Estándar: Base BFA-C2 con material lateral de arena

En este caso parece claro que el filtro límite corresponde al FP-10/1.2, ya que el filtro FP-10/1.4 ha funcionado una vez, pero la otra ha fracasado.

BFA-C2.- MATERIAL LATERAL DE PLASTILINA:

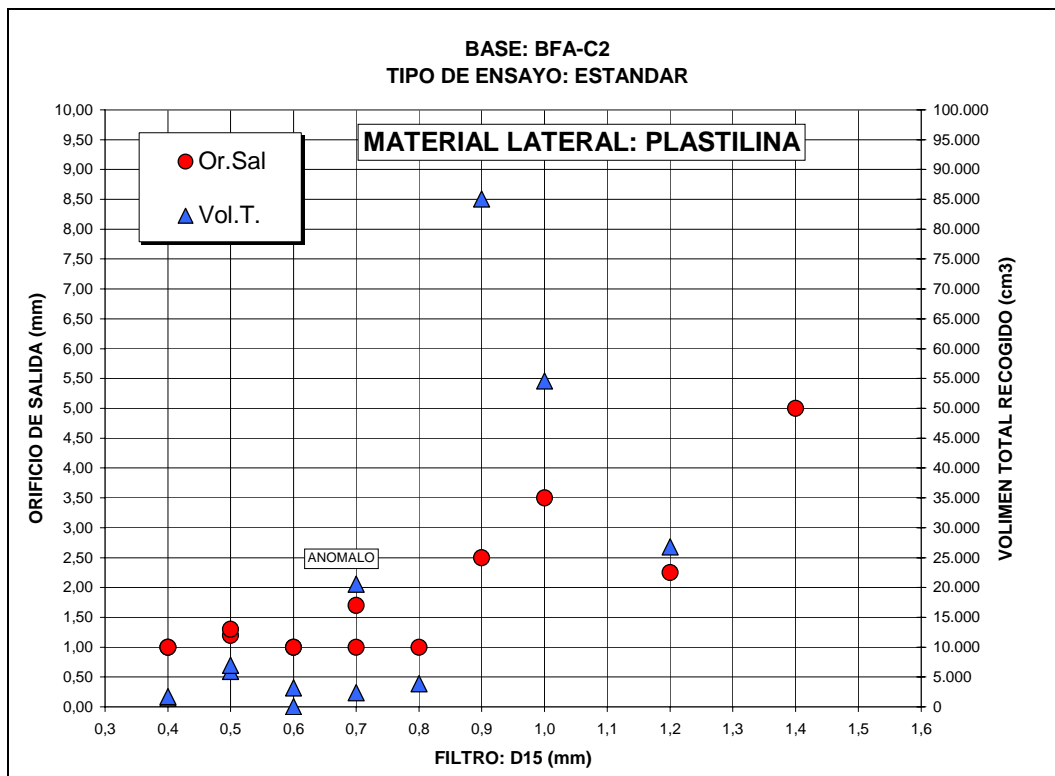


Gráfico 53.- Ensayos NEF Estándar: Base BFA-C2 con material lateral de plastilina

Al emplear plastilina como material lateral la tendencia es diferente, de forma que ahora el filtro límite corresponde al FP-10/0.8, si bien hay que observar que el filtro FP-10/0.7 se ha ensayado dos veces ya que la primera vez dio un resultado anómalo.

BFA-C2.- CONCLUSIONES:

Como se ha podido observar en los gráficos, con esta muestra los resultados obtenidos no son sencillos de interpretar, ya que por un lado se aprecia considerablemente el efecto del material lateral, ($D_{15FL} = 0.8\text{mm}$ con plastilina y $D_{15FL} = 1.2\text{mm}$ con arena), pero incluso el resto de los ensayos dan resultados a veces extraños.

Una posible explicación a este comportamiento puede ser que la base BFA-C2, al tener sólo un 67.98% menor que el tamiz 0.08 mm, pueda requerir una probeta de ensayo mayor que la utilizada. En cualquier caso, al margen del efecto del material lateral, cuya influencia supondría una conclusión muy interesante, el resto de los ensayos siguen una secuencia razonable.

En cualquier caso es preciso realizar un estudio estadístico que contenga el resto de los resultados para poder decidir cual de los dos es correcto, o si lo son los dos y efectivamente el material lateral tiene una influencia tan significativa.

8.4.5.6 *Base BJV-C1*

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
18/12/96	NEF-66	0,60	FP-10/0,6	BJV-C1	ESTAND	1,00	20	EXITO
21/01/97	NEF-68	0,90	FP-10/0,9	BJV-C1	ESTAND	1,00		NULO
21/01/97	NEF-69	0,90	FP-10/0,9	BJV-C1	ESTAND	1,00		EXITO
19/12/96	NEF-67	1,00	FP-10/1,0	BJV-C1	ESTAND	1,00	2060	EXITO
22/01/97	NEF-70	1,00	FP-10/1,0	BJV-C1	ESTAND	1,00		EXITO
22/01/97	NEF-71	1,10	FP-10/1,1	BJV-C1	ESTAND	1,00		NULO
23/01/97	NEF-72	1,30	FP-10/1,3	BJV-C1	ESTAND	1,00		EXITO
10/02/97	NEF-88	1,30	FP-10/1,3	BJV-C1	ESTAND	1,00	1630	EXITO
11/02/97	NEF-91	1,40	FP-10/1,4	BJV-C1	ESTAND	1,58	4620	FRACASO
06/02/97	NEF-87	1,50	FP-10/1,5	BJV-C1	ESTAND	2,56	11285	FRACASO
06/02/97	NEF-86	1,80	FP-10/1,8	BJV-C1	ESTAND			NULO
23/01/97	NEF-73	2,00	FP-10/2,0	BJV-C1	ESTAND			NULO
30/01/97	NEF-80	2,00	FP-10/2,0	BJV-C1	ESTAND	20,00	89760	FRACASO
27/01/97	NEF-75	2,30	FP-10/2,3	BJV-C1	ESTAND			NULO
28/01/97	NEF-76	2,40	FP-10/2,4	BJV-C1	ESTAND			NULO
28/01/97	NEF-77	2,40	FP-10/2,4	BJV-C1	ESTAND			NULO
30/01/97	NEF-79	2,40	FP-10/2,4	BJV-C1	ESTAND	15,22		FRACASO
27/01/97	NEF-74	2,50	FP-10/2,5	BJV-C1	ESTAND	4,72	30530	FRACASO
29/01/97	NEF-78	2,50	FP-10/2,5	BJV-C1	ESTAND	20,32		FRACASO

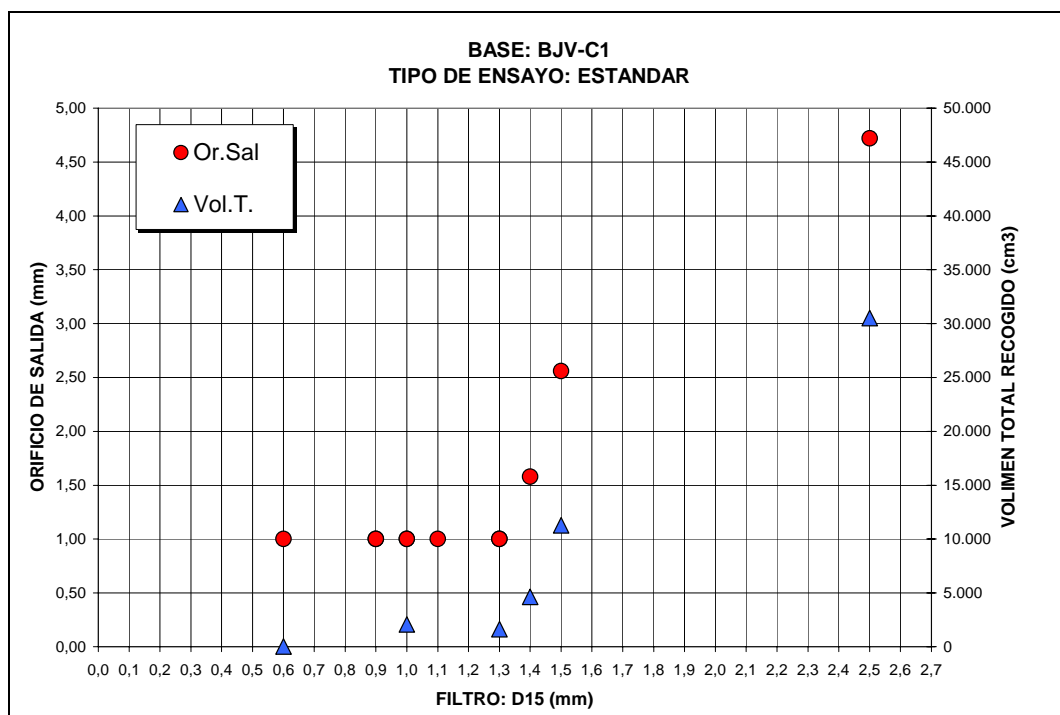


Gráfico 54.- Ensayos NEF Estándar: Base BJV-C1

OBSERVACIONES:

En el caso de la base BJV-C1, todos los ensayos realizados siguen una secuencia coherente, de forma que para todos los D_{15F} inferiores a 1.3mm el orificio de salida permanece inalterado mientras que a partir de este diámetro, se observa un claro aumento de la erosión. Por lo tanto, en este caso el $D_{15FL} = 1.3\text{mm}$.

8.4.5.7 Base BJV-C2

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
25/02/97	NEF-107	0,40	FP-10/0,4	BJV-C2	ESTAND	1,00	40	EXITO
19/11/97	NEF-300	0,40	FP-10/0,4	BJV-C2	ESTAND	1,00	670	EXITO
19/11/97	NEF-299	0,50	FP-10/0,5	BJV-C2	ESTAND	1,00	4320	EXITO
05/02/98	NEF-353	0,50	FP-10/0,5	BJV-C2	ESTAND	1,50	6980	FRACASO
12/02/97	NEF-93	0,50	FP-10/0,5	BJV-C2	ESTAND	1,00	50	EXITO
25/02/97	NEF-106	0,60	FP-10/0,6	BJV-C2	ESTAND	1,78	5270	FRACASO
03/02/98	NEF-349	0,60	FP-10/0,6	BJV-C2	ESTAND	1,00	70	NULO
04/02/98	NEF-351	0,60	FP-10/0,6	BJV-C2	ESTAND	3,50	29810	FRACASO
05/02/98	NEF-352	0,60	FP-10/0,6	BJV-C2	ESTAND	1,00	1310	EXITO
11/02/97	NEF-90	0,60	FP-10/0,6	BJV-C2	ESTAND	1,00	2510	INTERMEDIO
12/02/97	NEF-92	0,70	FP-10/0,7	BJV-C2	ESTAND	1,72	3220	FRACASO
10/02/97	NEF-89	0,80	FP-10/0,8	BJV-C2	ESTAND	1,68	3980	FRACASO

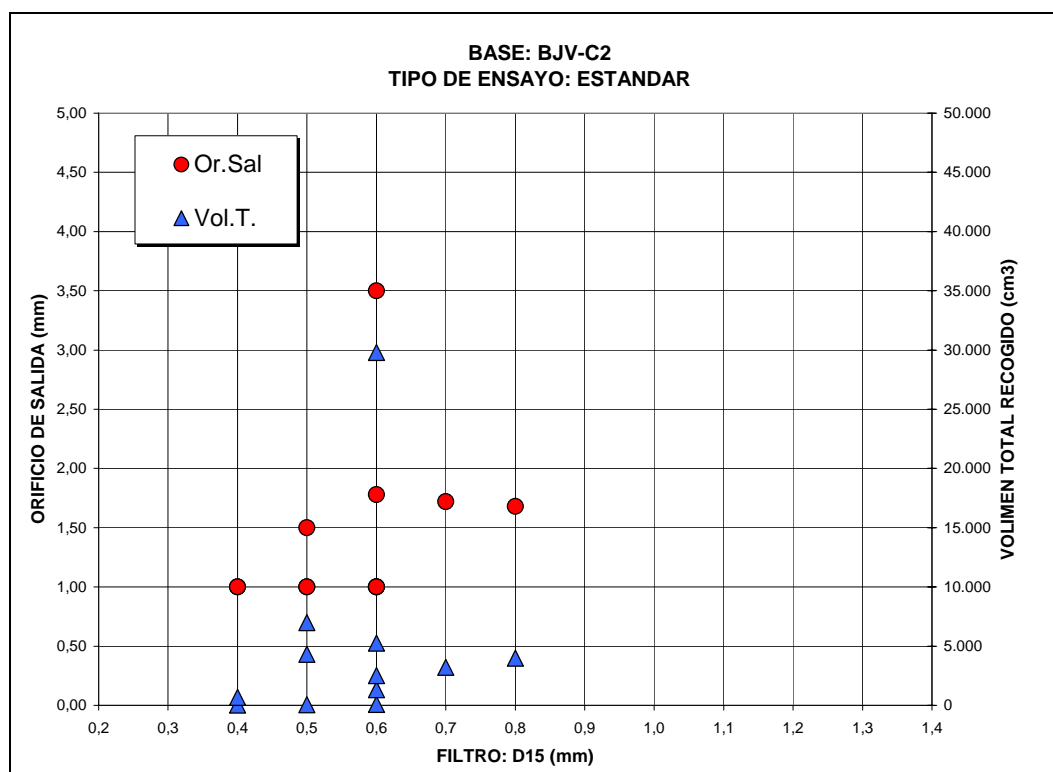


Gráfico 55.- Ensayos NEF Estándar: Base BJV-C2

OBSERVACIONES:

Esta base ha tenido un comportamiento muy irregular, no diferenciándose el efecto del material lateral empleado. De los ensayos se puede concluir, no sin ciertas reservas, que el filtro límite corresponde al FP-10/0.5, aunque puede ser algo superior.

8.4.5.8 Base BJV-C3

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
19/02/97	NEF-100	1,10	FP-10/1,1	BJV-C3	ESTAND	1,00	20	EXITO
17/02/97	NEF-97	1,10	FP-10/1,1	BJV-C3	ESTAND	1,00	100	EXITO
18/02/97	NEF-98	1,20	FP-10/1,2	BJV-C3	ESTAND	1,72	3350	FRACASO
17/02/97	NEF-96	1,30	FP-10/1,3	BJV-C3	ESTAND	1,94	3430	FRACASO

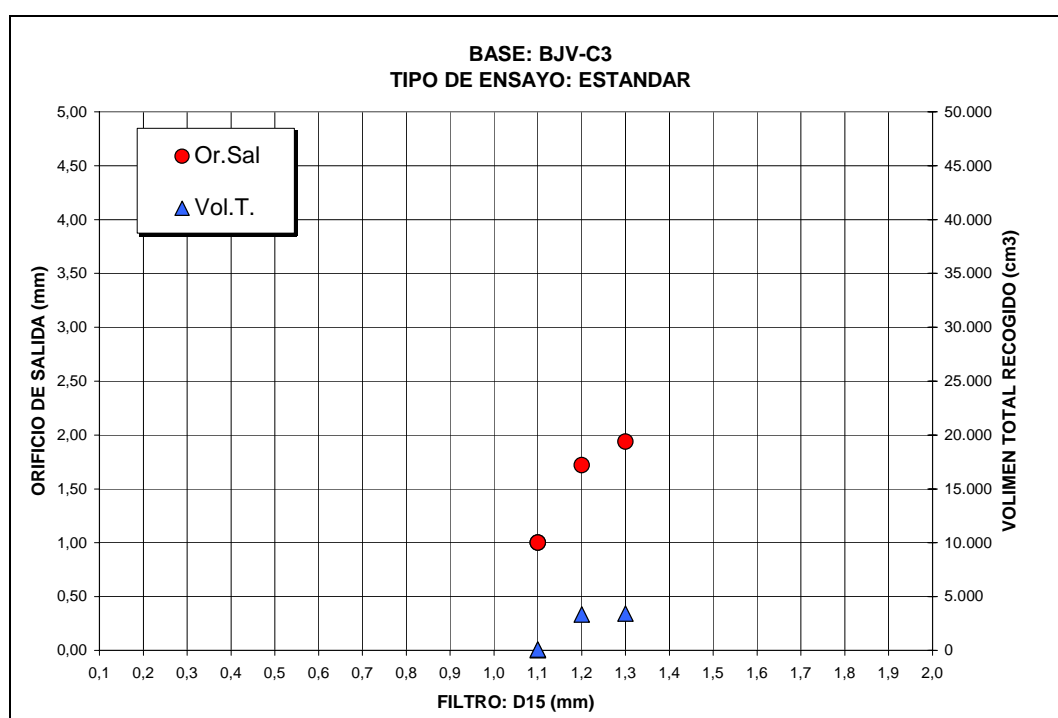


Gráfico 56.- Ensayos NEF Estándar: Base BJV-C3

OBSERVACIONES:

De nuevo aparece en esta serie de ensayos una secuencia totalmente coherente con clara sensibilidad a la variación del D_{15F} , siendo en este caso el $D_{15FL} = 1.1 \text{ mm}$.

8.4.5.9 Base BJV-C4

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
18/02/97	NEF-99	0,60	FP-10/0,6	BJV-C4	ESTAND	1,00	340	EXITO
19/02/97	NEF-101	0,70	FP-10/0,7	BJV-C4	ESTAND			NULO
20/02/97	NEF-102	0,70	FP-10/0,7	BJV-C4	ESTAND	1,00	110	EXITO
24/02/97	NEF-105	0,80	FP-10/0,8	BJV-C4	ESTAND	1,62	2500	FRACASO

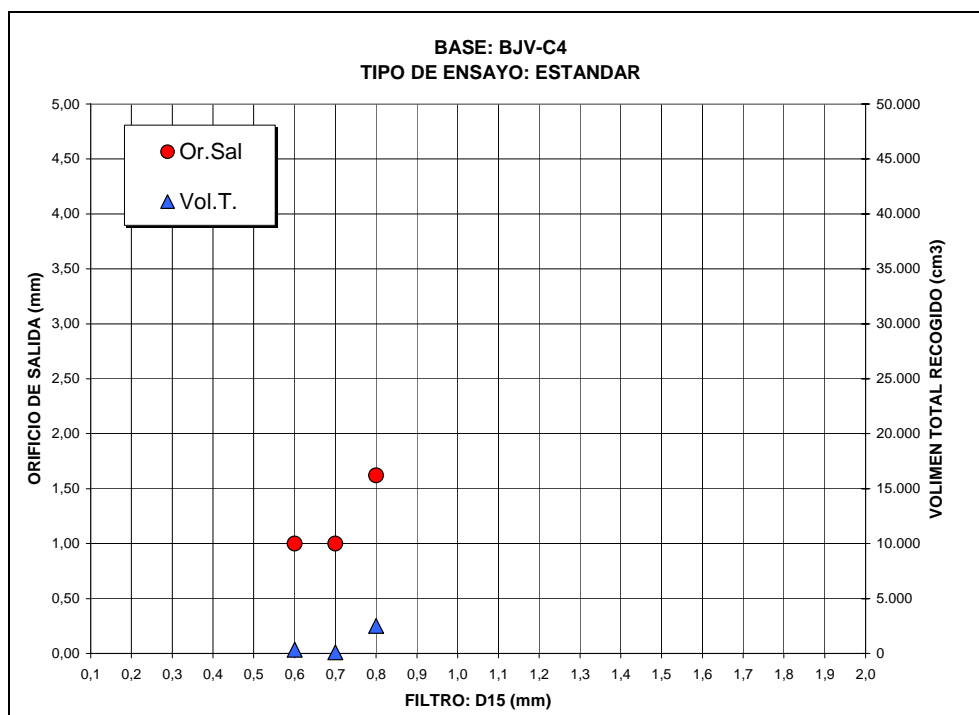


Gráfico 57.- Ensayos NEF Estándar: Base BJV-C4

OBSERVACIONES:

En el gráfico se puede ver que para la base BJV-C4, el filtro FP-10/0.6 y el FP-10/0.7 dan lugar a que el orificio de salida permanezca intacto por lo que se consideran ÉXITO, sin embargo, cuando el $D_{15F}=0.8\text{mm}$, el orificio es de 1.62mm, ligeramente superior, sin embargo, al observar el dato del volumen total, se ve un claro aumento respecto a los valores anteriores, por lo que queda claro que $D_{15FL}=0.7\text{mm}$.

8.4.5.10 *Base BJV-C5*

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
05/03/97	NEF-116	0,50	FP-10/0,5	BJV-C5	ESTAND	1,00	1010	EXITO
06/03/97	NEF-117	0,60	FP-10/0,6	BJV-C5	ESTAND	1,00	3060	EXITO
05/03/97	NEF-115	0,70	FP-10/0,7	BJV-C5	ESTAND	2,00	10760	FRACASO

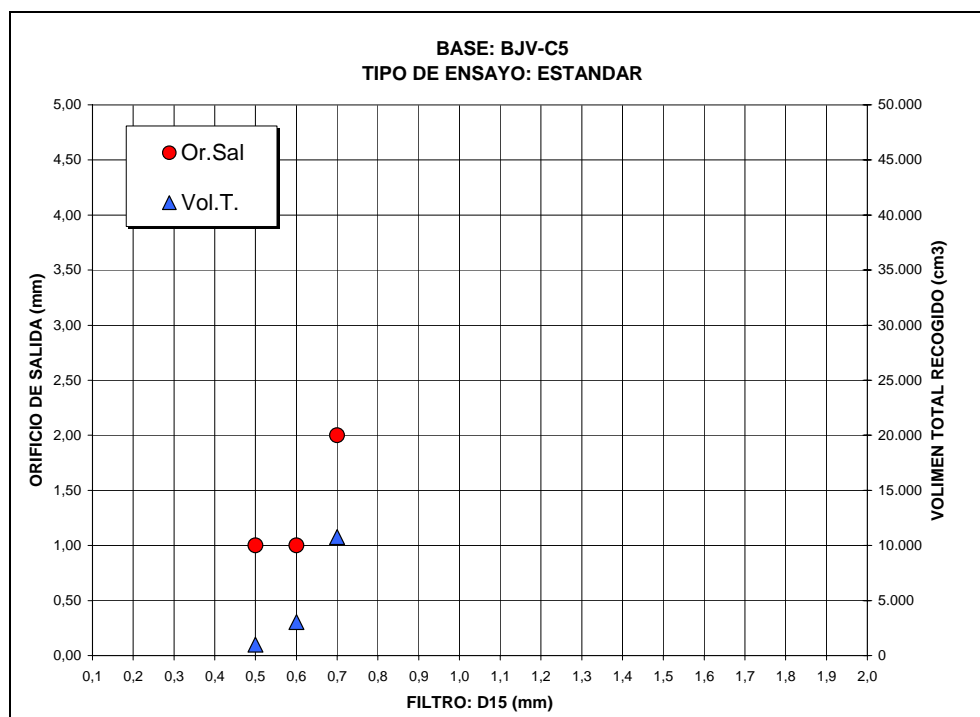


Gráfico 58.- Ensayos NEF Estándar: Base BJV-C5

OBSERVACIONES:

Con la muestra BJV-C5 han sido necesarios sólo tres ensayos para obtener el filtro límite, de forma que el FP-10/0.5 es ÉXITO, el FP-10/0.7 es FRACASO y por ello se tiene que $D_{15FL} = 0.6$ mm.

8.4.5.11 Base BJV-C6

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
13/03/97	NEF-126	0,80	FP-10/0,8	BJV-C6	ESTAND	1,00	5450	EXITO
16/04/97	NEF-158	0,80	FP-10/0,8	BJV-C6	ESTAND	1,00	3460	EXITO
17/03/97	NEF-127	0,90	FP-10/0,9	BJV-C6	ESTAND	2,32	11520	FRACASO
13/03/97	NEF-125	1,00	FP-10/1,0	BJV-C6	ESTAND	2,26	13710	FRACASO

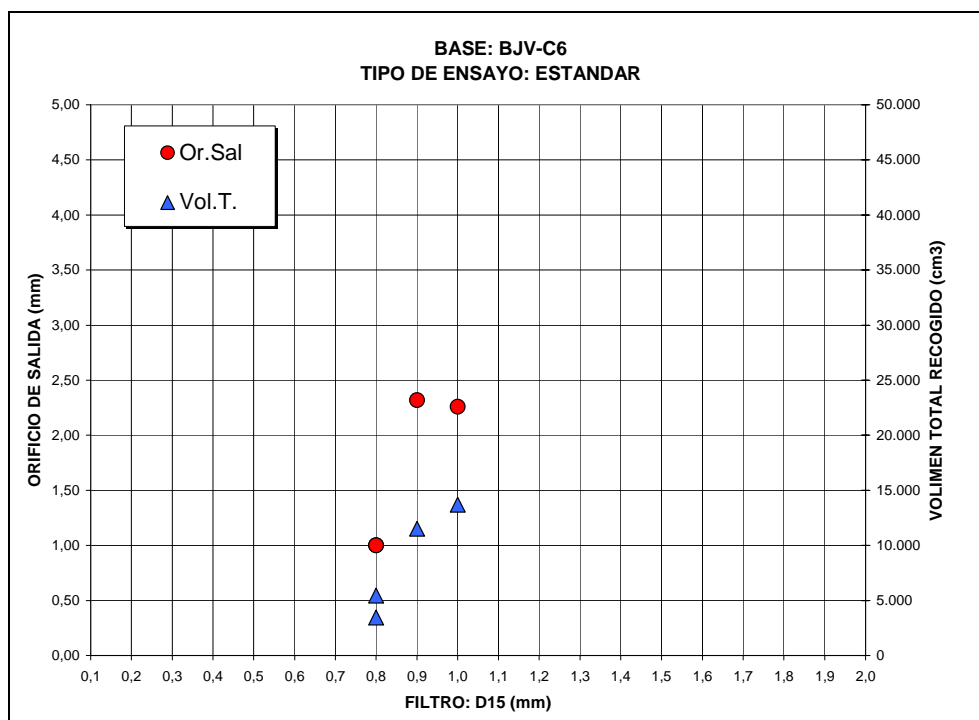


Gráfico 59.- Ensayos NEF Estándar: Base BJV-C6

OBSERVACIONES:

En este caso se han realizado 4 ensayos, obteniéndose ÉXITO para el FP-10/0.8 que se ha ensayado dos veces, para comprobar el resultado, mientras que el FP-10/0.9 y el FP-10/1.0 han dado lugar a FRACASOS. Por ello el $D_{15FL}=0.8\text{mm}$.

8.4.5.12 Base BJV-C7

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
17/03/97	NEF-128	1,30	FP-10/1,3	BJV-C7	ESTAND	1,00	10	EXITO
18/03/97	NEF-130	1,40	FP-10/1,4	BJV-C7	ESTAND	1,00	2560	EXITO
18/03/97	NEF-129	1,50	FP-10/1,5	BJV-C7	ESTAND	2,46	14520	FRACASO
11/03/97	NEF-121	1,70	FP-10/1,7	BJV-C7	ESTAND	2,03	14250	FRACASO
10/03/97	NEF-120	1,90	FP-10/1,9	BJV-C7	ESTAND	6,20	89220	FRACASO
10/03/97	NEF-119	2,20	FP-10/2,2	BJV-C7	ESTAND	5,42	16030	FRACASO
06/03/97	NEF-118	2,50	FP-10/2,5	BJV-C7	ESTAND	3,50	77848	FRACASO

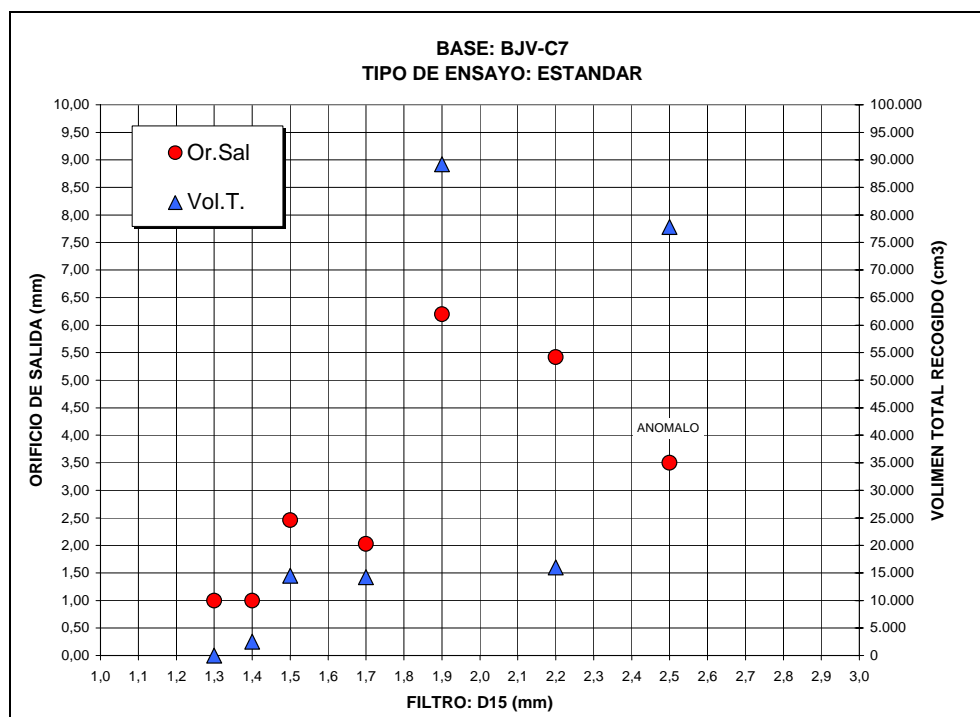


Gráfico 60.- Ensayos NEF Estándar: Base BJV-C7

OBSERVACIONES:

En este caso se han realizado 7 ensayos, con el D_{15F} desde 1.3 a 2.5 mm. Sólo hay un ensayo cuyo resultado puede considerarse anómalo y es el NEF-118, pero si se observa el gráfico se ve que el orificio de salida en este ensayo es menor del esperado según la tendencia de los demás, sin embargo el volumen sí sigue una tendencia lógica.

La razón puede ser que haya habido una pequeña obstrucción final. Precisamente esto justifica que para decidir entre el ÉXITO y el FRACASO se atienda no sólo al orificio, si no al resto de la información disponible.

En cuanto al D_{15FL} , en este caso corresponde a 1.4 mm.

8.4.5.13 Base BP-C2

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
19/11/96	NEF-35	1,00	FP-10/1,0	BP-C2	ESTAND	1,00	460	EXITO
21/04/97	NEF-161	0,80	FP-20/0,8	BP-C2	ESTAND	1,00	170	EXITO
17/04/97	NEF-160	0,90	FP-20/0,9	BP-C2	ESTAND	1,60	8070	FRACASO
05/11/96	NEF-20	1,00	FP-20/1,0	BP-C2	ESTAND			NULO
11/11/96	NEF-25	1,00	FP-20/1,0	BP-C2	ESTAND	1,50	3110	INTERMEDIO
22/10/96	NEF-11	1,20	FP-20/1,2	BP-C2	ESTAND	11,48	117510	FRACASO

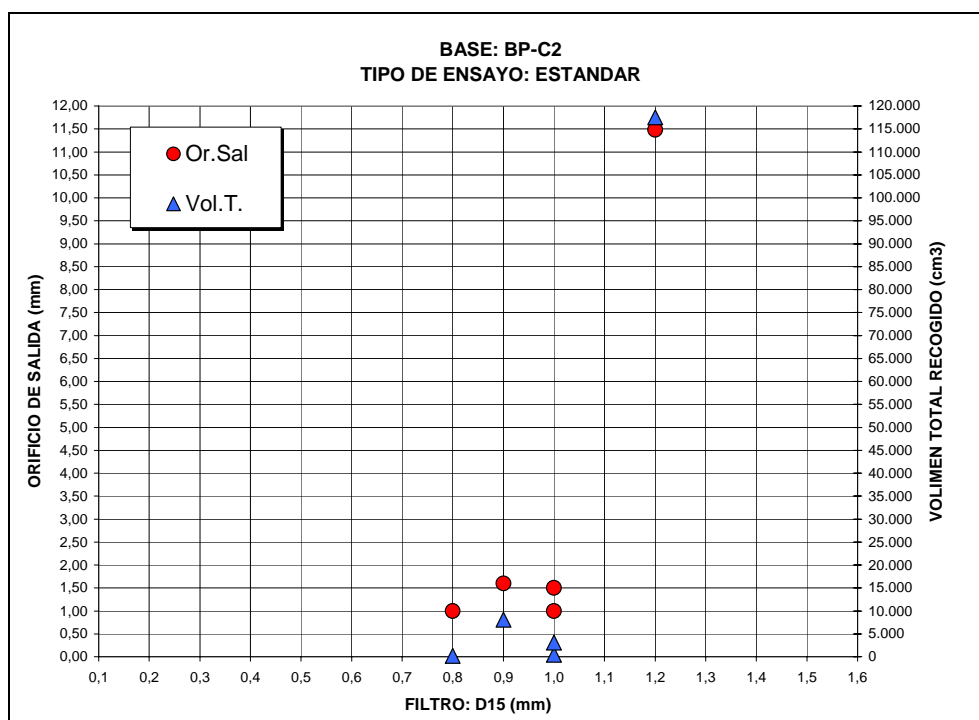


Gráfico 61.- Ensayos NEF Estándar: Base BP-C2

OBSERVACIONES:

Los resultados de los ensayos realizados con la muestra BP-C2 son en cierto punto desconcertantes, ya que los filtros FP-20/0.8 a FP-20/1.0 no han producido un aumento significativo del diámetro del orificio de salida, mientras que el FP-20/1.2 da lugar a una erosión fortísima, con un orificio de 11.48mm y un volumen final de 117.510 cm³. Por esta razón se ha considerado que el D_{15FL} corresponde al FP-20/0.8, aunque muy cercano al FP-20/0.9.

También se ha realizado un ensayo de comprobación con el filtro FP-10/1.0, que ha obtenido un resultado similar al filtro FP-20/1.0, salvo que el volumen total es menor en el caso de $D_{100F} = 10$ mm, sin embargo no es posible sacar una conclusión clara de este resultado.

8.4.5.14 Base BP-C2-0.32

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
25/11/96	NEF-40	0,60	FP-10/0,6	BP-C2-0,32	ESTAND	1,48	4670	INTERMEDIO
21/11/96	NEF-39	0,70	FP-10/0,7	BP-C2-0,32	ESTAND	2,22	3580	FRACASO

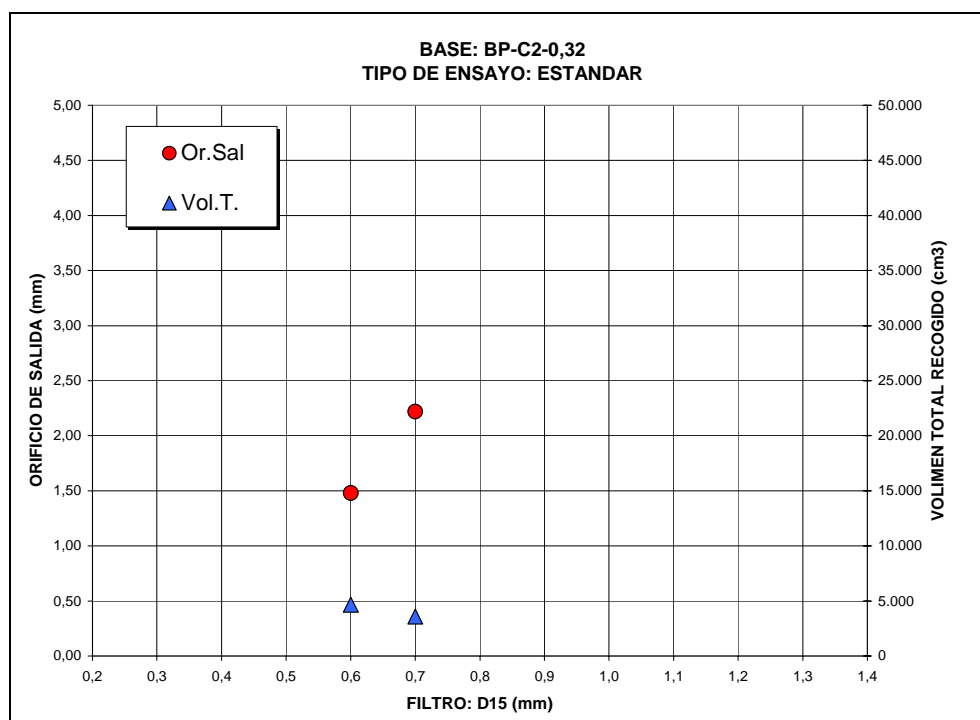


Gráfico 62.- Ensayos NEF Estándar: Base BP-C2-0,32

OBSERVACIONES:

Con la base BP-C2-0.32, que es una variante de la BP-C2, pero tamizada, se han realizado sólo dos ensayos con lo que se puede concluir que el filtro límite es el FP-

10/0.6, pero es razonable mantener ciertas reservas ya que se deberían haber hecho más ensayos.

8.4.5.15 Base BP-C2-0.63

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
19/11/96	NEF-34	0,70	FP-10/0,7	BP-C2-0,63	ESTAND	1,00	1160	EXITO
18/11/96	NEF-33	0,80	FP-10/0,8	BP-C2-0,63	ESTAND	2,12	13790	FRACASO
18/11/96	NEF-32	1,00	FP-10/1,0	BP-C2-0,63	ESTAND	3,42	27150	FRACASO

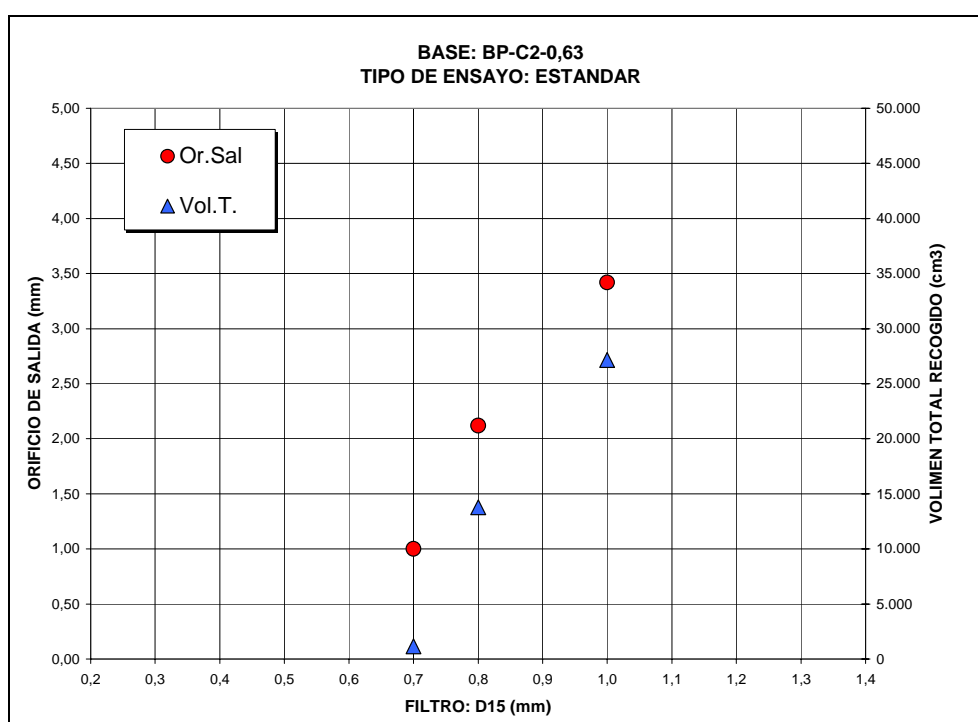


Gráfico 63.- Ensayos NEF Estándar: Base BP-C2-0,63

OBSERVACIONES:

En este caso el comportamiento es bastante claro, ya que el filtro FP-10/0.7 ha mantenido el orificio de salida intacto y con un volumen recogido de sólo 1.160 cm³, mientras que los filtros FP-10/0.8 y FP-10/1.0 han fracasado.

El filtro límite corresponde por lo tanto al FP-10/0.7.

8.4.5.16 Base BP-C2-1,25

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
23/04/97	NEF-165	0,90	FP-20/0,9	BP-C2-1,25	ESTAND	1,20	3380	EXITO
14/11/96	NEF-31	1,00	FP-20/1,0	BP-C2-1,25	ESTAND	1,52	1560	INTERMEDIO
13/11/96	NEF-30	1,20	FP-20/1,2	BP-C2-1,25	ESTAND	3,82	30050	FRACASO
13/11/96	NEF-29	1,50	FP-20/1,5	BP-C2-1,25	ESTAND	3,24	25950	FRACASO
12/11/96	NEF-28	1,70	FP-20/1,7	BP-C2-1,25	ESTAND	3,10	22460	FRACASO
12/11/96	NEF-27	3,00	FP-20/3,0	BP-C2-1,25	ESTAND	18,02		FRACASO

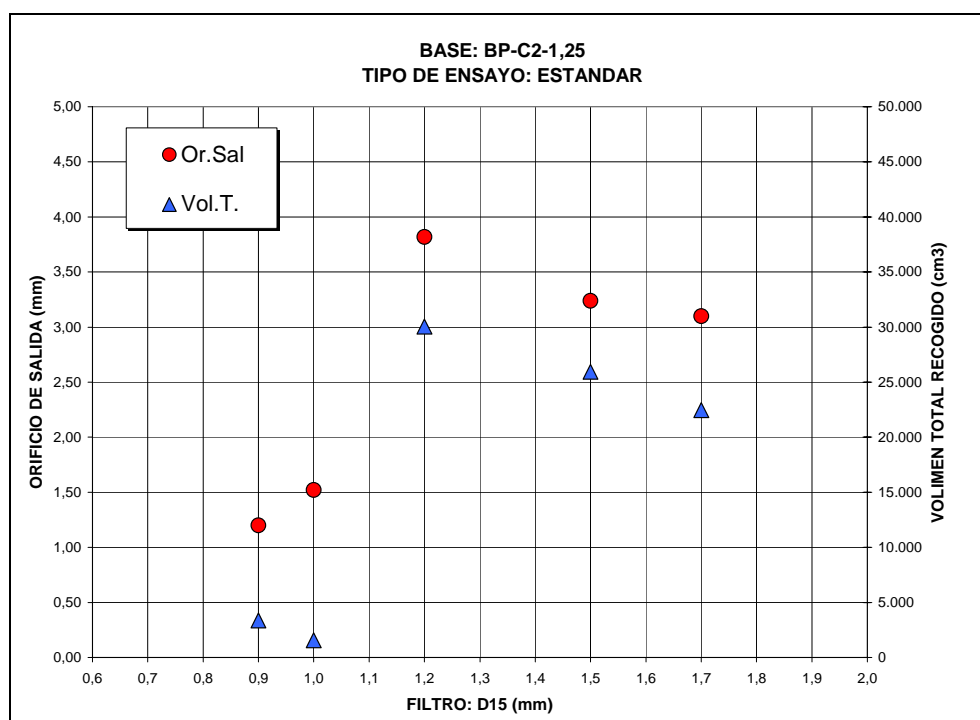


Gráfico 64.- Ensayos NEF Estándar: Base BP-C2-1,25

OBSERVACIONES:

En este caso se ve que el filtro límite corresponde al FP-20/0.9, si bien hay que señalar que se ha ensayado el FP-20/3.0, pero no aparece en el gráfico por salirse de la escala, sin embargo se puede ver en la tabla la enorme erosión que tuvo lugar en ese ensayo.

8.4.5.17 Base BP-C3

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
07/04/97	NEF-149	0,50	FP-10/0,5	BP-C3	ESTAND	1,00	5610	EXITO
23/10/97	NEF-273	0,50	FP-10/0,5	BP-C3	ESTAND	2,00	9010	FRACASO
23/10/97	NEF-274	0,50	FP-10/0,5	BP-C3	ESTAND	1,00	2010	EXITO
13/11/97	NEF-293	0,50	FP-10/0,5	BP-C3	ESTAND	1,00	680	EXITO
25/03/98	NEF-364	0,50	FP-10/0,5	BP-C3	ESTAND	1,40	8420	INTERMEDIO
16/12/96	NEF-61	0,50	FP-10/0,5	BP-C3	ESTAND	1,00	2890	EXITO
13/11/97	NEF-294	0,60	FP-10/0,6	BP-C3	ESTAND	1,30	5300	INTERMEDIO
12/12/96	NEF-59	0,60	FP-10/0,6	BP-C3	ESTAND	1,54	7210	INTERMEDIO
22/01/98	NEF-337	0,70	FP-10/0,7	BP-C3	ESTAND	1,90	12380	FRACASO
11/12/96	NEF-58	0,70	FP-10/0,7	BP-C3	ESTAND	1,98	7550	FRACASO
20/01/98	NEF-333	0,80	FP-10/0,8	BP-C3	ESTAND	1,00	20	EXITO
22/01/98	NEF-338	0,80	FP-10/0,8	BP-C3	ESTAND	2,50	29380	FRACASO
11/12/96	NEF-57	0,80	FP-10/0,8	BP-C3	ESTAND	2,12	8760	FRACASO
07/04/97	NEF-148	1,00	FP-10/1,0	BP-C3	ESTAND	2,22	18360	FRACASO
20/01/98	NEF-334	1,00	FP-10/1,0	BP-C3	ESTAND	1,00	1140	EXITO
10/12/96	NEF-55	1,00	FP-10/1,0	BP-C3	ESTAND	2,52	27940	FRACASO
21/01/98	NEF-336	1,10	FP-10/1,1	BP-C3	ESTAND	1,50	15170	INTERMEDIO
21/01/98	NEF-335	1,20	FP-10/1,2	BP-C3	ESTAND	2,50	38375	FRACASO

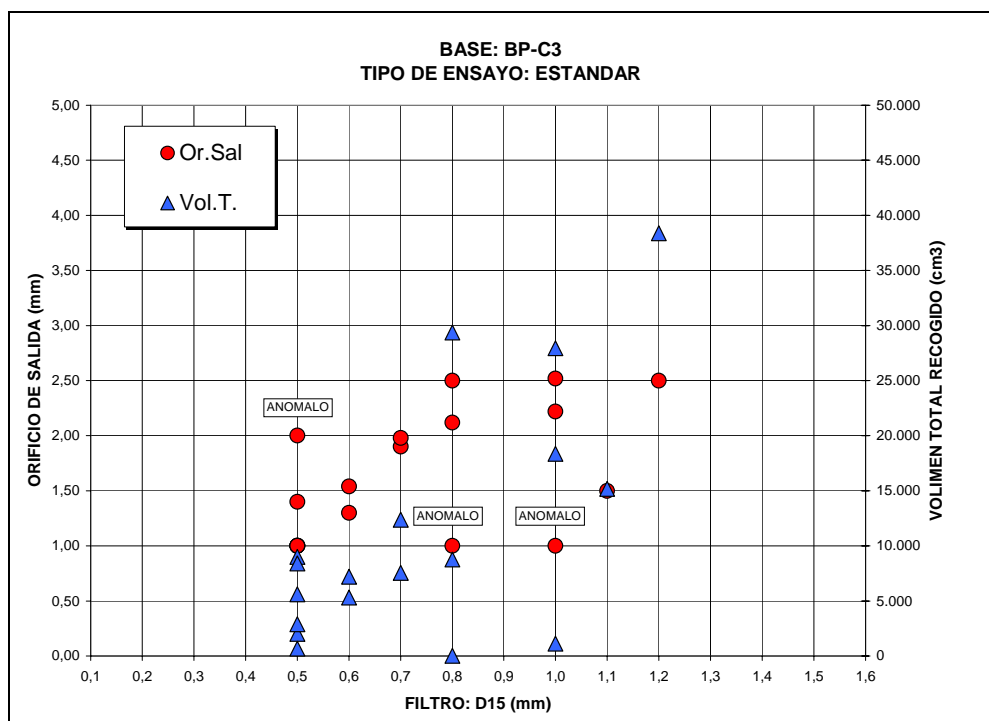


Gráfico 65.- Ensayos NEF Estándar: Base BP-C3

OBSERVACIONES:

El resultado de esta serie de ensayos es muy interesante ya que se ha empleado como material lateral arena y plastilina, respectivamente, para comprobar su efecto.

En ambos casos el resultado es similar, de forma que para el filtro FP-10/0.5 el ensayo es considerado ÉXITO ya que no hay muestras de erosión y el volumen total recogido es muy reducido. Para el filtro FP-10/0.6 la erosión es muy leve, pero se ha considerado que no es admisible ya que para filtros de FP-10/0.7 en adelante la erosión es muy importante.

Por ello, el $D_{15FL} = 0.5$ mm, tanto si se emplea como material lateral arena o plastilina.

Pero hay que señalar que hay algunos ensayos cuyo resultado se ha considerado anómalo, como el NEF-273, NEF-333, NEF-334 y NEF-336.

El NEF-273 es anómalo porque siendo un filtro FP-10/0.5 se ha producido una erosión excesiva, cuando este ensayo se ha repetido 2 veces más y no ha dado ese resultado. En cuanto a los NEF 333, 334 y 336, es interesante señalar que el volumen de agua recogido es excesivamente pequeño lo que denota la posibilidad de alguna obstrucción accidental.

En cualquier caso es preciso esperar al estudio global de los resultados porque ahora no es posible tomar una decisión.

8.4.5.18 Base BP-C4

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
08/07/97	NEF-183	0,70	FP-10/0,7	BP-C4	ESTAND	1,00	3080	EXITO
08/07/97	NEF-184	0,80	FP-10/0,8	BP-C4	ESTAND	1,00	1730	EXITO
09/07/97	NEF-186	0,90	FP-10/0,9	BP-C4	ESTAND	1,00	2370	EXITO
09/07/97	NEF-185	1,00	FP-10/1,0	BP-C4	ESTAND	2,60	24400	FRACASO

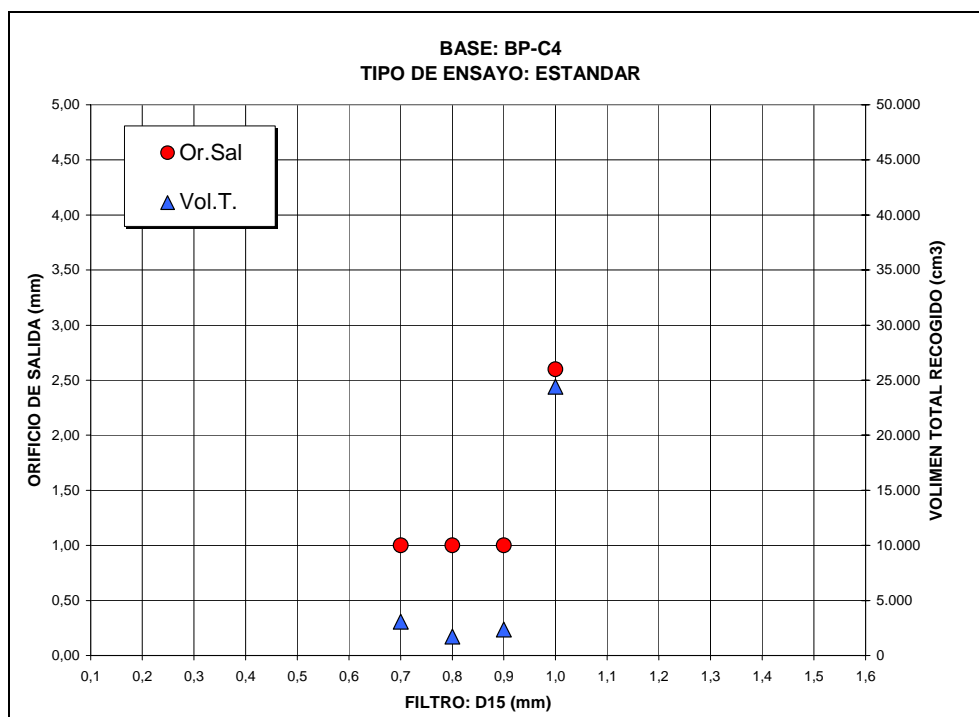


Gráfico 66.- Ensayos NEF Estándar: Base BP-C4

OBSERVACIONES:

Con la muestra BP-C4 han sido suficientes sólo 4 ensayos NEF, de forma que los filtros FP-10/0.7, FP-10/0.8 y FP-10/0.9 han tenido un comportamiento que claramente se puede calificar como ÉXITO ya que el orificio se ha mantenido intacto en todos los casos. Sin embargo, al ensayar el filtro FP-10/1.0 la erosión ha sido muy elevada, con un orificio final de 2.60mm y un volumen recogido de 24.000cm³.

Según estos resultados el D_{15FL} corresponde a 0.9 mm, pero cercano a 0.8 mm dada la enorme erosión sufrida por el filtro de $D_{15F}=1.0$ mm.

8.4.5.19 Base BP-C5

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
10/07/97	NEF-187	0,80	FP-10/0,8	BP-C5	ESTAND	1,00	80	EXITO
10/07/97	NEF-188	1,00	FP-10/1,0	BP-C5	ESTAND	1,00	1180	EXITO
27/10/97	NEF-276	1,10	FP-10/1,1	BP-C5	ESTAND	1,20	3490	INTERMEDIO
28/10/97	NEF-277	1,20	FP-10/1,2	BP-C5	ESTAND	1,90	11020	FRACASO

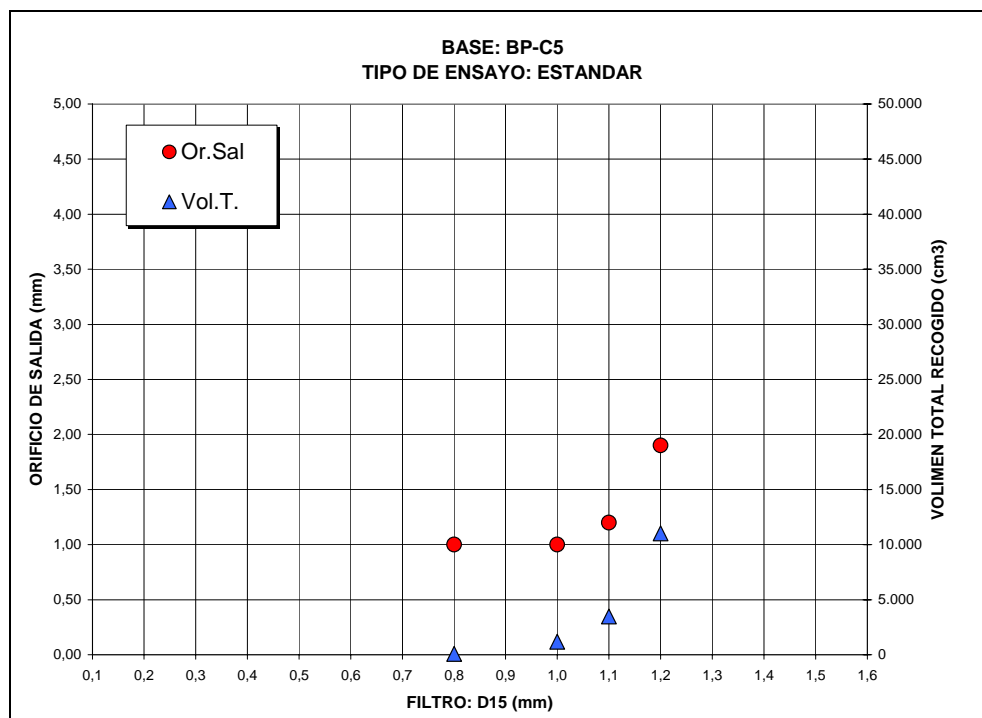


Gráfico 67.- Ensayos NEF Estándar: Base BP-C5

OBSERVACIONES:

Con la base BP-C5 se han obtenido unos resultados coherentes, de forma que los puntos que corresponden al volumen recogido siguen una evolución del tipo exponencial.

Los filtros FP-10/0,8, FP-10/1,0 y FP-10/1,1 han dado lugar a EXITOS, mientras que el FP-10/1,2 tiene un orificio de salida de 1,9 mm, por lo que ha sido considerado como FRACASO.

Por lo tanto, el D_{15FL} corresponde al 1,1 mm.

8.4.5.20 *Base BSC-C1*

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
26/11/96	NEF-42	0,40	FP-10/0,4	BSC-C1	ESTAND	1,00	4260	EXITO
25/11/96	NEF-41	0,50	FP-10/0,5	BSC-C1	ESTAND	2,26	19480	FRACASO
20/11/96	NEF-37	0,60	FP-10/0,6	BSC-C1	ESTAND	1,86	13830	FRACASO
07/11/96	NEF-23	0,50	FP-20/0,5	BSC-C1	ESTAND	1,00	3580	EXITO
07/11/96	NEF-24	0,60	FP-20/0,6	BSC-C1	ESTAND	1,00	685	EXITO
06/11/96	NEF-22	0,70	FP-20/0,7	BSC-C1	ESTAND	2,62	21490	FRACASO
06/11/96	NEF-21	0,80	FP-20/0,8	BSC-C1	ESTAND	1,96	16731	FRACASO

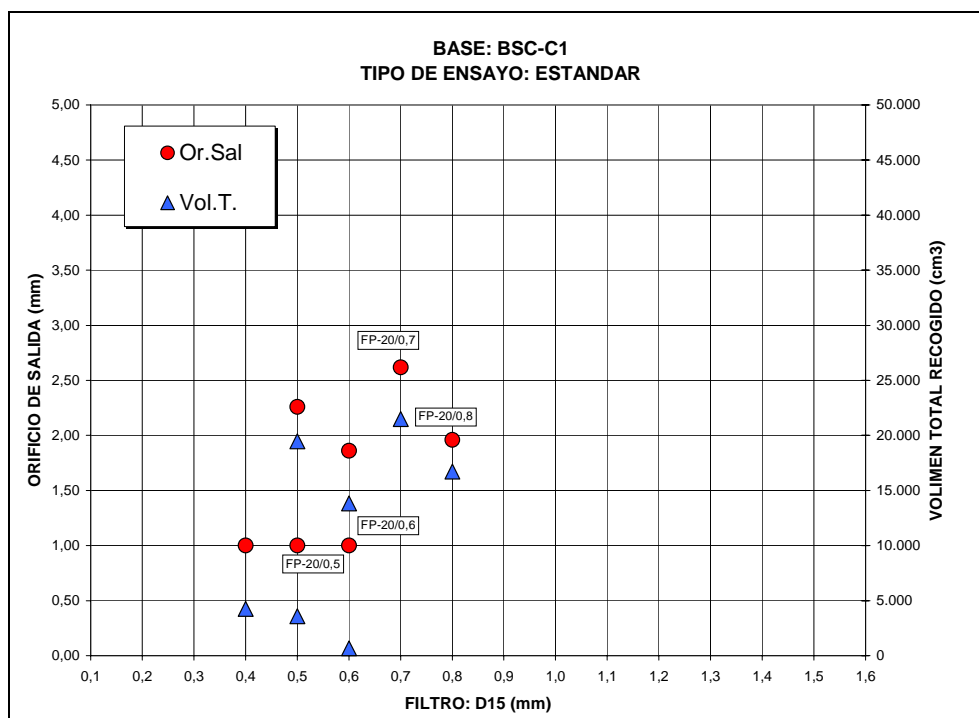


Gráfico 68.- Ensayos NEF Estándar: Base BSC-C1

OBSERVACIONES:

En esta serie de ensayos se han ensayado filtros con igual D_{15F} pero distinto D_{100F} , de forma que en el gráfico se puede observar una tendencia para $D_{100F}=10\text{mm}$, tal que se

define el filtro límite como el FP-10/0.4, mientras que con $D_{100F}=20\text{mm}$, el filtro límite corresponde al FP-20/0.6.

8.4.5.21 Base BSC-C4

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
15/07/97	NEF-191	0,50	FP-10/0,5	BSC-C4	ESTAND	1,00	2620	ÉXITO
14/07/97	NEF-190	0,60	FP-10/0,6	BSC-C4	ESTAND	1,00	6410	ÉXITO
14/07/97	NEF-189	0,70	FP-10/0,7	BSC-C4	ESTAND	1,70	7290	FRACASO

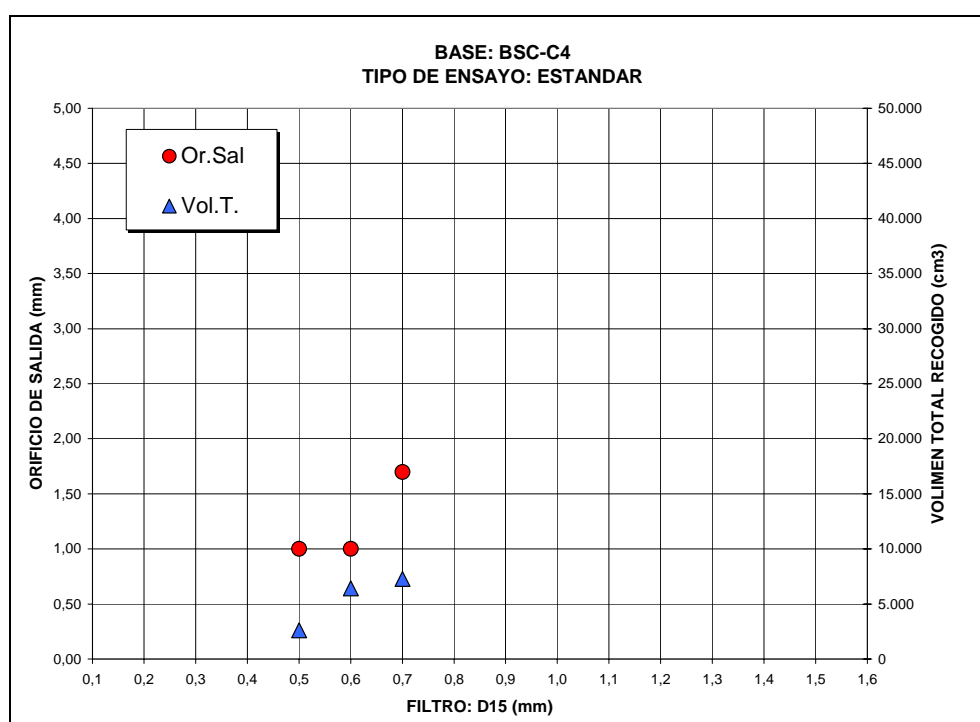


Gráfico 69.- Ensayos NEF Estándar: Base BSC-C4

OBSERVACIONES:

Para la muestra BSC-C4 han sido suficientes 3 ensayos ya que el filtro FP-10/0.5 ha dado lugar a un ÉXITO, el FP-10/0.6, aunque ha aumentado el volumen total recogido, también ha mantenido el orificio sin erosión significativa y sin embargo, el

FP-10/0.7 ha dado lugar a un orificio de 1.7mm, por lo que se ha considerado FRACASO.

Por lo tanto se tiene que el filtro límite es el FP-10/0.6.

8.4.5.22 *Base BSC-C5*

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
17/07/97	NEF-196	0,40	FP-10/0,4	BSC-C5	ESTAND	1,00	1650	EXITO
22/07/97	NEF-197	0,50	FP-10/0,5	BSC-C5	ESTAND	2,50	31950	FRACASO
17/07/97	NEF-195	0,60	FP-10/0,6	BSC-C5	ESTAND	3,00	24310	FRACASO

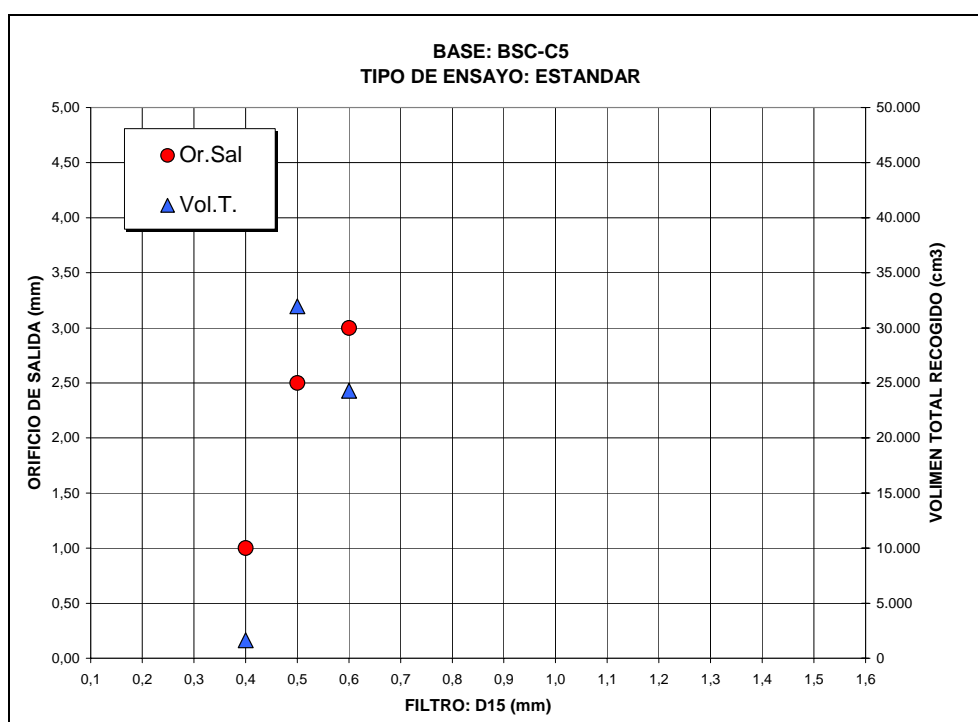


Gráfico 70.- Ensayos NEF Estándar: Base BSC-C5

OBSERVACIONES:

También con la muestra BSC-C5 han sido necesarios sólo 3 ensayos, ya que el filtro FP-10/0.4 ha mantenido el orificio de salida intacto, mientras que los filtros FP-

10/0.5 y FP-10/0.6 han mostrado orificios de 2.5 y 3.00 mm, respectivamente, por lo que han sido considerados FRACASO.

Por lo tanto el filtro límite corresponde al FP-10/0.4.

8.4.5.23 Base BZA-C1

RESULTADOS:

FECHA	ENSAYO	mm F-D15	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	RES.ENSAYO VALORACION
23/03/98	NEF-360	0,20	FP-10/0,2	BZA-C1	ESTAND	1,00	1430	EXITO
30/03/98	NEF-368	0,20	FP-10/0,2	BZA-C1	ESTAND	1,00	600	EXITO
18/03/98	NEF-358	0,30	FP-10/0,3	BZA-C1	ESTAND	5,00	21390	FRACASO

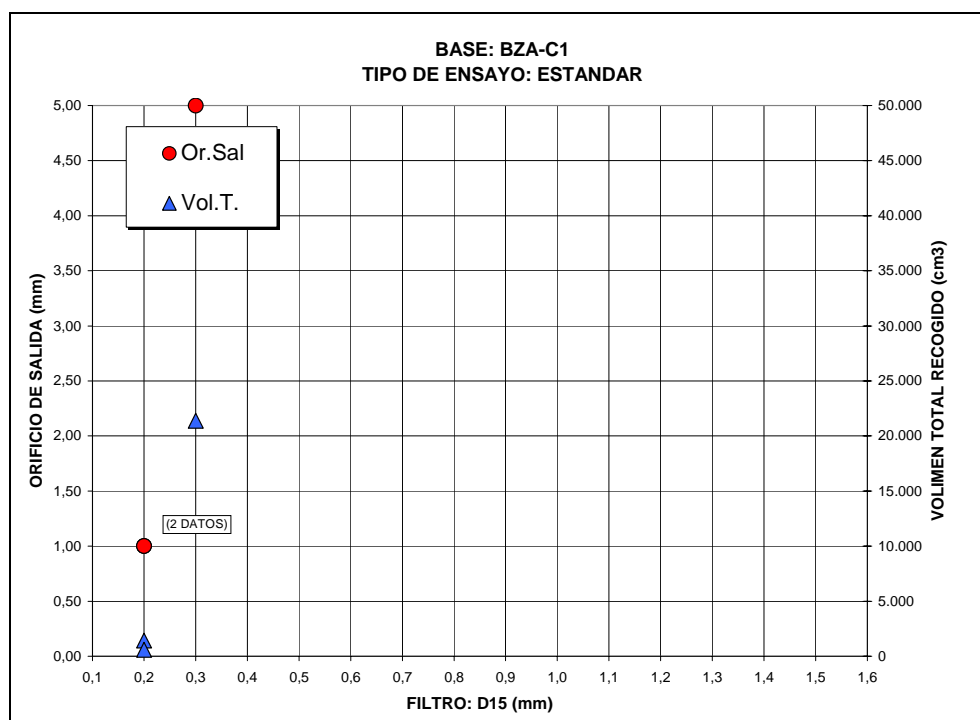


Gráfico 71.- Ensayos NEF Estándar: Base BZA-C1

OBSERVACIONES:

El caso de la base BZA-C1 resulta muy interesante puesto que se trata de una arcilla muy fina y dispersiva. Como se puede ver en el gráfico, el filtro FP-10/0.3 ha dado

lugar a un ensayo claramente calificado como de FRACASO, con un orificio de salida de 5.00 mm y un volumen recogido de 21.390 cm³. Sin embargo el filtro FP-10/0.2 ha dado lugar a ÉXITO las dos veces que se ha ensayado por seguridad. El filtro límite corresponde por tanto al FP-10/0.2.

8.4.6 Análisis de los resultados de los ensayos NEF “Estándar”

8.4.6.1 *Introducción*

Una vez obtenido el “Filtro Límite” para cada muestra de suelo base es posible realizar un primer estudio sobre las variables del filtro y del suelo base que condicionan el resultado.

Para ello se comienza por el estudio de la relación entre las distintas variables granulométricas, empezando por la relación $D_{15F} - d_{85B}$ que es la más frecuente de las propuestas por distintos investigadores.

Posteriormente se estudia la posibilidad de encontrar otras variables granulométricas que representen mejor el fenómeno como pueden ser otros diámetros característicos, el contenido de finos, el coeficiente de uniformidad, etc.

Finalizado el estudio de las variables granulométricas se pasa a relacionar el resultado de los ensayos NEF "Estándar" con nuevas variables como la permeabilidad del filtro, la humedad o la plasticidad del suelo base, etc.

8.4.6.2 *Influencia de la Granulometría del suelo base*

□ *Granulometría medida con dispersante (método estándar)*

Como se ha visto en el capítulo de revisión de los conocimientos, es muy frecuente relacionar el D_{15F} del filtro y el d_{85B} del suelo base. La razón principal es que el D_{15F} está relacionado con el tamaño de la constricción de control (Kenney et al.1985), mientras que el d_{85B} supone que no es necesario impedir la migración de todas las partículas del suelo base, ya que si éste es autoestable, bastará con que se retenga al 15% de las partículas gruesas.

Aunque el acuerdo sobre el empleo del D_{15F} es general, no ocurre así con el d_{85B} ya que también se vio en ese capítulo que otros investigadores proponen diámetros como el d_{75B} o el d_{50B} .

En cualquier caso, en la presente investigación se ha considerado interesante comenzar con la comparación entre el D_{15F} y el d_{85B} , para luego, si procede, buscar otras relaciones más ajustadas.

En la siguiente gráfica se representa para cada d_{85B} del suelo base, el D_{15F} que ha dado lugar a ÉXITO, FRACASO o INTERMEDIO en los ensayos NEF "Estándar", mostrando además el filtro considerado "LÍMITE" y la tendencia encontrada:

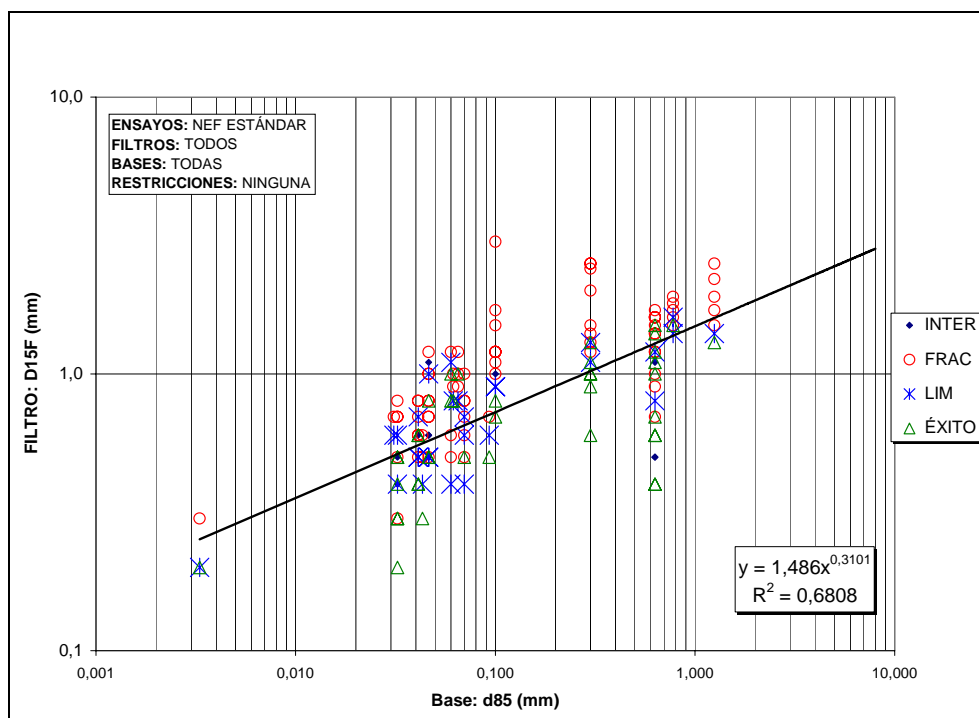


Gráfico 72.- Ensayos NEF Estándar: relación D_{15F} – d_{85B}

Como se puede ver en la gráfica, la relación D_{15F} - d_{85B} es lineal pero en escala logarítmica, apareciendo cierta dispersión en los filtros calificados como LÍMITE.

Esta representación contradice en cierta forma la clásica regla de emplear una ratio constante como por ejemplo $D_{15F} / d_{85B} \leq 9$, pero el valor de $R^2=0.68$ no es lo

suficientemente elevado como para sacar conclusiones desde el punto de vista cuantitativo.

También se observa en la gráfica, (y así se ha expresado en los apartados anteriores), que a algunas bases le corresponden dos “Filtros Límite”, por lo que para poder tomar una decisión es preciso analizar estadísticamente los posibles resultados anómalos.

Por tanto es interesante buscar una relación del tipo lineal y con un mayor coeficiente de correlación. A continuación se presenta un gráfico matricial de dispersión con estas variables:

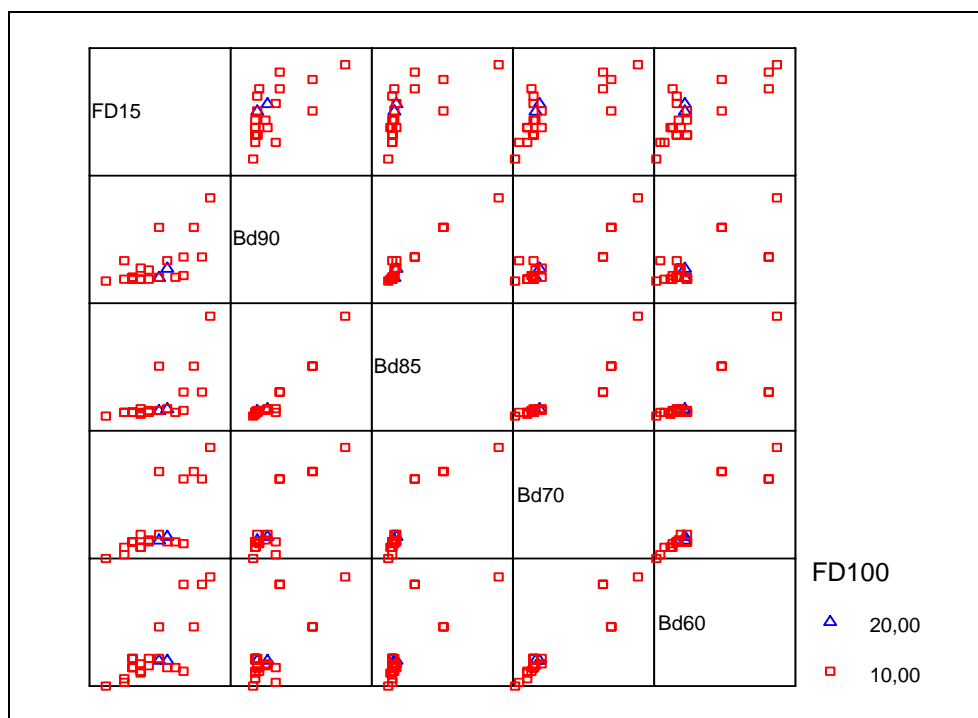


Gráfico 73.- Ensayos NEF Estándar: correlaciones entre variables granulométricas (I)

En el gráfico se observa que aparece una relación lineal a partir del d_{70B} , mientras que para el d_{90B} y el d_{85B} la relación parece potencial.

A continuación se representa la relación con el d_{50B} , d_{40B} , $P_{0.08B}$ y $P_{0.002B}$ ²³, habiéndose descartado los diámetros inferiores, (30, 20, 10 y 5) porque en los ensayos de sedimentación es muy difícil apreciar estas partículas tan pequeñas por lo que a veces se interpola linealmente, no siendo por tanto tan preciso como con los diámetros anteriores.

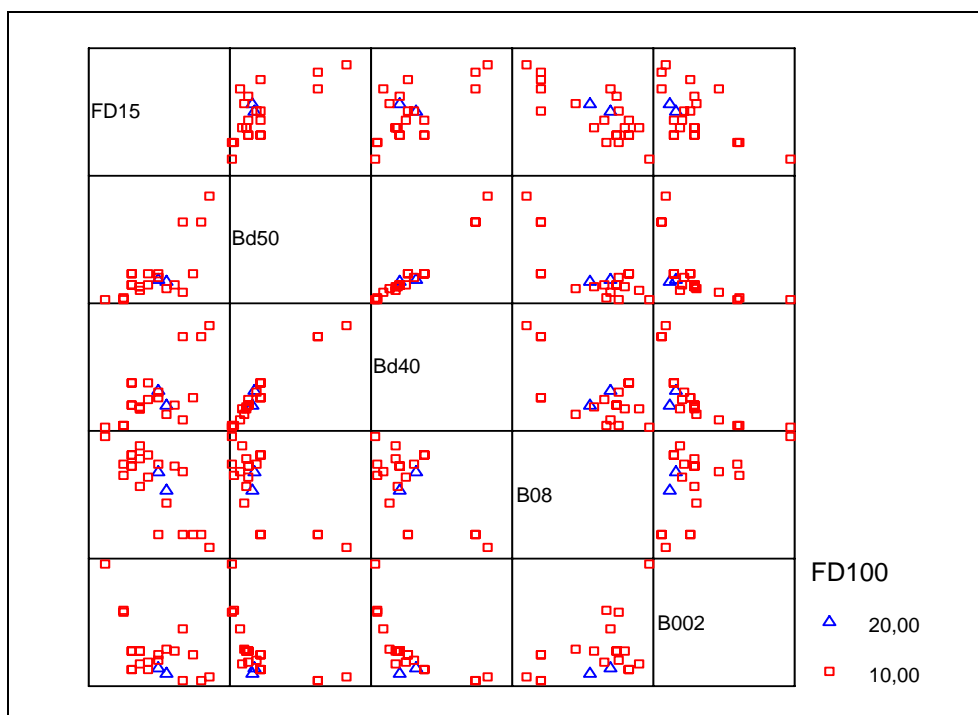


Gráfico 74.- Ensayos NEF Estándar: correlaciones entre variables granulométricas (II)

De nuevo las relaciones muestran cierta linealidad, pero para escoger la más precisa se debe calcular el coeficiente de correlación de Pearson, obteniéndose:

Diam.	d_{90B}	d_{85B}	d_{70B}	d_{60B}	d_{50B}	D_{40B}	$P_{0.08B}$	$P_{0.002B}$
C. Pearson	0.768	0.752	0.822	0.775	0.726	0.653	-0.844	-0.620

Tabla 60.- Ensayos NEF Estándar: correlaciones entre D_{15FL} y las variables granulométricas del suelo base

²³ P_x se refiere al porcentaje en peso que pasa por el tamiz de x milímetros de apertura

Por lo tanto parece que el mejor ajuste se consigue con el porcentaje inferior al tamiz de 0.08mm de apertura, también llamado porcentaje de finos, ($P_{0.08B}$).

También es importante señalar que en los gráficos se aprecia poca influencia del D_{100F} ya que tanto para 20 o 10 mm la tendencia es similar.

Pero para poder detectar los resultados anómalos hay que estudiar los residuos tipificados mediante una regresión lineal entre D_{15FL} - $P_{0.08B}$:

Resumen del modelo^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,844 ^a	,712	,701	,2032

a. Variables predictoras: (Constante), B08

b. Variable dependiente: FD15

Diagnósticos por caso^a

Número de caso	Residuo tip.	FD15	Valor pronosticado	Residual
277	2,216	1,10	,6497	,4503
335	1,907	1,00	,6124	,3876
390	-2,116	,80	1,2300	-,4300

a. Variable dependiente: FD15

Tabla 61.- Ensayos NEF Estándar: detección de resultados anómalos

Como se puede ver, se han detectado tres posibles casos anómalos que hay que estudiar detenidamente:

- Caso n° 277 (NEF-276).- Corresponde a la base BP-C5, que si bien mostró un comportamiento coherente en toda la serie de ensayos, es cierto que el resultado es muy superior al esperado por la granulometría del material, ya que el D_{15FL} es de 1.10 mm cuando le correspondería 0.65mm.
- Caso n° 335 (NEF-334).- Corresponde a la base BP-C3, en la que se obtuvieron resultados contradictorios, $D_{15FL}=0.5$ mm en dos de las series de ensayos realizadas, y 1.00 mm en la otra. Como se ve en la tabla, efectivamente este último resultado es claramente anómalo.

- Caso n° 390 (NEF-389).- Corresponde a la base BFA-C2, con la cual se obtuvieron también dos resultados contradictorios, 0.80 mm y 1.20 mm, como se puede ver en la tabla superior, este segundo resultado es anómalo, siendo el D_{15FL} estimado precisamente 1.20 mm.

Parece por tanto razonable excluir estos tres resultados del estudio, con lo que la regresión queda de la siguiente forma:

Resumen del modelo^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,925 ^a	,855	,849	,1490

a. Variables predictoras: (Constante), B08

b. Variable dependiente: FD15

Coefficientes^a

Modelo	Coefficients no estandarizados		Coefficient es estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%	
	B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior
1 (Constante)	3,463	,231		15,011	,000	2,987	3,939
B08	-3,22E-02	,003	-,925	-11,906	,000	-,038	-,027

a. Variable dependiente: FD15

Tabla 62.- Ensayos NEF Estándar: regresión lineal $D_{15FL} - P_{0.08B}$

Como se puede ver, se ha obtenido una ley lineal con un $R^2=0.855$, muy elevado para este tipo de relación experimental, sin embargo, para el correcto diseño de los filtros es conveniente emplear la envolvente inferior, de forma que quede del lado de la seguridad, como se ve en el siguiente gráfico:

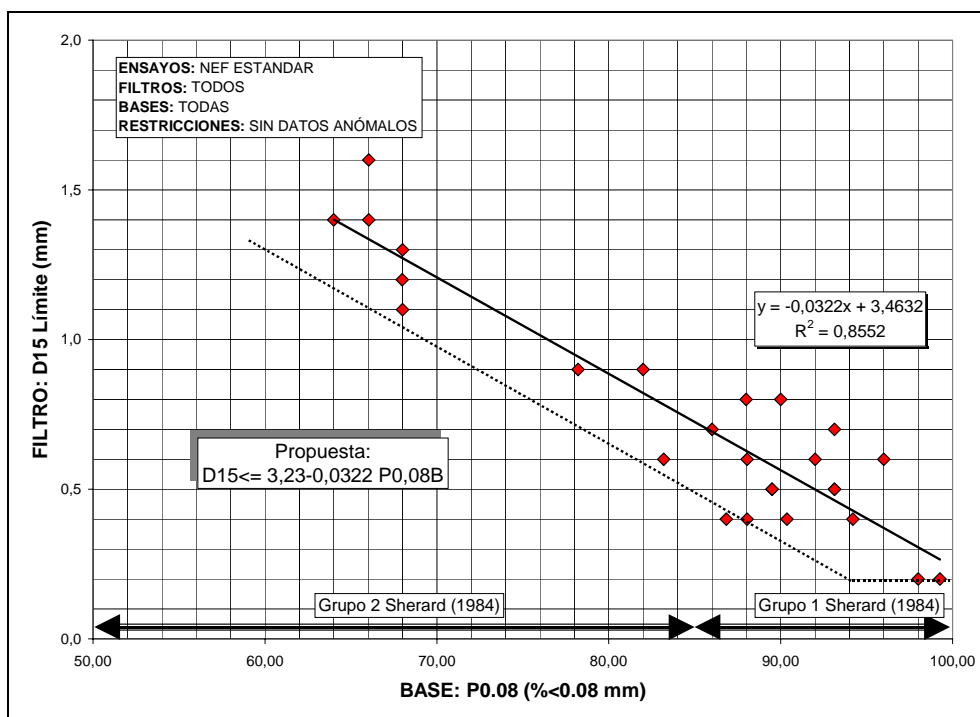


Gráfico 75.- Ensayos NEF Estándar: relación $D_{15FL} - P_{0.08B}$

Aunque también tiene una correlación muy alta la relación $D_{15FL} - d_{70B}$:

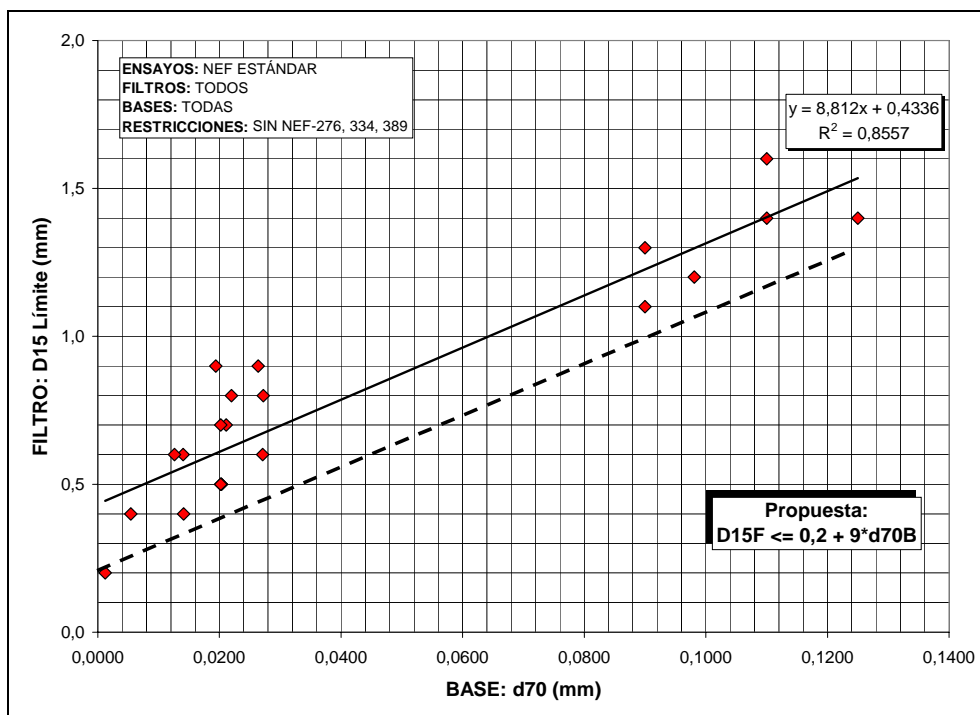


Gráfico 76.- Ensayos NEF Estándar: relación $D_{15FL} - d_{70B}$

En cambio, no es posible encontrar una ratio constante entre el D_{15F} y el d_{85B} , como proponen otros autores, tal y como se muestra en el siguiente gráfico:

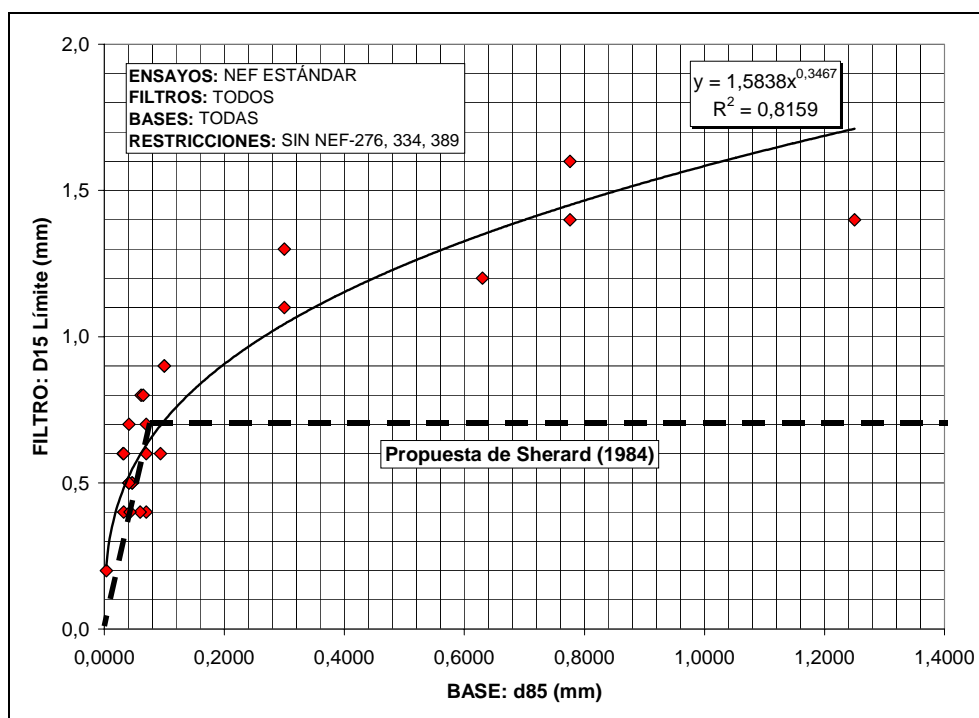


Gráfico 77.- Ensayos NEF Estándar: relación $D_{15FL} - d_{85B}$

Como se puede ver en el gráfico, efectivamente al principio puede haber una relación lineal $D_{15F}-d_{85B}$, con un cambio de pendiente, sin embargo es mucho más precisa una relación de tipo potencial y por lo tanto, sin una ratio constante.

Sobre estos resultados es importante destacar las siguientes conclusiones:

- El D_{15F} se confirma como variable representativa del comportamiento del filtro, incluso para diferentes D_{100F} y por lo tanto distintas pendientes de la curva granulométrica.

- El d_{85B} no es la mejor variable de comparación del suelo base. Por un lado, la relación no es lineal, sino potencial, y además el coeficiente de correlación no es muy alto.
- El criterio de diseño de Sherard y Dunningan (1985) queda en general del lado de la seguridad, ya que se han obtenido D_{15FL} superiores a 0.7 mm, sin embargo algunos filtros que cumplen la ratio $D_{15F}/d_{85B} \leq 9$ han fracasado.
- La separación en grupos según el porcentaje $P_{0.08B}$ que realiza Sherard y Dunningan (1985) sólo es precisa al utilizar el d_{85B} como diámetro de comparación, porque se puede evitar con una relación potencial o empleando directamente la relación $D_{15F}-P_{0.08B}$ o la relación $D_{15F}-d_{70B}$.
- El empleo del tradicional d_{85B} como variable de comparación tiene las desventajas de una menor precisión, no linealidad y que la determinación de este diámetro en este tipo de suelos suele corresponder a una zona de solape entre la granulometría por tamizado y la realizada por sedimentación, con la consiguiente discontinuidad y dificultad de apreciación.
- Sherard y Dunningan (1985) señalan que en cualquier caso, el D_{15F} mínimo es de 0.2 mm, como efectivamente se ha obtenido en la presente investigación, incluso para una base dispersiva como la arcilla de la Presa de Zahara, (muestra BZA-C1). Por esa razón no se propone una relación basada en una ratio simple, sino una polinómica de primer grado, con 0.2mm como ordenada en el origen.

□ Granulometría medida sin dispersante

Obtenidas las conclusiones anteriores, cabe preguntarse si la granulometría del suelo base obtenida sin el empleo de dispersante puede servir para representar el comportamiento del suelo base. Para ello se ha procedido de igual forma que con la granulometría con dispersante, obteniéndose los siguientes resultados:

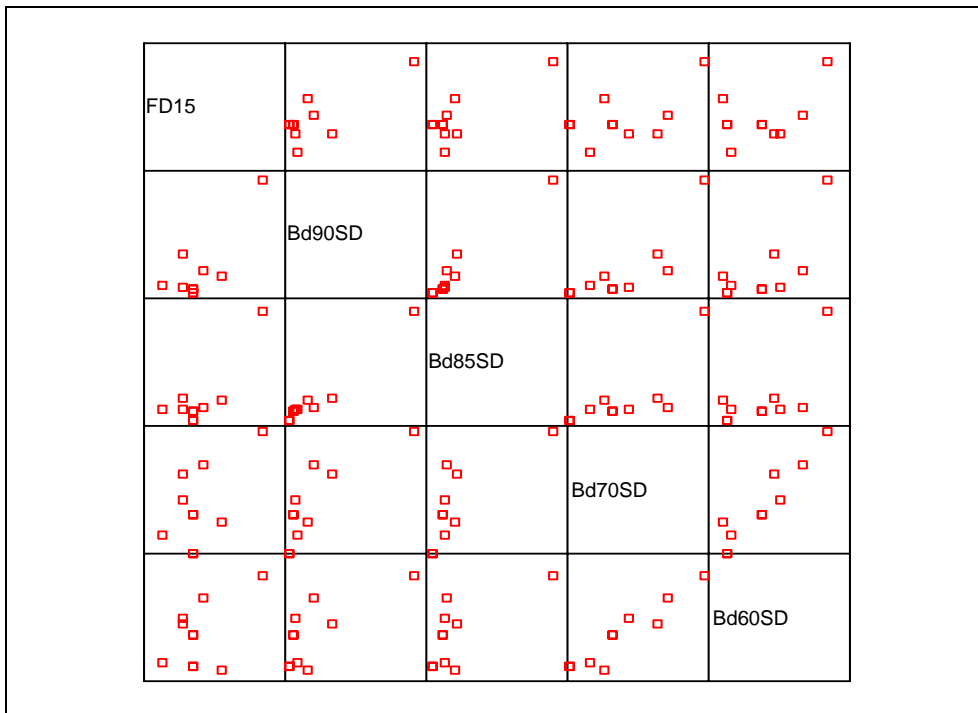


Gráfico 78.- Ensayos NEF Estándar: relación D_{15FL} – con la granulometría del suelo base sin dispersante (I)

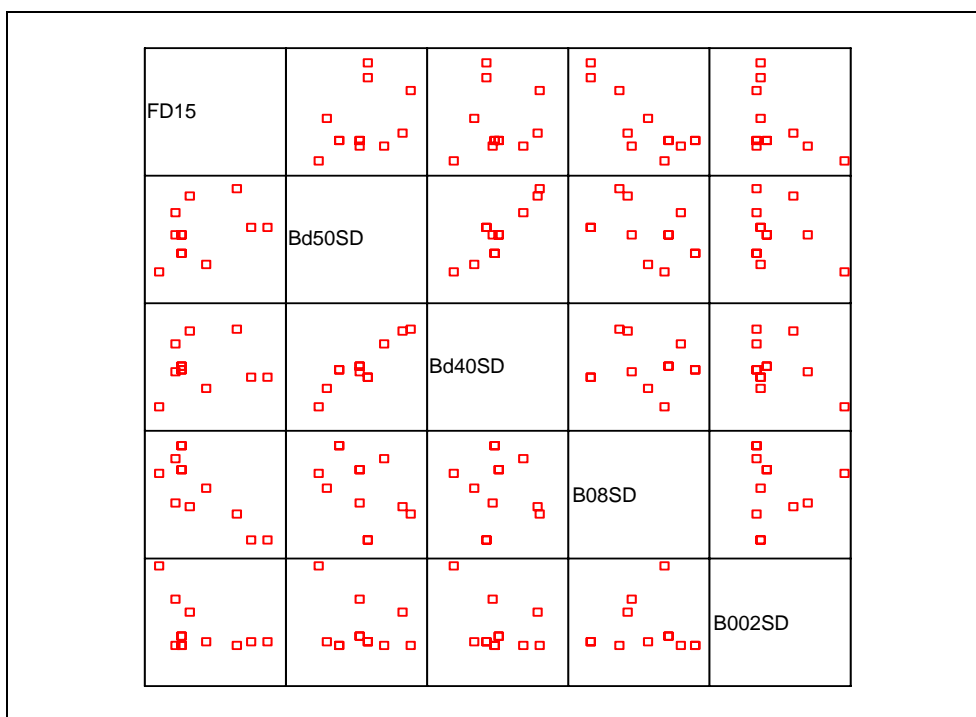


Gráfico 79.- Ensayos NEF Estándar: relación D_{15FL} – con la granulometría del suelo base sin dispersante (II)

Como se puede ver, los datos quedan muy dispersos en todos los casos, habiéndose calculado los siguientes coeficientes de correlación de Pearson:

Diam.	d_{90Bsd}	d_{85Bsd}	d_{70Bsd}	d_{60Bsd}	d_{50Bsd}	D_{40Bsd}	$P_{0.08Bsd}$	$P_{0.002sd}$
C. Pearson	0.791	0.833	0.584	0.853	0.383	0.125	-0.808	-0.465

Tabla 63.- Ensayos NEF Estándar: coeficientes de correlación D_{15FL} – con la granulometría del suelo base sin dispersante

Efectivamente los coeficientes son bastante altos, pero inferiores a los obtenidos con la granulometría con dispersante, por lo tanto se puede concluir que el empleo de la granulometría del suelo base medida sin dispersante, como variable de correlación con el D_{15FL} , no introduce una mayor precisión de la ya obtenida con la granulometría con dispersante, aunque resulta interesante destacar que la relación $D_{15FL} - d_{85B}$ ($R=0.752$), es ligeramente inferior a la relación $D_{15FL} - d_{85Bsd}$ ($R=0.833$).

□ Granulometría de las partículas erosionadas

En la *Investigación de Choque* ya se ha estudiado la granulometría de las partículas contenidas en el agua de salida del ensayo, si bien no se ha conseguido sacar conclusiones.

En esta fase de la *Investigación de Fondo* se ha continuado ese estudio mediante la obtención de la granulometría por rayo láser en los ensayos NEF-355, (base BBA-C1, Filtro FP-10/0.5), NEF-356, (base BBA-C1, filtro FP-10/0.4) y NEF-360, (base BZA-C1, filtro FP-10/0.2).

En cada ensayo se han tomado muestras del agua de salida y se ha medido la granulometría por rayo láser mediante el sistema GALAI CIS-1, siendo lo más interesante comparar, en cada caso, cual es el tamaño máximo de las partículas erosionadas, (d_{100Er} en la tabla siguiente).

ENSAYO	FILTRO F-CLAVE	mm B-d85	BASE B-CLAVE	PREP.ENS TIPO ENSAYO	mm Or.Ent	mm Or.Sal	cm3 Vol.T.	cm3/s Qmed	mm d100Er	RES.ENSAYO VALORACION
NEF-356	FP-10/0,4	0,0431	BBA-C1	ESTAND	1,00	1,00	2775	2,31	1,30E-02	EXITO
NEF-355	FP-10/0,5	0,0431	BBA-C1	ESTAND	2,00	1,70	29780	24,82	1,80E-02	FRACASO
NEF-364	FP-10/0,5	0,0464	BP-C3	ESTAND	1,50	1,40	8420	7,02	1,25E-02	INTERMEDIO
NEF-360	FP-10/0,2	0,0033	BZA-C1	ESTAND	1,20	1,00	1430	1,19	9,00E-03	EXITO

Tabla 64.- Ensayos NEF Estándar: tamaño máximo de las partículas erosionadas

Al igual que ocurriera en la *Investigación de Choque*, el tamaño máximo de las partículas erosionadas, (d_{100Er}), tiene un rango de variación muy pequeño y no se puede decir que con un filtro más grueso, también sea mayor el d_{100Er} , ya que los ensayos NEF-355 y NEF-364 tienen el filtro 10/0.5 y sin embargo el d_{100Er} es muy diferente, de 0.180 y 0.125 micras respectivamente.

Tampoco se observa una relación con el volumen total de agua recogida, que es indicativo de una mayor o menor erosión, ni con el tamaño de la base original.

De nuevo parece que no es posible obtener conclusiones sobre estos datos de granulometría, lo que parece indicar que el instrumental utilizado podría no ser adecuado.

En cualquier caso se va a continuar aplicando esta nueva técnica con otras variantes de los ensayos NEF y si persiste la ausencia de conclusiones habrá que proponer otro sistema de medida de la granulometría de las partículas erosionadas.

8.4.6.3 Influencia de la permeabilidad del filtro

En el capítulo de *Revisión de los Conocimientos* se ha visto como algunos investigadores entre los que destacan Vaughan y Soares (1982) proponen emplear la permeabilidad del filtro en vez de la granulometría para representar el comportamiento del filtro frente a la erosión interna del suelo base.

Resulta por tanto interesante comprobar en la presente investigación si efectivamente existe esa relación, para lo cual hay que tener en cuenta previamente que en el estudio estadístico del material de filtro, se obtuvo una buena relación entre la permeabilidad y el D_{15F} , para cada compactación.

Al estudiar ahora sólo los resultados de los ensayos NEF "Estándar", la compactación del filtro es siempre igual, por lo que si ya se ha encontrado una relación entre el d_{85B} y el D_{15FL} y éste está relacionado con la permeabilidad, lógicamente existe una relación entre el d_{85B} y la permeabilidad del filtro límite, como puede verse en la siguiente gráfica:

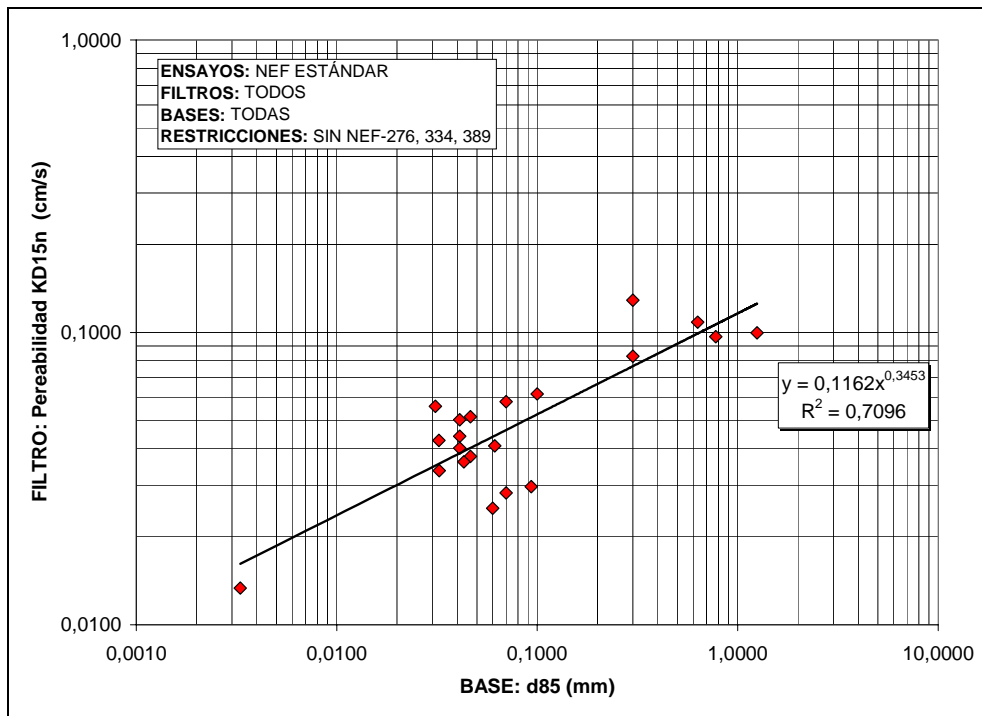


Gráfico 80.- Ensayos NEF Estándar: relación k_{FL} – d_{85B}

Pero al igual que ha ocurrido al relacionar la granulometría del filtro con la del suelo base, se obtiene una correlación más alta si en vez del d_{85B} se emplea el d_{70B} , tal y como se representa en el siguiente gráfico:

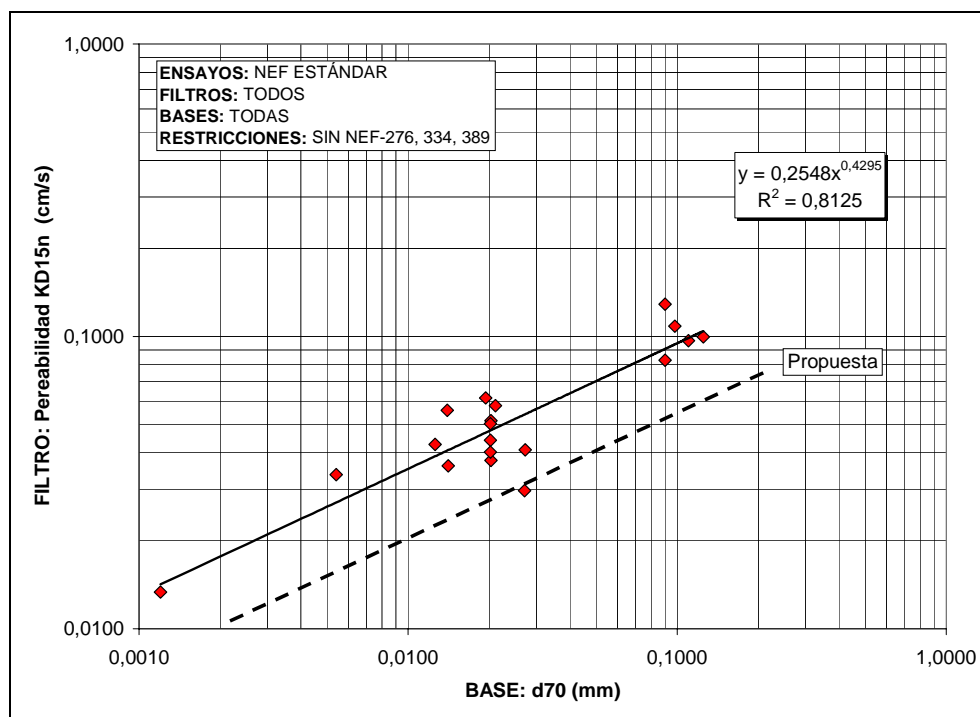


Gráfico 81.- Ensayos NEF Estándar: relación k_{FL} – d_{70B}

En cualquier caso es importante esperar al resultado de los ensayos en los que se ha variado la compactación del filtro para poder sacar unas conclusiones más fiables sobre la influencia de la permeabilidad.

8.4.6.4 Influencia de la plasticidad del suelo base

Vista la buena relación existente entre el D_{15F} y la granulometría del suelo base, representada por el d_{70B} o el $P_{0.08B}$, es preciso estudiar si la plasticidad tiene alguna influencia en la ratio $D_{15F}/P_{0.08B}$ o la ratio D_{15FL}/d_{70B} . Para ello se ha seguido un proceso similar al de los casos anteriores, con representación matricial y cálculo de la correlación.

En el siguiente gráfico de dispersión matricial se representa el D_{15FL} y las ratios $RD_{15FD70B}$, (D_{15FL}/d_{70B}) y $RD_{15F008B}$, $(D_{15FL}/P_{0.08B})$, con la plasticidad del suelo base:

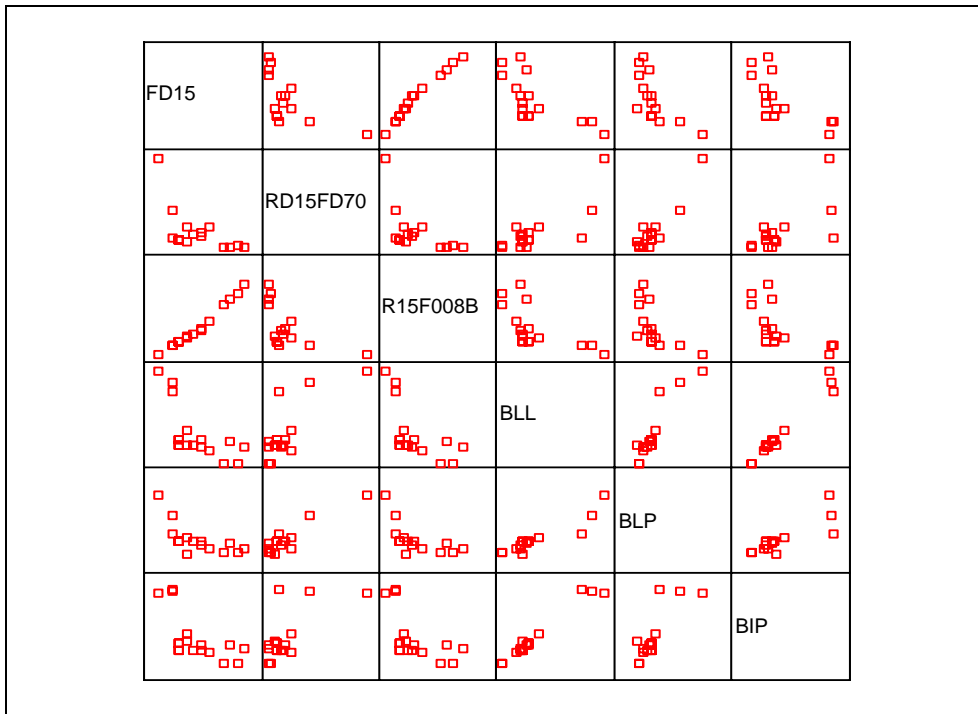


Gráfico 82.- Ensayos NEF Estándar: influencia de la plasticidad

En cuanto a los coeficientes de correlación de Pearson, se obtienen los siguientes:

		Correlaciones					
		FD15	RD15FD70	R15F008B	BLL	BLP	BIP
FD15	Correlación de Pearson						
	Sig. (bilateral)						
	N						
RD15FD70	Correlación de Pearson	-,568**					
	Sig. (bilateral)	,006					
	N	22					
R15F008B	Correlación de Pearson	,990**	-,525*				
	Sig. (bilateral)	,000	,012				
	N	26	22				
BLL	Correlación de Pearson	-,721**	,779**	-,647**			
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,002			
	N	21	17	21			
BLP	Correlación de Pearson	-,583**	,917**	-,526*	,849**		
	Sig. (bilateral)	,006	,000	,014	,000		
	N	21	17	21	21		
BIP	Correlación de Pearson	-,714**	,665**	-,641**	,974**	,709**	
	Sig. (bilateral)	,000	,004	,002	,000	,000	
	N	21	17	21	21	21	

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).
 * . La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 65.- Ensayos NEF Estándar: correlaciones entre granulometría del filtro y plasticidad del suelo base

Lo primero que hay que destacar es la aparente buena relación entre el D_{15FL} y el índice de plasticidad del suelo base (BIP), sin embargo hay que ser cautos con este resultado, ya que en el estudio estadístico del suelo base determinó una estrecha relación entre el BIP y el porcentaje de finos del suelo base ($P_{0.08B}$), por lo que la relación D_{15FL} -BIP no es más que un resultado de la relación D_{15FL} - $P_{0.08B}$ -BIP.

En el gráfico siguiente se puede ver que efectivamente, cuanto más plástica sea la muestra de suelo base, menor ha de ser el D_{15FL} del filtro. Sin embargo no se pueden sacar conclusiones directamente porque ya se ha comentado que, en el caso de las muestras ensayadas, cuanto más finas son más plásticas.

Para evitar este posible enmascaramiento es interesante estudiar la relación de la plasticidad pero con la ratio $D_{15FL} / P_{0.08B}$ o D_{15FL} / d_{85B} , etc., de forma que ya si se está teniendo en cuenta las tres posibles variables influyentes a la vez.

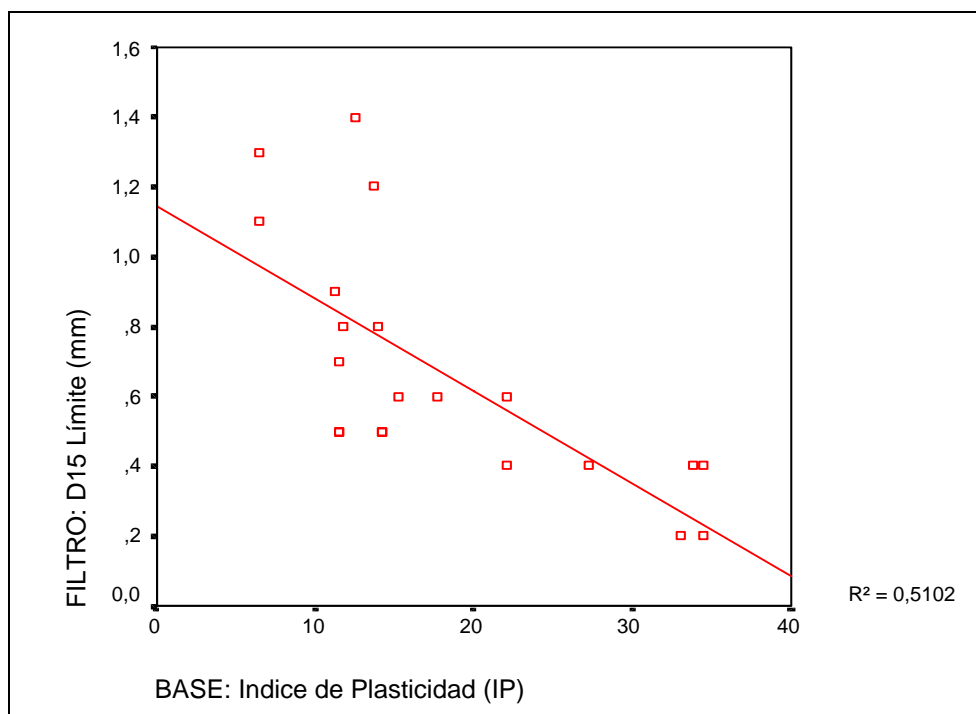


Gráfico 83.- Ensayos NEF Estándar: relación D_{15FL} – índice de plasticidad

En la tabla de correlaciones destaca la relación de D_{15FL}/d_{70B} con el límite plástico y el índice de plasticidad.

Pero de nuevo hay que ser muy cautos con esta relación, ya que en el gráfico siguiente se puede ver claramente que la tendencia está fuertemente condicionada por sólo dos valores de IP altos, pero de no ser por ellos, el gráfico se reduce a una nube de puntos.

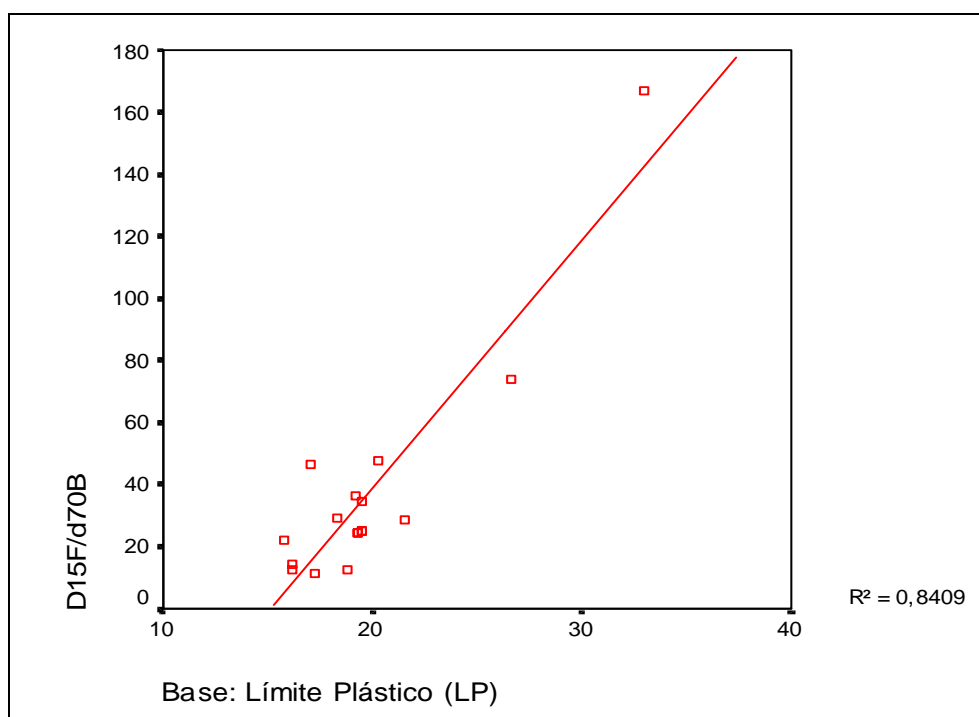


Gráfico 84.- Ensayos NEF Estándar: relación D_{15FL}/d_{70B} con límite plástico

Ante esta incertidumbre, se ha estudiado la regresión lineal, pero empleando como variable dependiente el D_{15FL} y como dependientes el d_{70B} y el B_{IP} , obteniéndose los siguientes resultados:

Correlaciones

		FD15	BIP	Bd70
Correlación de Pearson	FD15	1,000	-,646	,913
	BIP	-,646	1,000	-,496
	Bd70	,913	-,496	1,000
Sig. (unilateral)	FD15	,	,003	,000
	BIP	,003	,	,021
	Bd70	,000	,021	,
N	FD15	17	17	17
	BIP	17	17	17
	Bd70	17	17	17

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,940 ^a	,883	,867	,1264

a. Variables predictoras: (Constante), Bd70, BIP

Coefficientes^a

Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%	
		B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	,620	,094		6,569	,000	,417	,822
	BIP	-,95E-03	,004	-,256	-2,433	,029	-,019	-,001
	Bd70	7,235	,967	,786	7,478	,000	5,160	9,309

a. Variable dependiente: FD15

Tabla 66.- Ensayos NEF Estándar: influencia de la plasticidad

Como se puede ver, se obtiene una correlación muy alta, ($R^2=0.883$), pero no mucho mayor que la obtenida directamente en la correlación $D_{15FL}-d_{70B}$ ($R^2=0.856$), además la significación de la variable BIP es 0.029, por lo que se puede deducir que la plasticidad tiene una cierta influencia, pero no muy significativa.

Si en vez del d_{70B} se utiliza el $P_{0.08B}$ se puede apreciar mejor la influencia de la plasticidad:

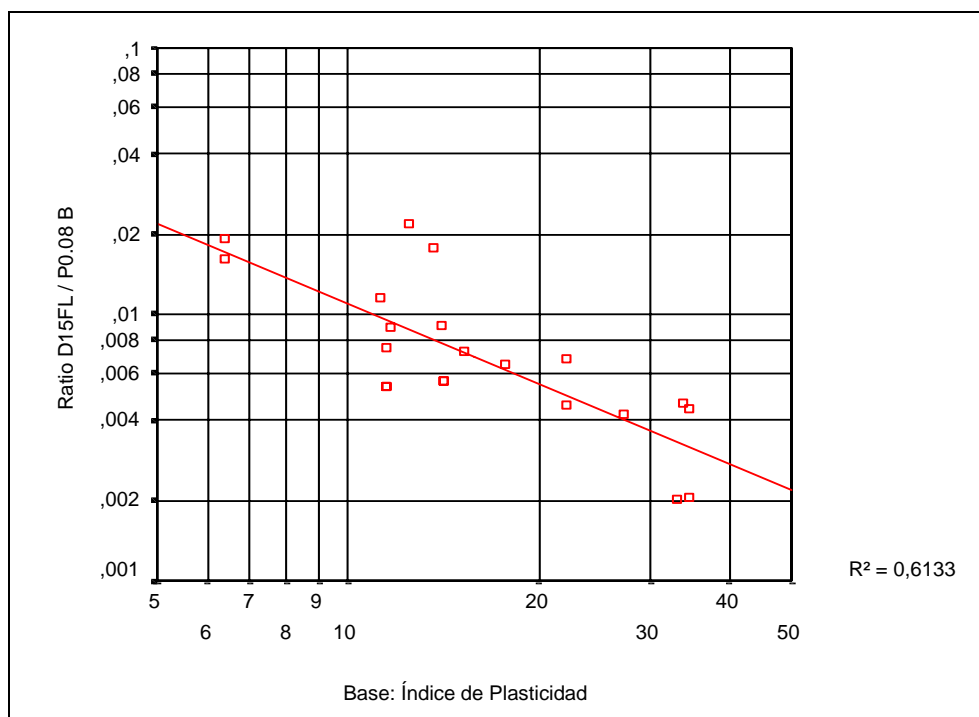


Gráfico 85.- Ensayos NEF Estándar: relación entre $D_{15FL} / P_{0.08B}$ y la plasticidad

En este caso queda claro que la tendencia es descendente, de forma que cuanto mayor sea el Índice de Plasticidad del suelo base, menor debe ser el ratio $D_{15FL} / P_{0.08B}$, sin embargo, tampoco se mejora el coeficiente de correlación al introducir la plasticidad en el modelo.

Se concluye por tanto que efectivamente la plasticidad parece tener un efecto favorable, de forma que a igualdad de granulometría del suelo base, un mayor índice de plasticidad permite diseñar filtros menos estrictos, sin embargo esta influencia no es muy significativa.

8.4.6.5 Influencia de la humedad y compactación del suelo base

Respecto a la humedad hay que señalar que aun es pronto para sacar conclusiones, ya que todas las muestras se han ensayado con una humedad un 1% por encima de la óptima próctor.

A pesar de ello, a modo de comprobación se ha estudiado la correlación entre los resultados de los ensayos NEF "Estándar" y la humedad y densidad del suelo base, tanto sus valores absolutos como sus proporciones respecto a los datos del ensayo próctor normal.

En ningún caso se ha encontrado un coeficiente de correlación de Pearson superior a 0.7 por lo que no parece posible encontrar una influencia significativa. Para ello es preciso realizar ensayos NEF en los que se modifique la humedad de compactación del suelo base, pero ahora no es posible sacar conclusiones.

8.4.6.6 Influencia de otras variables del suelo base

Se ha estudiado también la posible relación entre el D_{15FL} y las ratios D_{15FL}/d_{70B} y $D_{15FL}/P_{0.08B}$; con el resto de las propiedades de los suelos base ensayados, no habiéndose obtenido ninguna relación significativa.

En particular se ha estudiado:

- **Composición** del suelo base: no se ha hallado ninguna relación con el contenido de cuarzo, calcita, dolomita, feldespatos o arcilla
- **Mineralogía** del suelo base: no hay influencia significativa del tipo de mineral predominante en la fracción arcillosa, (esmectita, illita, caolín o paragonita), si bien hay una cierta relación entre el D_{15FL} y el contenido de mineral clorita, pero parece ser una relación casual.
- **Cohesión y ángulo de rozamiento**: son pocos los datos disponible y tampoco se aprecia ninguna influencia
- **Permeabilidad**: hay una relación entre el D_{15FL} y la permeabilidad del suelo base, pero además de tener un coeficiente de Pearson muy bajo (0.706), parece claro que la relación se debe más a la influencia del tamaño de las partículas del suelo base sobre su permeabilidad, que a una relación directa.

En cualquier caso hay que señalar que es preciso realizar más ensayos NEF, con distintas variantes para poder sacar conclusiones más precisas.

8.4.6.7 Influencia del material lateral

En los ensayos NEF "Estándar" se ha empleado mayoritariamente arena como material lateral, sin embargo es posible estudiar si aquellos que han utilizado plastilina como material lateral siguen la misma tendencia.

En el gráfico siguiente se representa la relación d_{70B} con el D_{15FL} distinguiendo el material lateral: (PLAS= plastilina, ARE= arena).

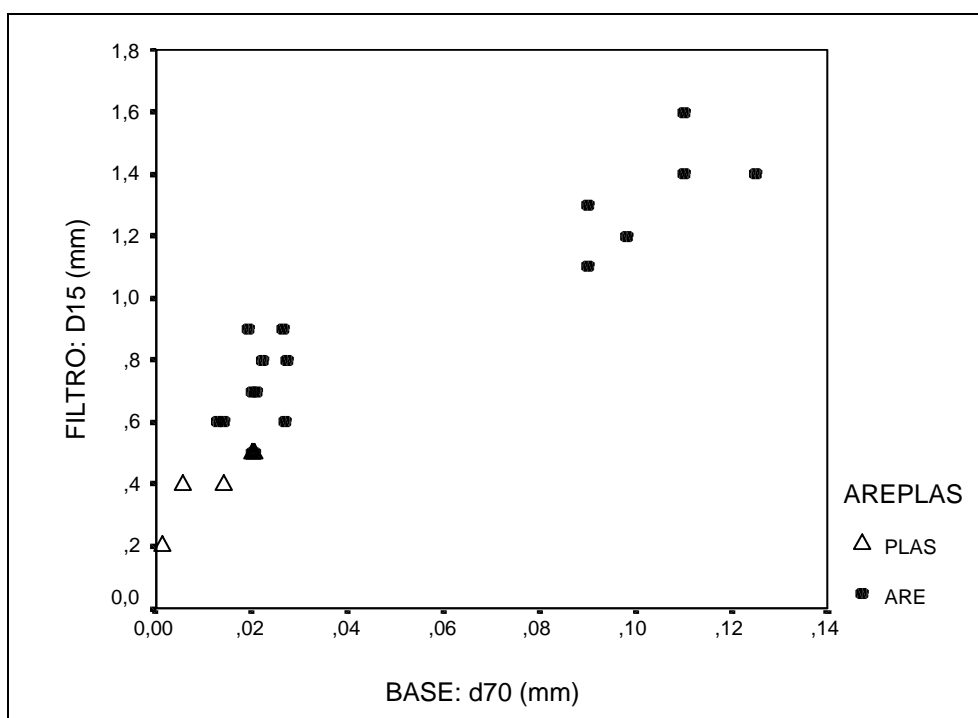


Gráfico 86.- Ensayos NEF Estándar: influencia del material lateral

Aunque los datos disponibles son aun poco numerosos, en principio parece que existe la misma tendencia independientemente del material lateral utilizado.

8.5 Resultados de las variantes del ensayo NEF

8.5.1 Introducción

En los apartados anteriores se han descrito los resultados de los ensayos NEF “Estándar”, habiéndose relatado caso por caso, para reflejar la forma de poder determinar el “Filtro Límite” para cada muestra de suelo base.

Para el resto de las variantes del ensayo NEF, por razón de simplicidad, se van a enumerar los resultados de cada serie de ensayos, sin especificar todos los que se han realizado. En cualquier caso, en las gráficas se van a representar todos los resultados para permitir identificarlos.

8.5.2 Variación de la compactación del filtro

8.5.2.1 Introducción

Como ya se ha comentado anteriormente, para estudiar el efecto de la compactación del filtro se han diseñado tres tipos de ensayos NEF, el “Estándar”, con 60 segundos de vibración por tongada, el “15 Seg. Vibr”, con 15 segundos de vibración y el “2 Min. Vibr.” con 120 segundos.

En apartados anteriores se ha estudiado la relación entre la granulometría del filtro y la porosidad y densidad del mismo, para el caso de 60 segundos de compactación. No es preciso repetir el estudio para distintas compactaciones, pero si es interesante utilizar otra forma de cuantificar la compactación del filtro, mediante la *Densidad Relativa*²⁴, que se define como el estado de compactación de un suelo respecto a los estados más suelto y más compacto en que puede colocarse con los procedimientos de laboratorio, y se expresa como una relación en tanto por ciento, de la diferencia entre el índice de huecos en su estado más suelto y el índice de huecos del suelo “in

²⁴ Ver capítulo 4

situ”, a la diferencia entre los índices de huecos en los estados más sueltos y más compacto. (BOR 1980).

En la presente Investigación se ha determinado las densidades máxima y mínima de los filtros FP-10/0.5 y FP-10/0.7, ya que se son los más frecuentemente empleados en los ensayos NEF realizados y además la variación de la densidad, dentro de los rangos estudiados, es poco sensible al D_{15F} del filtro.

Para el filtro 10/0.5 se tiene que la densidad máxima es de 2.00 gr/cm^3 y la mínima de 1.612 gr/cm^3 , mientras que para el filtro 10/0.7 se tiene 1.967 gr/cm^3 y 1.601 gr/cm^3 , respectivamente.

Dada la densidad de un determinado filtro, D , la densidad relativa, (en %), se calcula con la siguiente expresión:

$$D_{REL} = \frac{D_{MAX} \cdot (D - D_{MIN})}{D \cdot (D_{MAX} - D_{MIN})} \cdot 100 \qquad \text{Ecuación 122}$$

Según esta expresión, los filtros empleados en la presente Investigación han sido compactados con las siguientes densidades relativas, (valores medios):

- 15 Segundos vibrado: 63.2 %
- 60 Segundos vibrado: 78.5 %
- 120 Segundo vibrado: 85.2%

Efectivamente la densidad relativa permite observar, de forma cuantitativa, la diferencia de compactación.

A continuación se estudian los resultados de estas variantes del ensayo NEF.

8.5.2.2 Ensayos NEF "15 Seg. Vibr."

Con esta variante del NEF "Estándar" se han ensayado las bases BFA-C2, BJV-C2, BJV-C5, BJV-C6, BP-C2, BP-C3 y BSC-C4.

Con la base **BFA-C2** se han realizado un total de 9 ensayos ya que ha presentado un comportamiento bastante irregular. Se han ensayado filtros desde $D_{15F} = 0.5$ mm a 1.0 mm, siendo considerado el D_{15FL} el filtro **FP-10/0.5mm**, tanto si se emplea plastilina o arena como material lateral. Estos resultados son un poco desconcertantes y hay que tomarlos con cautela a la espera de realizar las pertinentes comprobaciones y análisis conjunto de resultados.

Por otra parte, la base **BJV-C2** ha obtenido un $D_{15FL} = 0.5$ mm después de realizar 5 ensayos, todos ellos con arena como material lateral. En este caso el comportamiento ha sido bastante regular ya que se ha repetido varias veces el mismo ensayo obteniendo resultados similares.

En cuanto a la base **BJV-C5**, ha necesitado sólo de 3 ensayos para determinar que $D_{15FL} = 0.4$ mm, habiendo sido realizados todos los ensayos también con arena como material lateral.

También ha sido similar el comportamiento de la base **BJV-C6** aunque en este caso han sido 4 ensayos los realizados, obteniéndose $D_{15FL} = 0.5$, (también con arena como material lateral).

Los resultados de la base **BP-C2** (ya incluidos en la *Investigación de Choque*), son muy interesantes porque se han ensayado filtros con diferente D_{100F} de forma que se ha obtenido como filtros límites los filtros **FP-10/0.4** y **FP-20/0.5**, ($D_{100F}=20$ mm, $D_{15F}=0.5$ mm) por lo que se puede concluir que el mayor D_{100F} y por tanto menor pendiente de la curva granulométrica tiene un efecto favorable.

También en la *Investigación de Choque* se ensayó la muestra **BP-C3**, la más estudiada de todas, obteniéndose como filtro límite el **FP-10/0.4**.

Con la muestra **BSC-C1** se ha realizado un solo ensayo por lo que no se han podido obtener conclusiones. Sin embargo, la muestra **BSC-C4**, también procedente de la Presa de San Clemente, ha sido ensayada 4 veces obteniéndose que el filtro límite corresponde a $D_{15FL} = 0.4\text{mm}$.

En la gráfica siguiente se muestran los resultados de todos estos ensayos:

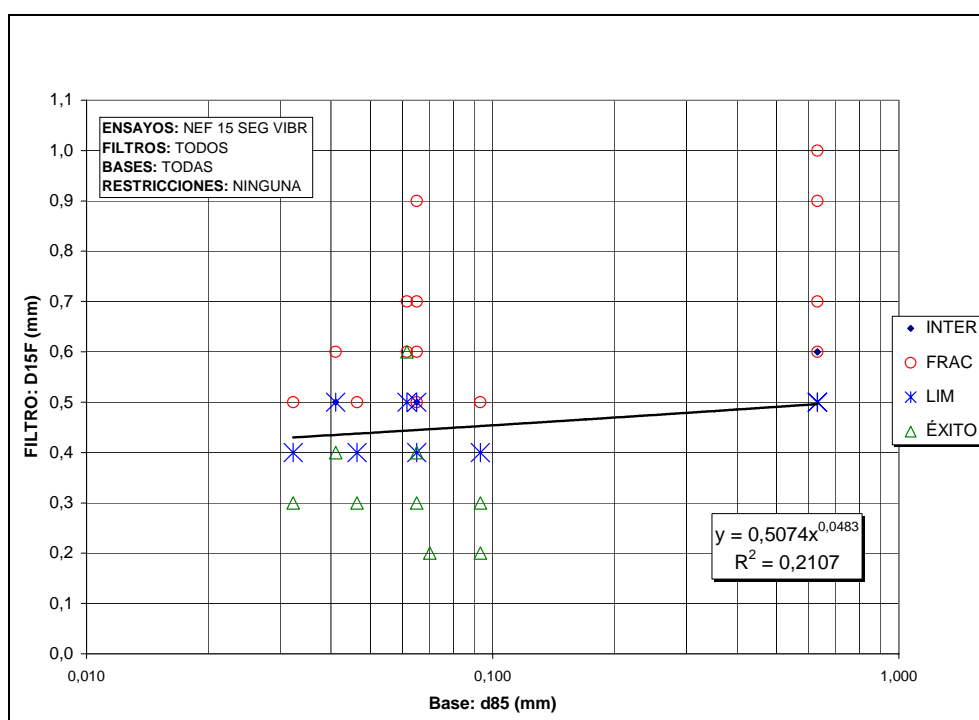


Gráfico 87.- Ensayos NEF “15 Seg. Vibr”: resultados

Como se puede ver, la correlación es muy baja, fundamentalmente debido a la escasa pendiente de la línea de tendencia, lo que indica que si el filtro está poco compactado, el D_{15FL} es muy reducido y casi igual para todas las bases.

8.5.2.3 Ensayos NEF “2 Min. Vibr.”

Esta variante de ensayo se ha empleado con las muestras de suelo base BBA-C1, BCA-C2, BFA-C4, BJV-C2, BJV-C5, BP-C2, BP-C3 y BSC-C4; obteniéndose los resultados que se detallan a continuación.

La muestra **BBA-C1** se ha ensayado 7 veces, con D_{15F} entre 0.5 y 0.9 mm, siguiendo un comportamiento completamente regular de forma que se ha concluido que $D_{15FL} = 0.8 \text{ mm}$, habiéndose empleado en todos los casos plastilina como material lateral.

Un poco más complejo ha sido el comportamiento de la base **BCA-C2**, ya que se han realizado un total de 10 ensayos, obteniéndose $D_{15FL} = 1.1 \text{ mm}$ en la serie que ha empleado arena como material lateral, mientras que se ha obtenido $D_{15FL} = 0.6 \text{ mm}$ en la serie que ha empleado plastilina: Como se puede ver, la diferencia de comportamiento es notable.

También se aprecia una diferencia similar en los resultados de los ensayos con la muestra **BFA-C2**, ya que tiene $D_{15FL} = 1.7 \text{ mm}$, aunque cerca de 1.6 mm, (con arena de material lateral) y $D_{15FL} = 0.9 \text{ mm}$ en el caso de usar plastilina. Este último resultado no es muy fiable porque en toda la serie de ensayos se mantiene un comportamiento regular, según aumenta el D_{15F} , hasta llegar al filtro FP-10/1.0 con el que se produce un cambio muy brusco dando lugar a un aumento considerable de la erosión.

En cuanto a la muestra **BJV-C2**, hay que volver a destacar el gran efecto del tipo de material lateral empleado, ya que al usar arena se tiene que $D_{15FL} = 1.3 \text{ mm}$, mientras que con plastilina se reduce a $D_{15FL} = 0.7 \text{ mm}$, siendo muy regular el comportamiento del ensayo en ambas series.

La muestra **BJV-C5** se ha ensayado 5 veces empleando arena como material lateral, obteniéndose que $D_{15FL} = 0.9 \text{ mm}$, no habiendo sido posible determinar el D_{15FL} para el caso de la plastilina ya que sólo se pudo ensayar con este material lateral el filtro FP-10/0.8, pero se produjo una enorme erosión, con un volumen total recogido de 137.330 cm^3 , mientras que con el material lateral de arena, ese mismo filtro se ensayó dos veces con sendos “Éxitos” y unos volúmenes de sólo 4870 y 8370 cm^3 respectivamente.

En cuanto a las muestras correspondientes a la Presa del Portillo, hay que señalar que la **BP-C2** sólo se ha ensayado dos veces, sin obtener resultado concluyente, mientras que con la **BP-C3** se han realizado 23 ensayos NEF. El elevado número de ensayos realizados se debe al irregular comportamiento en función del material lateral empleado y a la aparición de series de ensayos con resultados anómalos. Tras un detenido estudio de estos resultados se ha concluido que en el caso de plastilina como material lateral se obtiene $D_{15FL} = 0.7 \text{ mm}$, mientras que si se emplea arena se eleva a **1.2 mm**.

Por último es muy interesante destacar el resultado de los ensayos realizados con la muestra **BZA-C1**, la más fina de todas las ensayadas, ya que ha obtenido $D_{15FL} = 0.5 \text{ mm}$ frente al $D_{15FL} = 0.2 \text{ mm}$ resultado de los ensayos NEF "Estándar", habiéndose empleado en ambos casos plastilina como material lateral.

A continuación se adjunta un gráfico que contiene todos los resultados, incluidos los que pueden considerarse anómalos y los que han empleado distinto tipo de material lateral.

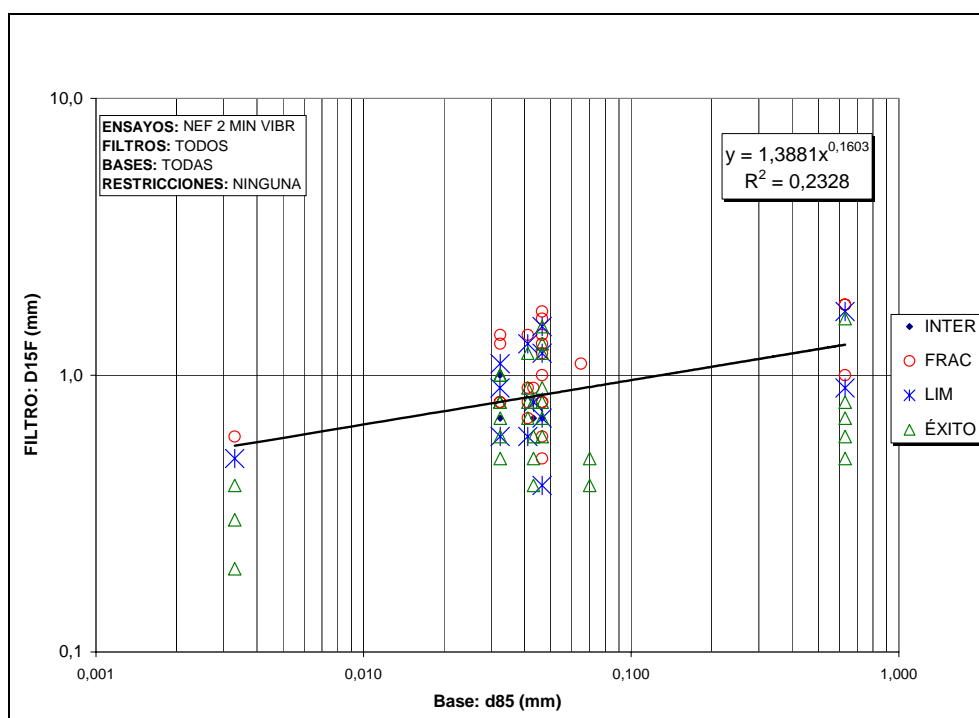


Gráfico 88.- Ensayos NEF “2 Min. Vibr”: resultados

Como se puede ver, existe una gran dispersión en los resultados que se debe fundamentalmente a la gran diferencia entre el resultado obtenido cuando se emplea arena como material lateral, al obtenido cuando se emplea plastilina, siendo en todos los casos mayor el D_{15FL} en el caso de la arena. Además se aprecia que la diferencia entre ambos resultados es mayor cuanto más grueso es el filtro.

Una posible explicación de este fenómeno es que al compactar con vibración se puede producir una migración de las partículas de arena del material lateral hacia la superficie del filtro de forma que se reduce el tamaño teórico de los poros con respecto al existente al emplear plastilina y por lo tanto no producirse dicha migración.

Este efecto se acentúa cuanto más grueso es el filtro ya que también son mayores los poros de éste y por tanto más susceptibles de verse taponados por las partículas de arena del material lateral.

Ante este efecto se ha considerado adoptar en cada caso el resultado más desfavorable, que corresponde al empleo de plastilina como material lateral, y realizar un estudio estadístico de la tendencia global con análisis de los residuos tipificados que permitan detectar valores anómalos.

8.5.2.4 Conclusiones

Para estudiar el efecto de la compactación del filtro se han realizado series de ensayos con tres energías de compactación diferentes según el tiempo de vibración por tongada: 15, 60 o 120 segundos respectivamente.

Como era de esperar, para un mismo filtro, al aumentar la energía de compactación se reduce su porosidad y su permeabilidad, pero no se sabía hasta ahora si esto influye en el comportamiento frente a la erosión interna de las bases cohesivas.

De los ensayos realizados se puede concluir que efectivamente la compactación afecta sensiblemente al valor del D_{15FL} , reduciéndolo cuanta mayor es la energía de compactación.

Para poder ver esta influencia de la compactación de forma cualitativa, se ha elaborado un gráfico que representa en abscisas el D_{15FL} obtenido en los ensayos NEF "Estándar" (60 segundos de vibración) y en ordenadas se representa el cociente entre el D_{15FL} para cada energía de compactación, (15 o 120 segundos) y el D_{15FL} del ensayo NEF "Estándar".

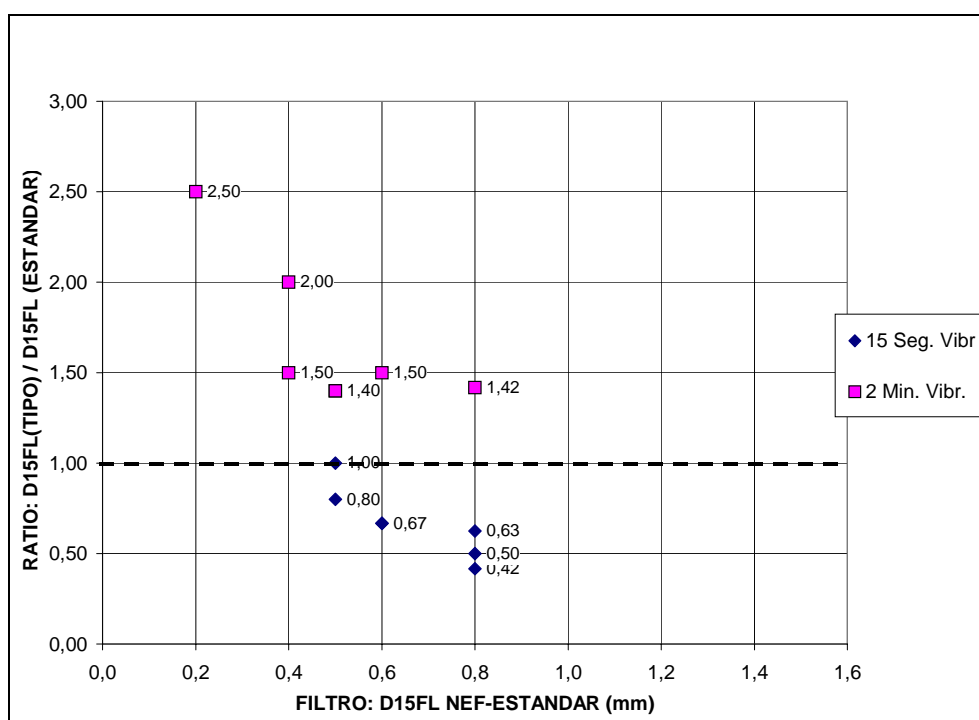


Gráfico 89.- Influencia de la compactación del filtro

En el gráfico se ve perfectamente que en el caso de 2 minutos de vibración, el D_{15FL} es siempre mayor que en el caso Estándar (60 segundos de vibrado), incluso llegando a ser más del doble. Sin embargo, al compactar con 15 segundos de vibrado se obtiene un D_{15FL} menor que el Estándar, aunque las diferencias relativas son menores.

Este resultado es muy interesante porque ya se insistió en el capítulo 2 que la mayoría de los investigadores no le prestan atención a la compactación del filtro.

Una vez constatada la clara influencia cualitativa de esta variable hay que tratar de cuantificarla y realizar un estudio estadístico que permita detectar resultados anómalos.

Puesto que con los ensayos NEF "Estándar" se obtuvo que la mejor relación entre la granulometría de la base y el filtro límite es $D_{15FL} - d_{70B}$ se ha estudiado la regresión lineal para cada tiempo de vibrado y la conjunta, es decir, sin distinguir el tiempo de vibrado.

Del análisis de los residuos tipificados se puede concluir que los datos correspondientes a los ensayos NEF 176, 315, 387 y 389 pueden considerarse anómalos.

El ensayo NEF-176 y el 387 corresponden a la base BFA-C2 con "15 Seg. Vibr." que efectivamente ya se había detectado de forma cualitativa su carácter anómalo. El ensayo NEF-389 es del tipo NEF "Estándar" y ya se detectó en el estudio de los resultados de los ensayos Estándar, mientras que el NEF-315 corresponde a "2 Min. Vibr."

Eliminando dichos ensayos anómalos y teniendo en cuenta el ya estudiado efecto del material lateral, se obtiene la siguiente representación gráfica:

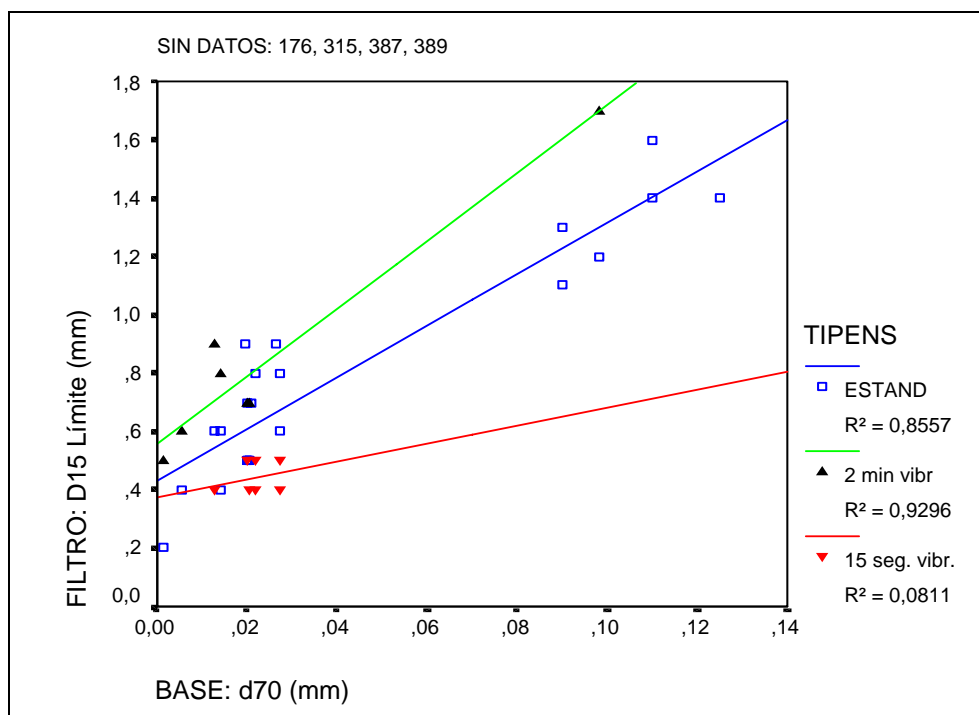


Gráfico 90.- Relación D_{15FL} – d_{70B} según la compactación del filtro

En el gráfico se aprecia claramente el efecto de la compactación, de forma que las tendencias son divergentes, disminuyendo la pendiente de la línea de tendencia al disminuir la compactación, sin embargo, el escaso número de ensayos “15 Seg. Vibr.” para bases con d_{70B} mayores de 0.04 mm no permite dar validez a la tendencia representada para esta serie.

Según estos resultados, el diseño del filtro considerando únicamente su granulometría representada por el D_{15F} , está fuertemente influido por la compactación.

Es por ello interesante comprobar si ocurre lo mismo si se emplea la permeabilidad del filtro como variable de diseño.

En este caso se obtiene el siguiente gráfico:

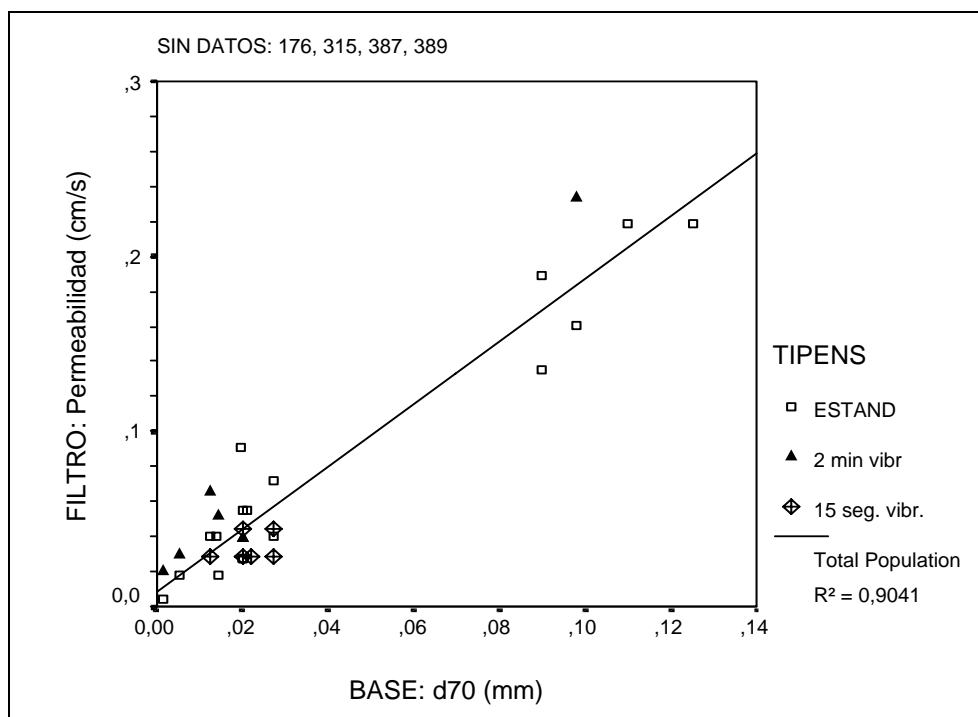


Gráfico 91.- Relación entre la permeabilidad del filtro y el d_{70B} de la base, según la compactación del filtro

Efectivamente al utilizar la permeabilidad del filtro como variable de diseño parece reducirse la influencia de la compactación del filtro ya que en el gráfico se observa una tendencia muy clara que permite prácticamente despreciar el efecto de la compactación.

Interesa por tanto hacer un estudio de la regresión lineal $k_{FL} - d_{70B}$ pero de forma conjunta, incluyendo a la vez las tres energías de compactación.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Resumen del modelo^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,951 ^a	,904	,901	2,05745E-02

a. Variables predictoras: (Constante), Bd_{70}

b. Variable dependiente: FKD_{15Tv}

Coefficientes^a

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%	
	B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior
1 (Constante)	7,982E-03	,005		1,577	,125	-,002	,018
Bd70	1,792	,107	,951	16,821	,000	1,575	2,010

a. Variable dependiente: FKD15Tv

Tabla 67.- Regresión lineal entre la permeabilidad del filtro y el d_{70B} para cualquier energía de compactación del filtro

Como se puede ver, la correlación es muy alta, además no hay ningún dato con un residuo tipificado superior a 3 y que por tanto pueda considerarse anómalo. Sin embargo hay que destacar que la constante del modelo, (0.008), tiene una significación de 0.125 y contiene al 0 en el intervalo de confianza del 95% por lo que viene a indicar que se puede obtener un modelo sin ordenada en el origen de la forma $k_F = a \cdot d_{70B}$, efectivamente, volviendo a estudiar la regresión lineal pero sin término independiente se obtiene:

$$K_F \leq 1.91 d_{70B} \quad R^2=0.90 \quad (k_F \text{ cm/s, } d_{70B} \text{ mm})$$

Ecuación 123

Teniendo la constante un valor que oscila entre 1.75 y 2.07 para el intervalo de confianza del 95%.

A efectos de recomendación de diseño es conveniente utilizar la envolvente inferior de la tendencia observada, tal y como se presenta en el siguiente gráfico:

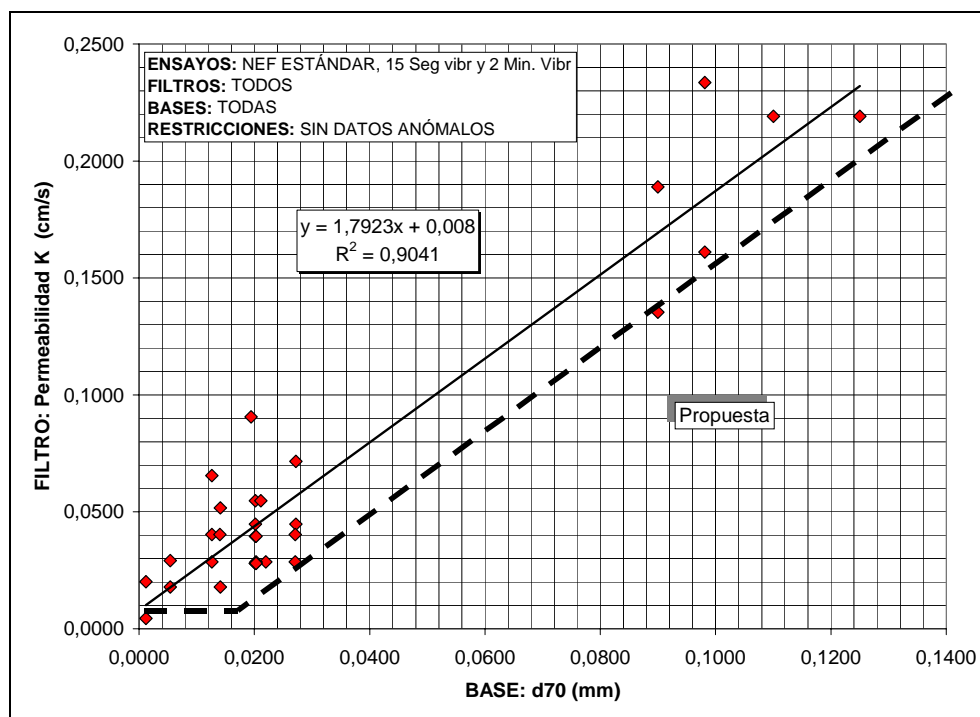


Gráfico 92.- Propuesta de diseño $k_{FL}-d_{70B}$

Pero para mayor simplicidad y seguridad, es preferible recomendar el siguiente criterio de diseño:

$$K_F \leq 1.75 d_{70B} \quad (k_F, \text{ cm/s y } d_{70B}, \text{ mm}) \quad \text{Ecuación 124}$$

Esta expresión tiene una probabilidad de fallo inferior al 5% aun en las circunstancias tan exigentes del ensayo NEF.

En cualquier caso, para poder comparar los resultados con los de otros investigadores, es interesante estudiar una relación del tipo k_F-d_{85B} , obteniéndose:

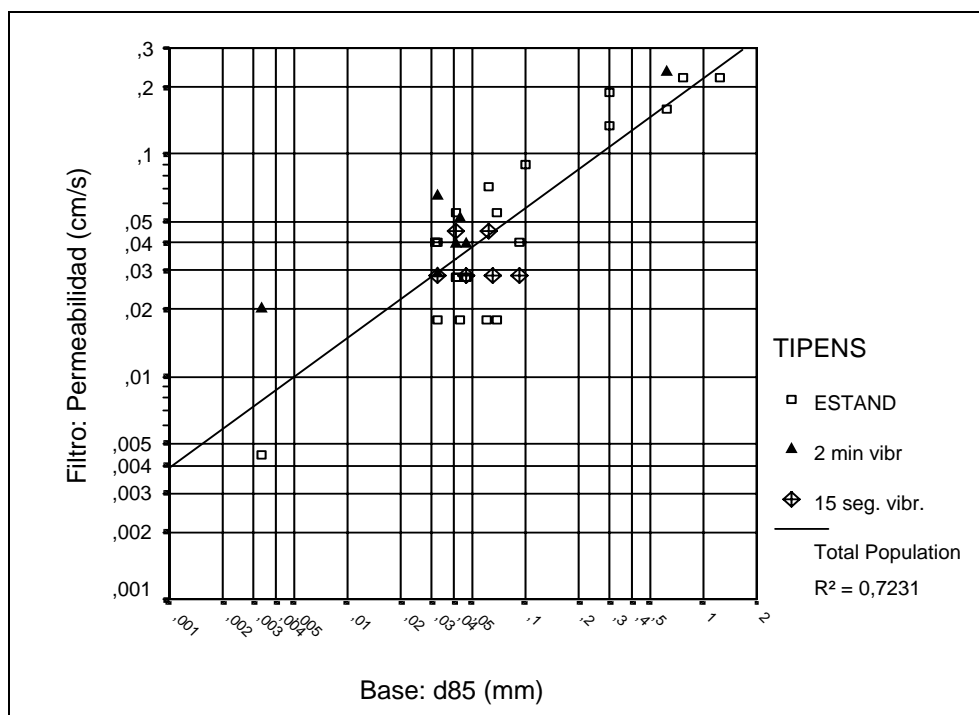


Gráfico 93.- Relación entre la permeabilidad del filtro y el d_{85B} de la base, según la compactación del filtro

Come se puede apreciar en el gráfico, no es posible encontrar una relación k_F - d_{85B} del tipo lineal, si no es doble escala logarítmica.

Calculando el mejor modelo de regresión se obtiene la siguiente expresión:

$$K_F = 0.2345 d_{85B}^{0.56} \quad R^2=0.859 \quad (K_F \text{ cm/s. } d_{85B} \text{ mm}) \quad \text{Ecuación 125}$$

Por lo tanto, se descarta el empleo del d_{85B} a favor del d_{70B} por ser de menor precisión y expresión más compleja.

8.5.3 Variación de la humedad de compactación del suelo base

8.5.3.1 Introducción

Aunque inicialmente se pretendía estudiar la influencia tanto de la humedad como de la energía de compactación, en la *Investigación de Choque* se decidió abandonar el estudio de la influencia que, sobre los resultados de los ensayos NEF, pueda tener

una mayor energía de compactación del suelo base. Sin embargo si se vio una clara influencia de la humedad, de forma que para contenidos de agua en el suelo base superiores a la humedad óptima del ensayo próctor normal, el D_{15FL} necesario es menor.

Sin embargo los datos disponibles en esa fase no son suficientes para sacar conclusiones definitivas por lo que es procedente realizar más ensayos NEF modificando la humedad del suelo base.

Por ello se han ideado distintas variantes del ensayo NEF "Estándar" que se denominan genéricamente "Lado Seco" o "Lado Húmedo" según si la humedad de compactación es inferior o superior, respectivamente, a la óptima +1%.

8.5.3.2 *Resultados*

Aparte de los ensayos NEF "Estándar" que emplean como humedad de compactación la óptima +1%, hay 5 bases con las que se han realizado series de ensayos en los que la humedad de compactación ha sido diferente: BBA-C1, BFA-C2, BJV-C1, BJV-C2 y BP-C3.

Con la base **BBA-C1** se obtuvo $D_{15FL} = 0.4$ para el ensayo NEF "Estándar" que en este caso se corresponde con una humedad de compactación del 23.84%. Posteriormente se ha ensayado esta misma base pero con una humedad del 16.01% obteniéndose $D_{15FL} = 0.5$ mm, es decir, muy similar pero superior. Pero lo que resulta verdaderamente desconcertante es que al realizar una serie de ensayos con una humedad del 21%, ligeramente inferior a la óptima, se produjo un fracaso del filtro FP-10/0.3 y el filtro FP-10/0.2 por lo que se ha tenido que adoptar un $D_{15FL} = 0.1$ mm aunque este filtro no fuese ensayado.

Este resultado es sorprendente porque no se conocía ningún fracaso para $D_{15F} = 0.2$ mm, por lo que hay que ser muy cautos al aceptarlo, sin embargo es muy interesante de cara a futuras investigaciones.

En cuanto a la muestra **BFA-C2**, el ensayo NEF "Estándar" corresponde a una humedad del 14.61%, siendo $D_{15FL} = 1.2\text{mm}$, mientras que con una humedad del 6.88% el D_{15FL} se redujo hasta **0.8 mm**.

Con la muestra **BJV-C1**, se ha comprobado el efecto de una mayor humedad que la óptima, ya que con una humedad del 11.76% (NEF "Estándar") tiene $D_{15FL} = 1.3\text{ mm}$ mientras que al aumentar la humedad hasta el 19.81% el D_{15FL} pasa a **1.0mm**.

Pero es la muestra **BJV-C2** la que muestra un comportamiento más constante, ya que siendo el D_{15FL} para el ensayo NEF "Estándar", (14% de humedad), igual a **0.5mm**, para humedades del 7.66, 7.75 y 21.27% respectivamente, el resultado se mantiene **invariable**.

Por último, como se vio en la *Investigación de Choque*, la muestra **BP-C3** se ha ensayado también con humedades muy diferentes, obteniéndose $D_{15FL} = 0.5\text{mm}$ para el ensayo NEF "Estándar", (14% de humedad), mientras que resulta **0.9mm** para 7.64%, **0.5mm** para 20.30% y **0.3mm** para 24.97%; por lo que parece que el D_{15FL} va disminuyendo al aumentar la humedad de compactación.

En la siguiente tabla se pueden ver los resultados resumidos:

NEF ENSAYO	FILTRO F-CLAVE	BASE B-CLAVE	% EB-Hum	hum/hopt EB-RH	gr/cm3 EB-D.Sec	den/Dmax EB-rDens	PREP.ENS TIPO ENSAYO	RES.ENSAYO VALORACION
NEF-404	FP-10/0,5	BBA-C1	16,01	0,73	1,68	1,04	HUM 16%	EXITO
NEF-397	FP-10/0,2	BBA-C1	20,99	0,96	1,54	0,95	HUM LP	FRACASO
NEF-356	FP-10/0,4	BBA-C1	23,84	1,09	1,55	0,96	ESTAND	EXITO
NEF-168	FP-10/0,8	BFA-C2	6,88	0,54	1,86	1,01	Lado Seco	EXITO
NEF-305	FP-10/1,2	BFA-C2	14,61	1,15	1,96	1,06	ESTAND	INTERMEDIO
NEF-72	FP-10/1,3	BJV-C1	11,76	1,12	2,04	1,03	ESTAND	EXITO
NEF-103	FP-10/1,0	BJV-C1	19,81	1,89	1,85	0,93	Lado Hum.	EXITO
NEF-408	FP-10/0,5	BJV-C2	7,66	0,57	1,84	1,02	HUM 7%	EXITO
NEF-217	FP-10/0,5	BJV-C2	7,75	0,58	1,87	1,04	Lado Seco	EXITO
NEF-299	FP-10/0,5	BJV-C2	13,99	1,05	1,85	1,03	ESTAND	EXITO
NEF-93	FP-10/0,5	BJV-C2	14,33	1,07	1,88	1,05	ESTAND	EXITO
NEF-400	FP-10/0,5	BJV-C2	21,27	1,59	1,58	0,88	HUM 20%	EXITO
NEF-216	FP-10/0,9	BP-C3	7,64	0,60	1,94	1,03	Lado Seco	EXITO
NEF-293	FP-10/0,5	BP-C3	13,31	1,04	1,90	1,01	ESTAND	EXITO
NEF-61	FP-10/0,5	BP-C3	14,37	1,12	1,90	1,01	ESTAND	EXITO
NEF-361	FP-10/0,5	BP-C3	20,30	1,58	1,61	0,86	HUM LP	INTERMEDIO
NEF-50	FP-10/0,3	BP-C3	24,97	1,95	1,57	0,84	Lado Hum.	FRACASO

Tabla 68.- Influencia de la humedad del suelo base

Donde $EB-Hum$ es la humedad de la base, en %, $EB-RH$ es el cociente humedad base/humedad óptima, $EB-D.Sec$ es la densidad seca y $EB-rDens$ es la ratio densidad base / densidad máxima próctor.

8.5.3.3 Conclusiones

Como se puede ver, el comportamiento general de las bases ensayadas modificando la humedad de compactación no sigue una pauta fija, así por ejemplo, en algunos casos parece que una mayor humedad produce un D_{15FL} también mayor, sin embargo, en el caso de humedades por el lado seco la influencia no está clara.

Teniendo en cuenta que Kabasy (1993) señala que la menor dispersabilidad se produce precisamente para la humedad óptima, siendo mayor la erosión tanto para humedades mayores como para menores, sería de esperar un resultado análogo, sin embargo sólo se puede afirmar que el exceso de humedad sobre la óptima es perjudicial.

En el siguiente gráfico se puede ver de forma cualitativa la influencia de la humedad, representado en abscisas el D_{15FL} obtenido en los ensayos NEF "Estándar" y en ordenadas el cociente entre dicho D_{15FL} y el obtenido para una humedad por el lado seco o por el húmedo:

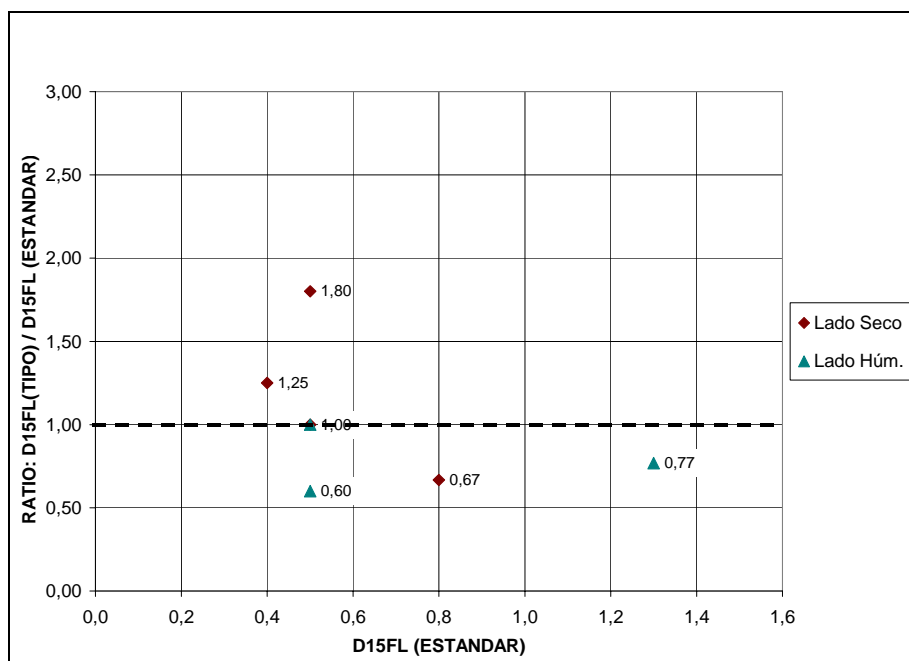


Gráfico 94.- Influencia de la humedad del suelo base

Parece por tanto que no es posible cuantificar el efecto de la humedad, no quedando clara la influencia de la humedad por el **lado seco**, sin embargo, una compactación por el **lado húmedo** puede llegar a disminuir el D_{15FL} pasando de 0.5 mm a 0.3 mm, lo que supondría que en presas donde los filtros han sido diseñados considerando la humedad de puesta en obra, la existencia accidental o intencionada²⁵ de zonas de mayor humedad pueden suponer un mayor riesgo de erosión interna.

Sin embargo parece necesario e interesante realizar más ensayos de comprobación para poder obtener unos resultados más concluyentes, pero es muy importante haber detectado su posible influencia.

²⁵ En el contacto del núcleo con el cemento y los estribos se suele compactar con mayor humedad para favorecer el deslizamiento y reducir la fisuración

8.5.4 Empleo de aditivos al suelo base

8.5.4.1 Introducción

Kabasy (1993) ha observado que ciertas sales añadidas al suelo base consiguen disminuir considerablemente su dispersabilidad, sin embargo no se conoce si también estos aditivos afectan al diseño del filtro crítico necesario.

En la presente investigación se ha estudiado el efecto del sulfato de aluminio potásico como aditivo.

8.5.4.2 Resultados

En la *Investigación de Choque* se ha ensayado la muestra **BP-C3** añadiéndole sulfato de aluminio potásico o bentonita, para estudiar su efecto.

Respecto a la **bentonita** no se han obtenido resultados firmes y además existe una gran dificultad en conseguir una muestra homogénea por lo que se ha decidido abandonar su estudio. Sin embargo, el efecto del **sulfato de aluminio** ha quedado claramente de manifiesto ya que con la adición de un 1% respecto al peso seco de la muestra de suelo base, el D_{15FL} pasa de **0.5 mm** para el ensayo NEF "Estándar" a **0.6 mm**, mientras que si la cantidad de aditivo asciende al 3%, el D_{15FL} correspondiente es de **0.7 mm**.

En la *Investigación de Fondo* se ha estudiado el efecto del sulfato de aluminio sobre las muestras de suelo base BFA-C2 y BZA-C1.

Con la muestra **BFA-C2** se han realizado 4 ensayos NEF con un 3% de sulfato de aluminio, produciéndose un “Fracaso” con los filtros FP-10/0.8 y FP-10/0.7, mientras que los filtros FP-10/0.6 y FP-10/0.5 dieron lugar a sendos ensayos calificados como “Éxito”, por lo que el D_{15FL} es igual a **0.6 mm**. En los ensayos NEF "Estándar" se obtuvo $D_{15FL} = 1.2 \text{ mm}$ y por lo tanto en este caso el efecto es claramente **desfavorable**.

Sin embargo, la muestra de la Presa de Zahara, **BZA-C1**, con un marcado carácter dispersivo, mostró un comportamiento claramente **favorable** a la adición de sulfato de aluminio, ya que con un 3% de este aditivo, tras realizar 5 ensayos NEF se obtuvo un **D_{15FL}** de **0.5 mm**, mientras que en el ensayo NEF "Estándar" el resultado fue **D_{15FL} =0.2mm**.

8.5.4.3 Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta fase son muy interesantes puesto que se ha podido comprobar que la adición de sulfato de aluminio al suelo base en cantidades no superiores al 3% afecta considerablemente al diseño del filtro crítico preciso, pero no siempre en el mismo sentido.

Así por ejemplo, el efecto es claramente favorable para las arcillas de la Presa del Portillo y Zahara mientras que es desfavorable para la muestra de la Presa de Francisco Abellán.

No resulta sorprendente el efecto sobre la muestra BFA-C2 ya que en las fases anteriores se ha comprobado que esta muestra presenta un comportamiento muy irregular en los ensayos NEF, de forma que muchos de los ensayos que estadísticamente se han considerado anómalos corresponden a esta base.

No es sencillo encontrar una explicación a este comportamiento, pero hay que insistir en que la muestra BFA-C2 tiene sólo un 68% de finos inferiores a 0.08mm y un 28.5% del tamaño arcilla, (inferior a 0.002mm), por lo que en la granulometría predomina el tamaño limo y arena. Además, la diferencia entre la granulometría con y sin dispersante es muy pequeña y sólo afecta a tamaños inferiores al d_{70B} , que se ha constatado como el tamaño que mejor representa el comportamiento del suelo base.

Si, como comprobó Kabasy (1993), el efecto coagulante se hace notar en las partículas arcillosas, es lógico pensar que en el caso de la muestra BFA-C2 no afecte

para nada al d_{70B} ya que es de 0.098 mm, ni al $P_{0.08B}$ (porcentaje de finos inferiores al tamiz de 0.08mm), siendo estas dos variables las que determinan el valor del D_{15FL} .

Sin embargo, las muestras BZA-C1 y BP-C3 son totalmente diferentes a la BFA-C2, ya que tienen un contenido de finos del 99.25% y el 80.78% respectivamente. Además, la fracción arcilla, (tamaño inferior a 0.002mm), que es la que se ve más afectada por el efecto coagulante, es un 78% en la BZA-C1 y un 30% en la BP-C3.

En el gráfico siguiente se representa en abscisas el porcentaje de finos del suelo base y en ordenadas el cociente entre el D_{15FL} obtenido con un 3% de sulfato de aluminio y el D_{15FL} del ensayo NEF "Estándar".

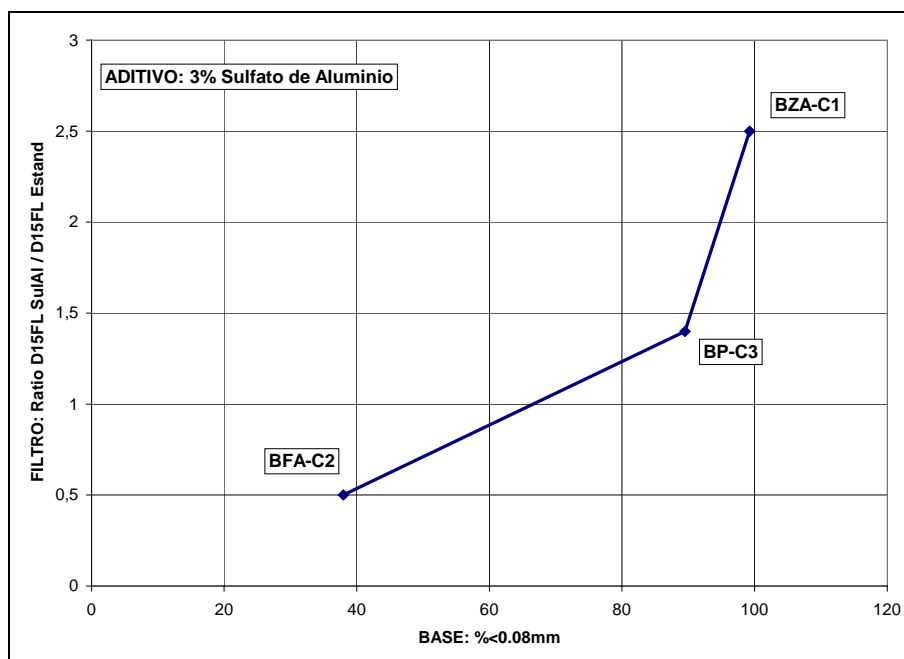


Gráfico 95.- Influencia de la adición de sulfato de aluminio

Efectivamente se observa una clara dependencia del efecto del sulfato de aluminio respecto al porcentaje de finos del suelo base.

Sería interesante en futuras investigaciones profundizar más sobre estos interesantes resultados, ya que los datos disponibles son insuficientes para dar unas reglas

generales, pero resulta muy importante haber detectado esta influencia del sulfato de aluminio y sobre todo demostrar que el efecto esperable no es siempre positivo.

También hay que destacar el resultado de la muestra BZA-C1, ya que, siendo dispersiva y muy fina, gracias al sulfato de aluminio el filtro necesario es similar al de otras muestras no dispersivas.

A pesar de ello, aunque los aditivos tienen un uso muy extendido en la estabilización de suelos empleados en la construcción de carreteras, es difícil que se pueda llegar a diseñar filtros menos estrictos en presas de materiales sueltos con arcillas dispersivas que empleen aditivos como el sulfato de aluminio.

Sin embargo, pueden ser útiles en zonas delicadas de la presa, como apoyos sobre obras de fábrica o cimientos diaclasados, aunque siempre con un filtro adecuado y comprobando que el sulfato de aluminio no afecte negativamente a otras propiedades geotécnicas del suelo base.

Pero aparte de la posibilidad o no de aplicación práctica, hay que destacar que, puesto que Kabasy (1993) ha demostrado que el sulfato de aluminio reduce la dispersabilidad y en la presente investigación se ha comprobado que también puede aumentar el D_{15FL} necesario, se puede concluir que efectivamente la dispersabilidad del suelo base tiene influencia en el diseño del filtro granular necesario, ya que el aditivo, en tan bajas proporciones, no afecta significativamente a la granulometría del suelo base.

8.5.5 Variación de las condiciones de flujo

8.5.5.1 Introducción

En los ensayos NEF "Estándar" se ha empleado una presión de 4 kg/cm^2 a través de una pastilla de suelo base de 2.54 cm de espesor, sin embargo, para poder estudiar la influencia de dicha presión se han realizado algunos ensayos con una presión menor,

en concreto 2 kg/cm^2 , no habiéndose podido ensayar una presión mayor debido a la falta de resistencia de la probeta de perpex.

8.5.5.2 Ensayos NEF "2 Kg. Pres."

Esta variante del ensayo NEF "Estándar" mantiene las mismas condiciones de compactación y humedad de las muestras ensayadas, variando únicamente la presión de agua a la entrada, que tiene un valor de 2 kg/cm^2 .

Con esta presión se han ensayado las muestras BCA-C2, BFA-C2, BJV-C2, BJV-C5, BJV-C6, BP-C3 y BSC-C5.

La muestra **BCA-C2** ha dado lugar a ensayos calificados como Éxito con los filtros FP-10/0.3, FP-10/0.4 y FP-10/0.5; mientras que con el filtro 10/0.6 el diámetro final del orificio aumenta hasta 5 mm, teniendo un volumen total de agua de salida de 27900 cm^3 , por lo tanto se ha adoptado $D_{15FL} = 0.5 \text{ mm}$, pero hay que tener en cuenta que la brusquedad de la erosión para $D_{15F} = 0.6 \text{ mm}$ obliga a tomar este resultado con cierta cautela.

Esta misma muestra de suelo base tiene un $D_{15FL} = 0.4 \text{ mm}$ para el ensayo NEF "Estándar", luego los resultados son similares.

En cuanto a la base **BFA-C2**, se ha ensayado los filtros FP-10/0.4, FP-10/1.5 y FP-10/1.6, dando lugar a Éxito los dos primeros mientras que el último fracasó, con un volumen total de 33330 cm^3 , por lo que se ha considerado $D_{15FL} = 1.5 \text{ mm}$, aunque de nuevo hay que ser cautos dado el brusco cambio en el comportamiento del ensayo.

En comparación con los resultados del ensayo NEF "Estándar", con $D_{15FL} = 1.2 \text{ mm}$, hay que señalar que de nuevo aparece un D_{15FL} mayor al disminuir la presión.

La muestra **BJV-C2** ha mostrado un comportamiento más regular, ya que el filtro FP-10/0.5 ha dado lugar a "Éxito", con un volumen de 1520 cm^3 , mientras que el ensayo con el filtro FP-10/0.6 ha sido calificado como "Intermedio", con un volumen

de 4550 cm³. Por último, el filtro FP-10/0.7 ha producido un "Fracaso" al tener un volumen final de 7125 cm³ pero con un diámetro del orificio en la pastilla de suelo base de 2mm. Por lo tanto se ha considerado $D_{15FL} = 0.6\text{mm}$, mientras que en el ensayo NEF "Estándar" se obtuvo $D_{15FL} = 0.5\text{mm}$, por lo que se mantiene la tendencia de un filtro límite ligeramente más grueso al disminuir la presión.

En cambio, con la muestra **BJV-C5** no se ha detectado dicha influencia de la presión, ya que tanto en el ensayo NEF "Estándar" como en el ensayo "2 kg. Pres." se ha obtenido $D_{15FL} = 0.6\text{mm}$. Algo similar ocurre con la muestra **BJV-C6**, ya que en ambas versiones del ensayo NEF se ha obtenido $D_{15FL} = 0.8\text{mm}$.

De nuevo es la muestra **BP-C3** la que más veces se ha ensayado, como se vio en la *Investigación de Choque*, teniendo $D_{15FL} = 0.7\text{mm}$ para la presión de 2 kg/cm² mientras que $D_{15FL} = 0.5\text{mm}$ para un valor de presión de 4 kg/cm².

Pero vuelve a ser destacable el comportamiento de la muestra de la Presa de Zahara, **BZA-C1**, ya que con 2 kg/cm² de presión se ha obtenido un D_{15FL} igual a **0.5 mm**, mientras que en el ensayo NEF "Estándar" se obtuvo $D_{15FL} = 0.2\text{mm}$, con lo que la diferencia es apreciable.

A continuación se presenta un gráfico con dichos resultados:



Gráfico 96.- Resultado de los ensayos NEF con 2 kg/cm² de presión

Como se puede ver existe una muy buena tendencia entre el D_{15FL} y el d_{85B}.

8.5.5.3 Conclusiones

La variación de la presión del ensayo ha mostrado una influencia cualitativa que se aprecia en la siguiente gráfica:

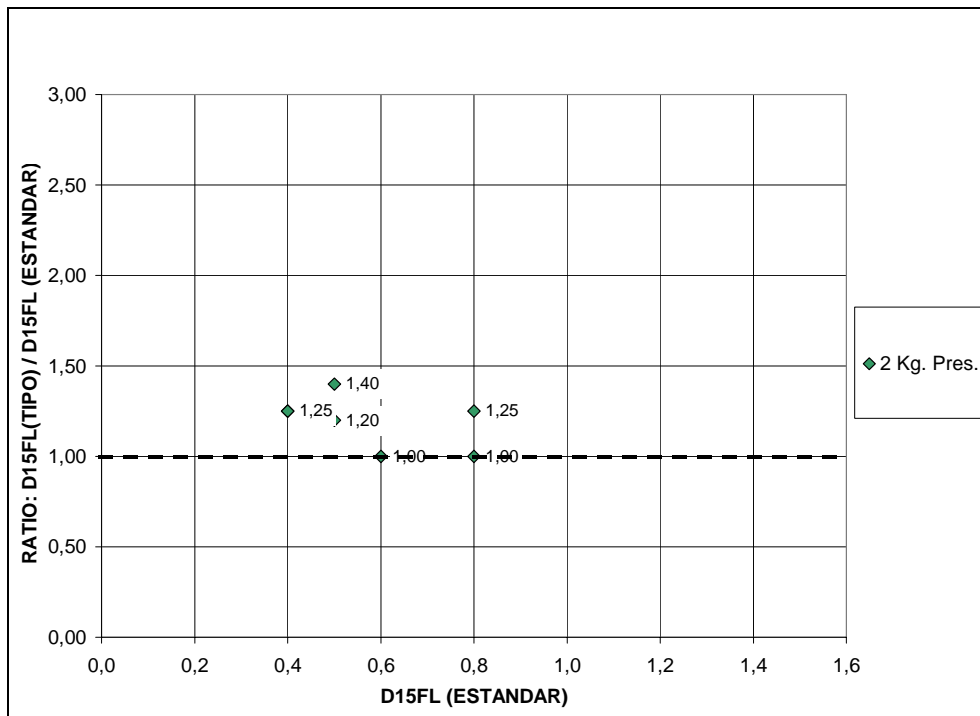


Gráfico 97.- Influencia de la presión de agua (I)

Como se puede ver, en todos los casos el D_{15FL} para la presión de 2 kg/cm^2 es igual o ligeramente superior, sin embargo es interesante comprobar si las diferencias son lo suficientemente significativas, para lo cual se ha realizado una gráfica en la que se muestra de forma conjunta la tendencia $D_{15FL} - d_{70B}$:

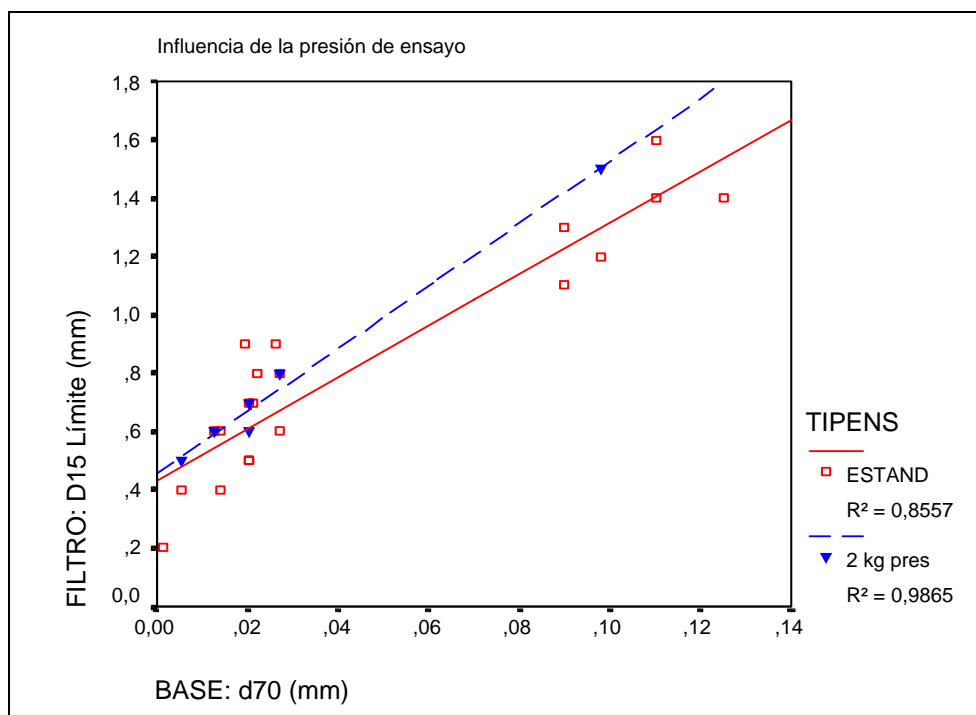


Gráfico 98.- Influencia de la presión de agua (II)

Como se puede ver, efectivamente los resultados para 2 kg/cm² de presión tienen una tendencia que se sitúa por encima de la encontrada para el doble de presión, sin embargo las diferencias cuantitativas no son considerables.

Se puede por ello concluir que efectivamente la presión es una variable influyente, pero cuyo efecto es poco apreciable en los rangos estudiados.

8.5.6 Variación de la duración del ensayo

Todos los ensayos NEF de la presente investigación han tenido una duración de 20 minutos, ya que se comprobó previamente en la fase de Puesta a Punto del Ensayo y se verificó en la *Investigación de Choque* que cuando un filtro funciona, el proceso de interceptación de partículas del suelo base tiene lugar en los primeros minutos, apareciendo el agua de salida casi completamente clara después de este tiempo.

Efectivamente algunos filtros han conseguido detener la erosión en un tiempo mayor, pero en todos los casos el diámetro final del orificio excede de 2 mm y por tanto, dado la rigurosidad del criterio "Éxito / Fracaso" del ensayo NEF, estos ensayos se han considerado como "Fracaso".

Sin embargo, en la presente investigación se ha considerado interesante realizar un ensayo de larga duración con la única intención de estudiar si se produce alguna modificación de los resultados.

En concreto, con la muestra **BP-C3** se ha ensayado el filtro FP-10/0.5 manteniendo el flujo de agua durante 28 horas. Es de destacar que desde los primeros cinco minutos el agua del ensayo salió clara, al igual que ocurriera en el ensayo NEF "Estándar", pero se mantuvo así durante todo el resto del ensayo, presentándose la peculiaridad que tras producirse un corte temporal del suministro eléctrico y por tanto paralizarse el flujo de agua, el caudal aumentó ligeramente al reanudarse el ensayo.

Aunque sólo se realizara un ensayo de comprobación parece suficiente para concluir que con los gradientes hidráulicos empleados en los ensayos NEF, la determinación del D_{15FL} no varía según la duración del ensayo, por supuesto siguiendo el estricto criterio de "Éxito / Fracaso" del ensayo NEF de Sherard y Dunningan (1985).

8.5.7 Variación del diámetro del orificio en la pastilla de suelo base

En todos los ensayos el diámetro del orificio realizado en la pastilla de suelo base es de 1 mm, sin embargo Sherard et al (1985) recomienda un diámetro superior, (de 5 a 10 mm), si se ensayan bases de grano más grueso.

En la presente investigación, al ensayar la base **BJV-C8** con un orificio de 1 mm, los ensayos se taponaban, siendo muy reducida la salida de agua desde el principio y por lo tanto debiendo considerarse el ensayo como "Nulo".

Ante este comportamiento se ha decidido realizar los ensayos con esta base practicando un orificio de 2 mm de diámetro, obteniéndose un $D_{15FL} = 1.4$ mm. A continuación se ha ensayado la muestra **BJV-C9**, también con orificio de 2 mm, dando un $D_{15FL} = 1.4$ mm tras un total de 9 ensayos realizados.

Para comprobar el efecto del diámetro del orificio, se ha realizado una serie de 5 ensayos con la muestra **BJV-C9**, pero con orificio de 1 mm. El comportamiento ha sido muy irregular, con muchos ensayos "Nulos" y la necesidad de volver a perforar el orificio al ver que el agua no salía al dar la presión correspondiente.

Así por ejemplo, el filtro FP-10/1.6 ha dado un volumen total de 22100 cm³ con el orificio de 2 mm y de 50780 con el orificio de 1 mm, mientras que el filtro FP-10/1.5 ha dado un volumen de 20840 cm³ en el primer caso y sólo 10 cm³ en el segundo.

También se ha comprobado el efecto del diámetro del orificio con la muestra **BFA-C2**, en particular, con el filtro FP-10/1.4 se obtienen 28750 cm³ con el orificio de 1 mm y 4840 cm³ con 2 mm de orificio.

Algo similar ha ocurrido con la muestra **BP-C3**, ya que el filtro FP-10/0.5 ha dado 2890 cm³ con 1 mm y 380 cm³ con 2 mm.

Por lo tanto se puede concluir que no hay una influencia significativa del diámetro del orificio en la pastilla de suelo base, ya que los intervalos de variación del volumen recogido se pueden considerar normales en el sentido de que en los propios ensayos NEF "Estándar" también se presentan estas fluctuaciones.

Sin embargo si es de destacar que, efectivamente, para bases más gruesas es preciso emplear orificios de diámetro superior porque de lo contrario se puede taponar con mucha facilidad anulando el ensayo.

8.6 Análisis global de los resultados de la investigación

8.6.1 Introducción

En los apartados anteriores se ha ido estudiando el resultado de cada una de las variantes del ensayo NEF de forma que se ha podido estudiar por separado la influencia de cada una de las variables.

Sin embargo resulta también importante estudiar si es posible delimitar una “envolvente” de diseño, que permita determinar el filtro necesario para una cierta base cohesiva, con un adecuado margen de seguridad, pero contemplando de forma conjunta todas las variantes estudiadas.

También es necesario realizar de forma conjunta el estudio del efecto de la mineralogía del suelo base sobre la posible erosión selectiva en las paredes del orificio.

Ambas cuestiones se abordan en los siguientes apartados.

8.6.2 Posible erosión selectiva en función de la mineralogía del suelo base

Aunque no ha sido posible determinar la influencia de la mineralogía del suelo base sobre el D_{15FL} del filtro, en algunos ensayos se ha estudiado también la posibilidad de que durante el ensayo NEF se produzca algún tipo de erosión selectiva de las partículas del suelo base según su mineralogía. Para ello se ha determinado la composición mineralógica de las partículas erosionadas y la de las paredes del orificio practicado en el suelo base, después del ensayo; para compararla con la correspondiente a la muestra original.

La muestra elegida ha sido la BP-C3, habiéndose escogido ensayos NEF con grandes diferencias en cuanto a la erosión, es decir, un ensayo donde la erosión ha sido reducida y otro donde la erosión ha sido muy importante.

En el gráfico siguiente se representa la composición mineralógica de las distintas muestras, donde “BPC3 ORIG” se refiere a la mineralogía de la muestra BP-C3 original, “X ORIF” se refiere a la de las paredes del orificio en los ensayos NEF-364 y NEF-381, y “X EFLUE” es la mineralogía de las partículas sólidas contenidas en el agua efluente de esos mismos ensayos.

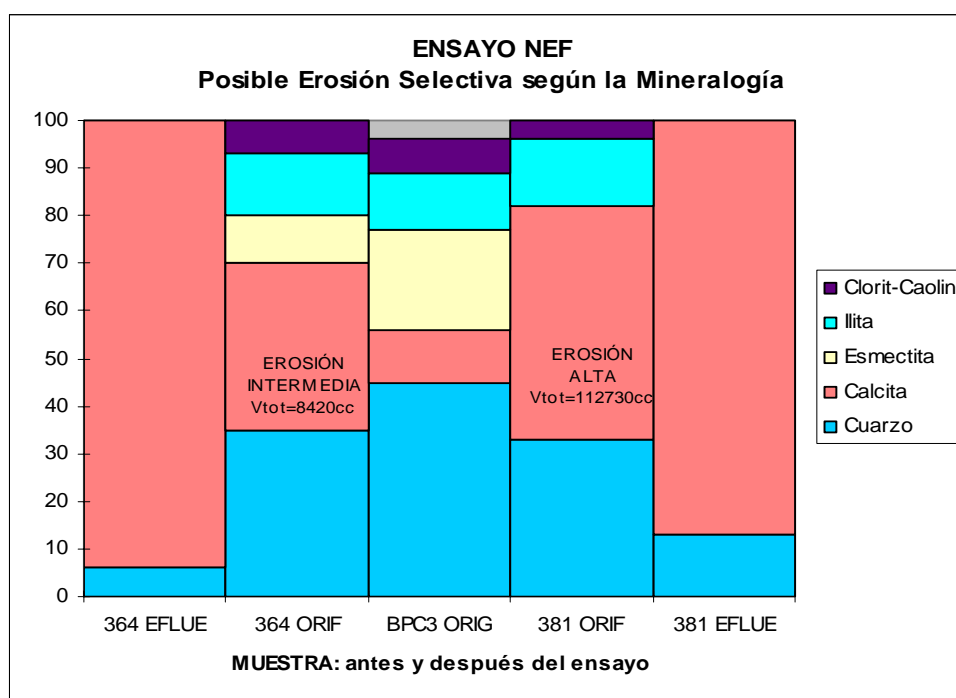


Gráfico 99.- Estudio de la posible erosión selectiva en el ensayo NEF

Lo primero que llama la atención es que parece como si la esmectita sí se ve especialmente erosionada ya que disminuye mucho su presencia en las paredes del orificio después del ensayo, incluso desaparece cuando la erosión ha sido muy alta; mientras que el resto de los minerales arcillosos, clorita, caolín y esmectita, parecen no verse afectados.

Pero no menos sorprendente parece el hecho de que el agua de salida del ensayo, las partículas sólidas presentes tienen sólo calcita y cuarzo, sin presencia apreciable de minerales de la arcilla.

Una posible explicación a este resultado es que en el agua de salida haya también partículas procedentes del filtro, cuya composición es efectivamente calcita y cuarcita, en una proporción aproximada de 85:15, procedentes tanto del arrastre de las partículas del filtro como de la disolución.

Si este arrastre es importante, la presencia de arcilla puede ser minoritaria.

En cualquier caso, de nuevo los resultados no son concluyentes, pero abren una interesante línea de investigación.

8.6.3 Análisis global de los resultados de todas las variantes del ensayo NEF

Donde si se pueden obtener conclusiones interesantes es en el estudio conjunto de los resultados de todas las variantes de los ensayos NEF, de forma que quedaría contemplado un rango muy amplio de condiciones de ensayo.

A continuación se representa en un gráfico la relación entre el D_{15FL} del filtro y el d_{70B} del suelo base, para cada uno de las distintas variantes del ensayo NEF.

En dicha representación se han omitido los resultados que los distintos estudios estadísticos realizados han permitido calificar como “anómalos”, es decir, los ensayos NEF 168, 271, 341, 347, 389 y 395, es decir, hay sólo 8 resultados considerados anómalos sobre un total de 73 resultados de “filtro límite” para lo que han sido necesarios 410 ensayos NEF.

Por lo tanto ha sido preciso realizar, de media, aproximadamente 6 ensayos NEF por cada muestra y condiciones estudiadas diferentes.

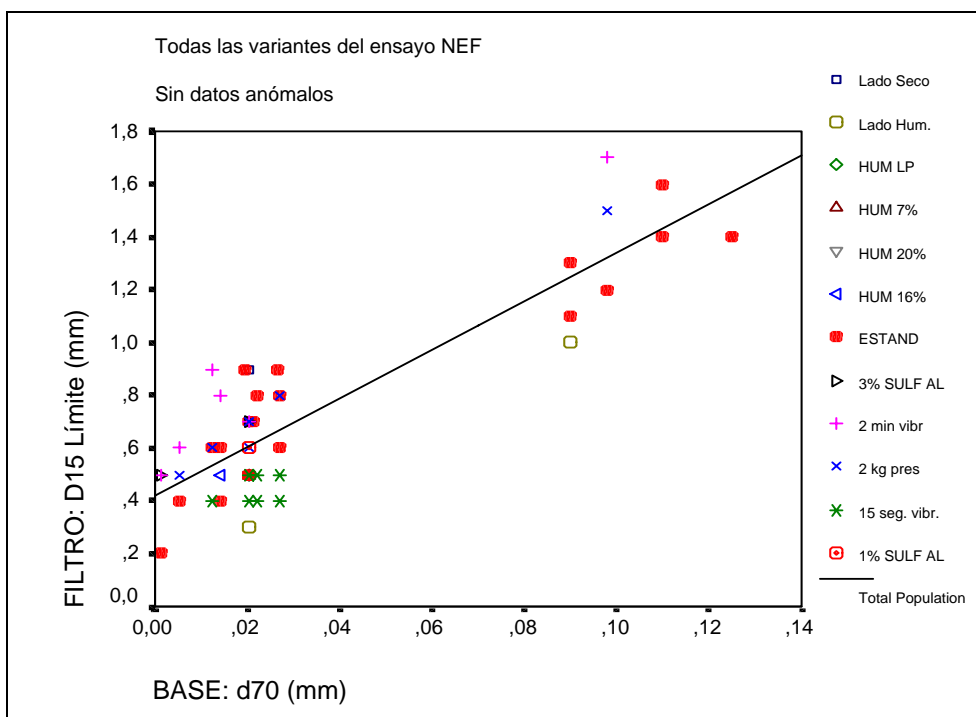


Gráfico 100.- Resultados de todas las variantes de los ensayos NEF

Como se aprecia en el gráfico, la tendencia es muy buena, si bien se puede apreciar claramente qué variantes del ensayo NEF producen D_{15FL} por defecto o por exceso respecto al ensayo NEF "Estándar".

También es posible estudiar la regresión lineal con todos estos resultados obteniéndose:

Resumen del modelo^a

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,876 ^a	,768	,763	,1684

a. Variables predictoras: (Constante), Bd_{70}

b. Variable dependiente: FD_{15}

Coefficientes^a

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%	
	B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior
1 (Constante) Bd70	,417 9,228	,033 ,718	,876	12,717 12,849	,000 ,000	,351 7,786	,483 10,671

a. Variable dependiente: FD15

Tabla 69.- Regresión $D_{15FL} - d_{70B}$ para todas las variantes de los ensayos NEF

Como se puede ver en las tablas anteriores, la correlación es bastante alta, ($R^2=0.768$), sobre todo teniendo en cuenta la gran variedad de situaciones consideradas, siendo todos los coeficientes del modelo significativos y no encontrándose datos con residuos tipificados superiores a 3 y por lo tanto que pudieran considerarse anómalos.

En cualquier caso, a efectos de recomendación de diseño, es preciso adoptar una “envolvente” inferior, tal y como se propone en la siguiente gráfica:

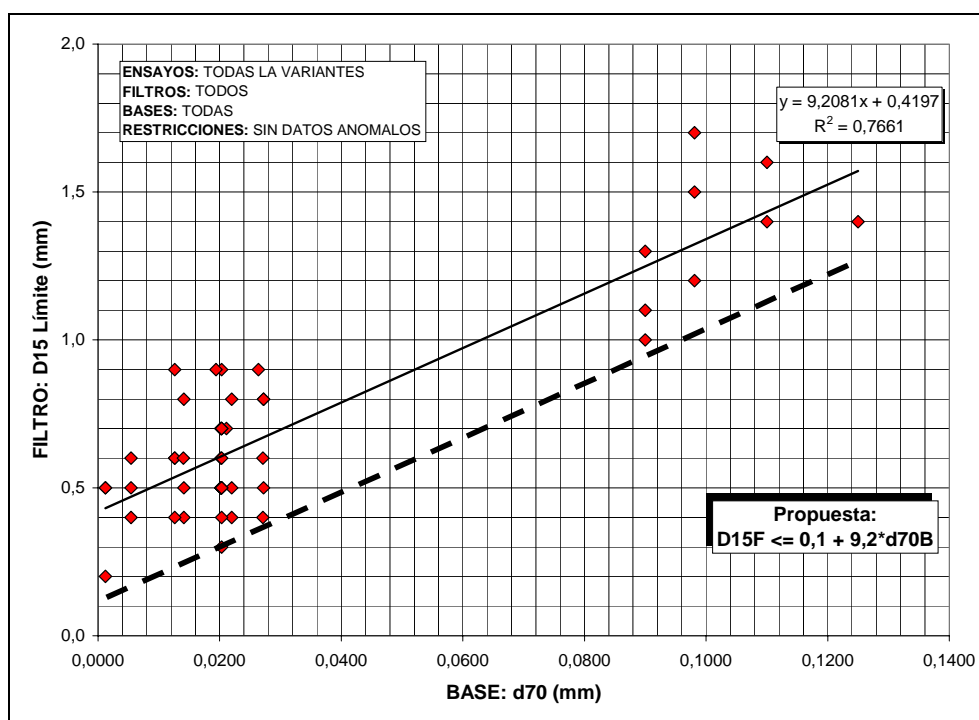


Gráfico 101.- Relación $D_{15FL} - d_{70B}$ para todas las variantes de los ensayos NEF

Aunque también es posible emplear como variable de comparación del suelo base el porcentaje de finos, es decir el % inferior a 0.08 mm, ($P_{0.08B}$), tal y como muestra la gráfica siguiente en la que se puede apreciar que efectivamente no es necesario distinguir entre suelos del grupo 1 o 2 según la clasificación de Sherard et al (1985).

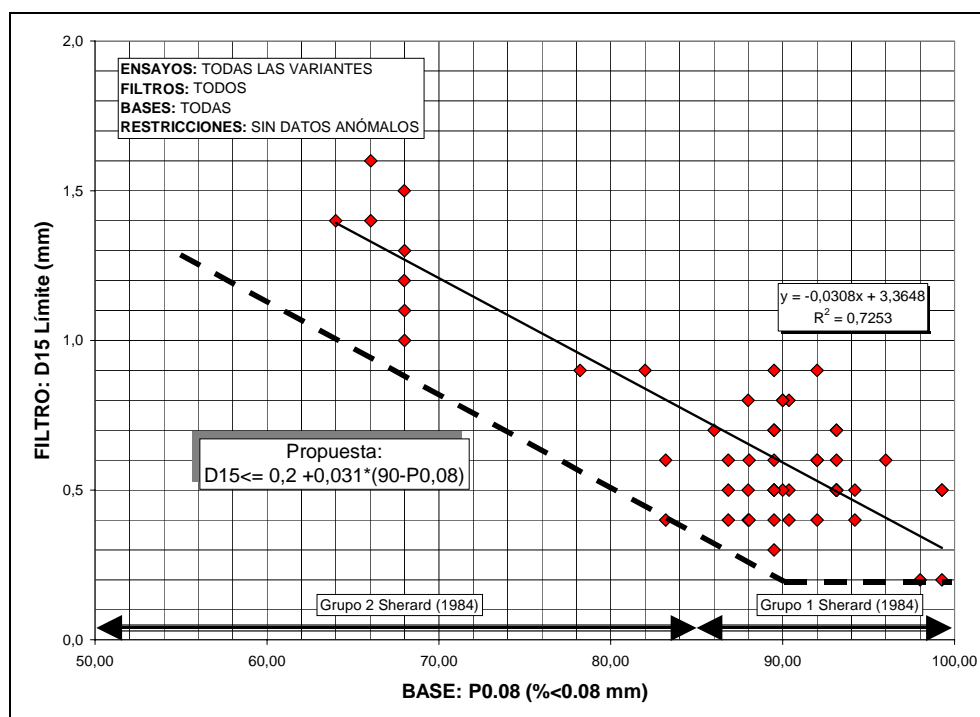


Gráfico 102.- Relación $D_{15FL} - P_{0.08B}$ para todas las variantes de los ensayos NEF

En el caso de relacionar la granulometría del suelo base con la permeabilidad del filtro, según proponen Vaughan y Soares (1982), se obtiene también una correlación muy alta, tal y como se representa en el siguiente gráfico:

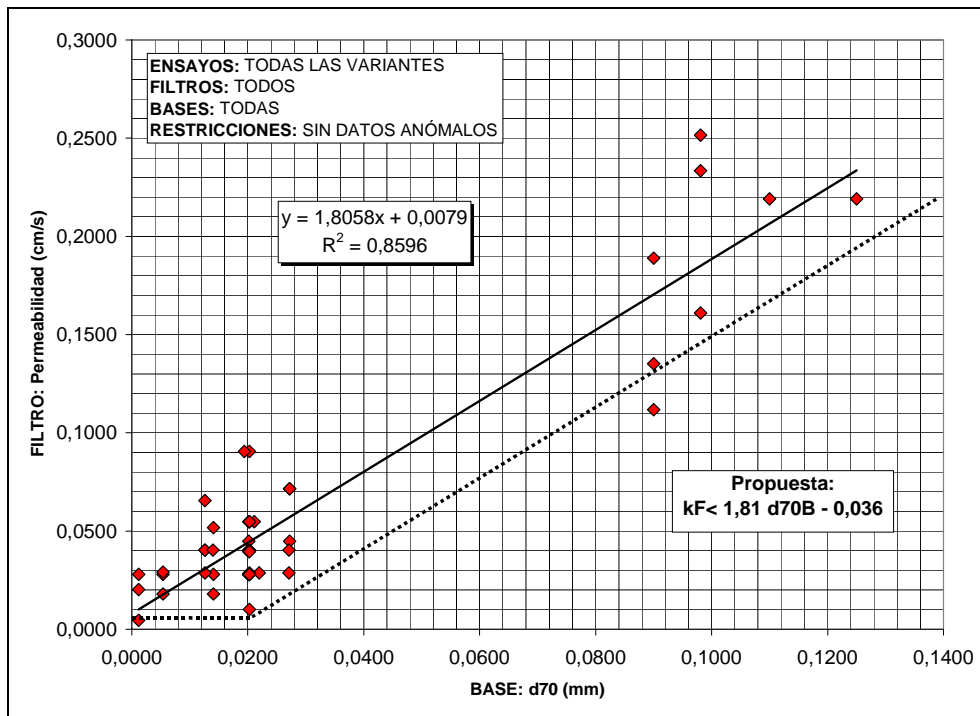


Gráfico 103.- Relación k_{FL} – d_{70B} para todas las variantes de los ensayos NEF

En cualquier caso hay que destacar que el empleo de estas propuestas de diseño sólo está justificado cuando se quiera diseñar o comprobar un filtro granular para un suelo base determinado en condiciones muy exigentes, que se podrían denominar “*Extremas*”, ya que de por sí el ensayo NEF “Estándar” es muy estricto.

9 CONCLUSIONES DEFINITIVAS

9.1 Introducción

El objetivo general de la presente investigación era simular en laboratorio el fenómeno de la erosión interna en presas de materiales sueltos, mediante el ensayo NEF, para determinar las variables que influyen en la eficacia de un filtro granular frente a la erosión interna de bases cohesivas.

Efectivamente el ensayo NEF ideado por Sherard (Sherard et al 1984) se ha mostrado como una herramienta muy útil para estudiar el fenómeno de la erosión interna y permitir el diseño o comprobación de los filtros granulares necesarios, siendo además posible realizar diversas variantes del ensayo que permiten aumentar el número de variables estudiadas.

A pesar de disponer de un ensayo idóneo para estudiar este fenómeno, los criterios de diseño existentes en la actualidad suelen ser válidos en la mayoría de los casos normales, pero no responden a interrogantes como el comportamiento de arcillas expansivas o la influencia de otras variables como la compactación del filtro o la del suelo base, o la mineralogía y demás propiedades de las arcillas.

La presente investigación ha estudiado la influencia de distintas variables obteniendo las siguientes conclusiones.

9.2 Influencia del suelo base

9.2.1 Granulometría

- El d_{85B} no es la mejor variable de comparación del suelo base. Por un lado, la relación no es lineal, sino potencial, y además el coeficiente de correlación no es muy alto.

- El criterio de diseño de Sherard y Dunningan (1985) queda en general del lado de la seguridad, ya que se han obtenido D_{15FL} superiores a 0.7 mm, sin embargo algunos filtros que cumplen la ratio $D_{15F}/d_{85B} \leq 9$ han fracasado.
- La separación en grupos según el porcentaje $P_{0.08B}$ que realiza Sherard y Dunningan (1985) sólo es precisa al utilizar el d_{85B} como diámetro de comparación, porque se puede evitar con una relación potencial o empleando directamente la relación $D_{15F}-P_{0.08B}$ o la relación $D_{15F}-d_{70B}$.
- El empleo del tradicional d_{85B} como variable de comparación tiene las desventajas de una menor precisión, no linealidad y que la determinación de este diámetro en este tipo de suelos suele corresponder a una zona de solape entre la granulometría por tamizado y la realizada por sedimentación, con la consiguiente discontinuidad y dificultad de apreciación.
- Sherard y Dunningan (1985) señalan que en cualquier caso, el D_{15F} mínimo es de 0.2 mm, como efectivamente se ha obtenido en la presente investigación, incluso para una base dispersiva como la arcilla de la Presa de Zahara, (muestra BZA-C1). Por esa razón no se propone una relación basada en una ratio simple, sino una polinómica de primer grado, con 0.2mm como ordenada en el origen, sin embargo, con la humedad por el lado seco, se ha obtenido un “Fracaso” para la muestra de la Presa de Barbate con un filtro con $D_{15F}=0.2$ mm.
- El d_{70B} representa mejor el comportamiento del suelo base, siendo además la relación lineal con el D_{15FL} y teniendo un coeficiente de correlación muy alto. Además no es preciso distinguir entre los suelos del grupo 1 y 2 de la clasificación de Sherard y Dunningan (1985). Se propone la siguiente norma de diseño, para condiciones “Estándar”:

$$D_{15F} \leq 0.2 + 9 d_{70B} \quad (\text{en mm})$$

- También es posible utilizar el porcentaje de finos del suelo base ($P_{0.08B}$), según la expresión:

$$D_{15F} \leq 3.23 - 0.032 P_{0.08B} \quad (D_{15F} \text{ en mm y } P_{0.08B} \text{ en } \%)$$

- La granulometría sin dispersante no proporciona una información adicional considerable a la hora de calcular el D_{15FL} necesario.
- No ha sido posible obtener conclusiones sobre la granulometría de las partículas erosionadas, ya que el sistema GALAI CIS-1 de medida de tamaño de partículas por rayo láser no ofrece aun resultados suficientemente representativos.

9.2.2 Humedad-densidad

- Parece confirmarse que es conveniente compactar la arcilla con una humedad cercana a la óptima del ensayo próctor normal, ya que, aparte de otras ventajas de tipo geotécnico, en general el D_{15FL} necesario es mayor que para otras humedades.
- Puede ser muy peligroso compactar con humedades muy por encima de la óptima, por que el D_{15FL} necesario puede reducirse considerablemente.
- El efecto de compactar del lado seco no ha quedado muy claro, ya que unas veces ha sido favorable y otras no.

9.2.3 Plasticidad

- Los resultados muestran una buena relación entre el D_{15FL} y la plasticidad del suelo base, de forma que cuanto más plástico es un suelo, menor es el D_{15FL} del filtro necesario, sin embargo esta conclusión ha de ser matizada porque en las muestras ensayadas se ha encontrado también una buena relación entre la plasticidad y el porcentaje de finos, por lo que es posible que la influencia de la plasticidad no sea más que un efecto encubierto de la granulometría.
- Discriminado este posible efecto, se ha comprobado que efectivamente la plasticidad parece tener un efecto favorable, de forma que a igualdad de

granulometría del suelo base, un mayor índice de plasticidad permite diseñar filtros menos estrictos, sin embargo esta influencia no es muy significativa.

9.2.4 Dispersabilidad y/o erosionabilidad

- La única muestra de suelo base ensayada con carácter dispersivo ha sido la BZA-C1, que además es la más fina de todas, sin embargo su comportamiento se ha mantenido cercano a la tendencia de las demás, aunque ha condicionado considerablemente los resultados. Por ello no parece que la dispersabilidad sea más condicionante que la propia granulometría.

9.2.5 Cohesión y ángulo de rozamiento

- No se ha encontrado ninguna influencia significativa

9.2.6 Composición y mineralogía

- No ha sido posible determinar una influencia significativa de la mineralogía, a la hora de determinar el D_{15FL} , pero hay indicios de una posible erosión selectiva en las paredes del orificio según la mineralogía. En cualquier caso requiere un estudio más profundo.
- No se ha estudiado la importante influencia del sodio en la erosionabilidad, pero está muy documentado por otros autores.

9.2.7 Empleo de aditivos

- La adición de un 3% de sulfato de aluminio tiene un efecto considerable sobre el D_{15FL} , dependiendo del contenido de finos del suelo base. Es de destacar el efecto sobre la arcilla de la Presa de Zahara, ya que el D_{15FL} ha pasado de 0.2mm a 0.5mm gracias a la adición de sulfato de aluminio

- En cambio, sobre la base BFA-C2 el efecto ha sido negativo, por lo que se propone realizar experimentación directa antes de una posible aplicación práctica.

9.3 Influencia del filtro

9.3.1 Granulometría

- Aunque todos los filtros ensayados tienen granulometría lineal en papel semilogarítmico, se ha verificado la idoneidad del empleo del D_{15F} para definir el comportamiento del filtro.
- Para un mismo D_{15F} cuanto mayor es el D_{100F} y por lo tanto, menor la pendiente de la curva granulométrica, mejor es el comportamiento del filtro.

9.3.2 Densidad-porosidad

- Para un mismo D_{15F} , cuanto mayor sea la compactación y por tanto, menor la porosidad, mejor es el funcionamiento del filtro.
- Por falta de precisión en la medida de la porosidad no ha sido posible determinar una ley cuantitativa.

9.3.3 Permeabilidad

- La permeabilidad del filtro es la mejor variable de comparación, ya que incluso permite predecir el comportamiento del filtro para distintas compactaciones, cosa que no es posible con el D_{15FL} .
- Es relativamente sencillo obtener relaciones entre la granulometría y la permeabilidad según la compactación, por lo que la permeabilidad sí se puede utilizar como variable de diseño o comprobación de filtros in situ, previa medida de la granulometría y la densidad.

- La mejor norma para el diseño de filtros es la que relaciona la permeabilidad del filtro con el d_{70B} de la base, ya que es de tipo lineal, expresión muy sencilla e incluye un amplio rango de energías de compactación del filtro:

$$K_F \leq 1.75 d_{70B} \quad (K_F \text{ en cm/s y } d_{70B} \text{ en mm})$$

9.4 Influencia de las condiciones de flujo

- Al reducir la presión del ensayo de 4 a 2 kg/cm², se aumenta el D_{15FL} necesario, pero la variación no es muy importante, entre un 0% a un 40% de aumento.
- En ambos casos, las velocidades en el orificio practicado en la muestra de suelo base son suficientes para garantizar la erosión, por lo que cobra mayor importancia lo que ocurre en la interfase base-filtro que en el propio orificio.

9.5 Otras conclusiones

- El ensayo NEF es adecuado para el estudio y diseño de filtros granulares, siendo suficiente una duración del ensayo de 20 minutos, sin embargo, es preciso realizar un número considerable de ensayos, (una media de 6 por muestra de suelo base), para poder obtener el D_{15FL} con suficiente seguridad.
- El orificio practicado en la pastilla de suelo base debe tener mayor diámetro cuanto más gruesas sean las partículas de dicho material.
- Unificando todas las variantes del ensayo NEF realizadas es posible proponer una recomendación de diseño que contenga un adecuado margen de seguridad, empleando una relación lineal entre D_{15FL} y d_{70B} del tipo:

$$D_{15F} \leq 0.1 + 9.2 d_{70B} \quad (\text{en mm})$$

- También se puede emplear el porcentaje de finos del suelo base con la siguiente expresión:

$$D_{15F} \leq 0.2 + 0.031*(90-P_{0.08B}) \quad (D_{15F} \text{ en mm y } P_{0.08B} \text{ en } \%)$$

- En cualquier caso, las condiciones del ensayo NEF Estándar son lo suficientemente rigurosas como para no recomendar estas dos últimas expresiones más que para situaciones “extremas” o cuando los condicionantes externos permitan un sobredimensionamiento de los filtros.
- La utilización en el ensayo NEF de arena como material lateral puede provocar un falseamiento de los resultados, sobre todo si se compacta por vibración, por lo que se recomienda su sustitución por un cordón de arcilla de modelar o plastilina.

10 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación ha tratado de resolver algunas cuestiones importantes, pero también ha abierto nuevas puertas que pueden marcar un camino interesante para futuras investigaciones.

Se proponen las siguientes líneas futuras de investigación:

- El empleo de **modelos numéricos** para bases cohesivas y filtros granulares está comenzando a desarrollarse en estos días, siendo una línea de investigación muy interesante, pero que precisará de datos reales de ensayos de laboratorio.
- Profundizar en el estudio del efecto de **aditivos** como el sulfato de aluminio, tanto a escala microscópica, como macroscópica, indicando el grado de tolerancia y su afección a otras propiedades de las bases arcillosas. Es muy interesante estudiar en particular el efecto del ion sodio.
- Analizar las **condiciones hidrodinámicas** en el interior del orificio de la muestra de suelo base y en la interfase con el filtro.
- Mejorar el estudio de las **partículas erosionadas**, estudiando su composición, tamaño y mineralogía; y variando el espesor del filtro.
- Estudiar un nuevo método para determinar el D_{15FL} basado en consideraciones **probabilísticas**, frente al tradicional método “determinista”, que sea capaz de permitir la participación del criterio del investigador, ya que parece casi imposible adoptar unos criterios absolutamente objetivos.
- Aplicar **nuevas tecnologías** a los ensayos de filtros, como puede ser la realización de fotografías con microscopio de las paredes de la fisura.

- Algunas de las conclusiones obtenidas en la presente investigación son aplicables también al caso de filtros de **geotextil**, por lo que sería interesante realizar un estudio similar al aquí desarrollado.

11 REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

A continuación se exponen las referencias completas nombradas en la presente Tesis Doctoral (con el nombre de los autores subrayado) así como otras referencias bibliográficas muy interesantes para ampliar conocimientos sobre la materia en cuestión, (con los nombres de los autores sin subrayar).

ABERG B. (1992) “Void Characteristics and filter Performances of Cohesionless Soils”, in Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heibaum & Schuler (eds.), 1993 Balkema, Rotterdam, Netherlands, Proceedings of Geofilters'92, held in Karlsruhe, Germany, October 1992, pp 49-56.

ABERG B. (1996) “Void Size in Granular Soils”, Journal Geotechnical Eng., ASCE, Vol. 122, No. 3, pp 236-239

ABRAMOV, S.K (1952) “Methods of selecting and calculating well filters”, citado por S.V. Troyanskii en el libro: Transactions of the Hydrogeology and Engineering Geology Section, VNHTOGOR, N° 1.

ALONSO E. (1997), “Flow and Hydraulic Fracture in Earthfill Dams”. XIX ICOLD, Q.73, R.34. Florencia.

ALONSO M. (1993) “Patología de presas españolas de materiales sueltos”. Conferencia especial. Simposium sobre Geotecnia de presas de materiales sueltos. Zaragoza. Octubre 1993.

ALONSO M. (1994) “Estado actual de la seguridad de presas. Incidentes y accidentes de presas. Casos patológicos de presas españolas”. Curso de seguridad de presas. Madrid. Mayo 1994.

ÁLVAREZ A., BRAVO G. (1976) “A composed-core Rockfill Dam: The Canales Dam”. 12° ICOLD Congress. C.20. Mexico 1976.

ARULANANDAN K. AND PERRY B. (1983) “Erosion in Relation to Filter Design Criteria in Earth Dams”, Jour. Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol. 109, No. 5, pp 682-697.

ARULANANDAN K., GILLOGLEY E., TULLY R. (1980) “ Development of a Quantitative Method to Predict Critical Shear Stress and Rate of Erosion of

Natural Undisturbed Cohesive Soils”, Tech. Rep. GL-80-5, U.S. Army Engrs., Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

ARULANANDAN K., LOGANATHAN P., KRONE R. (1975) “Pore and Eroding Fluid Influences on Surface Erosion of Soil”, Jour. Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol. 101, No. GT1, pp 51-66.

BAKKER, K.J. (1987) “Hydraulic Filter Criteria for Banks”. European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Dublin

BAKKER, K.J., BRETELER, M.K. DEN ADEL, H. (1990) “New Criteria for Filters and Geotextile Filters under Revetments”. International Conference on Coast Engineering. Delft.

BATEREAU, CH. (1992) “Comparision of Existing Granular Filter Criteria” Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heibaum & Schuler (eds.), 1993 Balkema, Rotterdam,, Netherlands, Proceedings of Geofilters'92, held in Karlsruhe, Germany, October 1992, pp 113-120.

BAYLIS, J.R. (1959) “Review of Filter Bed Design and Methods of Washing”. Journal AWWA, 1433-1454.

BAZTAN, J.A., BRAVO, G. (1994) “Criterios de diseño para las presas de materiales sueltos”. Curso de seguridad de presas. Madrid. Mayo 1994.

BERNAL A, NEVOT A, VIZCAINO M. (1993) “El Ensayo NEF de Sherard, Aplicación a las Launas de las Alpujarras”. Simposium sobre Geotecnia de presas de materiales sueltos. Zaragoza. Octubre 1993.

BERTRAM G. (1940) “An Experimental Investigation of Protective Filters”, Publication Graduate School of Engineering, Harvard Publication No. 267, Vol. 6.

BIAREZ, BORDES Y LONDE (1970) “Fisuración de presas de materiales sueltos” 10º Congreso ICOLD. Q 36. Madrid 1970.

BLIGH, W.G. (1910) “Dams, Barrages and Weirs on Porous Foundations”. Eng. News, 64, pp. 708-710.

BORDEAUX G., NAKAO H., IMAIZUME H. (1975) “Tecnological and Desing Studies for Soberdinho Dam Concerning the Dispersive Characteristics of the Clayey Soils”, Sao Paulo, Brazil, pp 99-119

BORDEAUX, G., IMAIZUME, H. (1977) “Dispersive clay at Soberdinho Dam” Dispersive Clays, Related piping and erosion in Geotechnical projects, ASTM, STP 623, pp. 13-24

- BRAUNS J., GOTTHEIL K.M. (1991)** “The effect of drain strips in dams and dikes”. 17º ICOLD Congress. Q 67. Viena 1991.
- BRAUNS, J. (1990)** “Filters and Drains. Contribution to NATO Study Institute, "Advances in Rockfill Structures". Lisboa.
- BRAUNS, J. (1991)** “Filters and Drains. Chapter 10 of Advances in Rockfill Structures”. E.Maranha das Neves, editor. Kluwer Academic Publishers. Printed in Netherlands.
- BRAUNS, J., WITT, K.J. (1987)** “Proposal for an Advanced Concept of Filter Design”. Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Dublin
- BRAVO, G. (1979).**- “Efecto de las laderas sobre la distribución de tensiones y los asientos previsibles durante la construcción de la Presa de Canales”. Revista de Obras Públicas. Diciembre 1979. Special iussue on the occasion of the XIII ICOLD.
- BRAVO, G. (1979).**- “The excavation to support the core of Canales Dam”. XIII ICOLD Congress. Q. 48. New Delhi 1979.
- BRAVO, G. (1993).**- “Filtros y drenes: Criterios de Selección, Morfología y Funcionamiento”. Simposium sobre Geotecnia de presas de materiales sueltos. Zaragoza. Octubre 1993.
- BRAVO, G. (1995)** “Teoría y Práctica de la Filtración y el Drenaje” . Comité Nacional Español de Grandes Presas. I.S.B.N. 84-605-3254-2
- BRAVO, G. (1995),** “Hydraulic Fracturing in Embankment Dams on First Filling of the Reservoir”. The International Journal on Hydropower & Dams. July 1995.
- BRAVO, G. (1999)** “Las Vías Preferenciales de Filtración y su Influencia en la Erosión Interna en Presas de Materiales Suelos”, VI Jornadas Españolas de Grandes Presas, Málaga, Comité Nacional Español de Grandes Presas, pag. 85-98
- BRAVO, G., MAESO, C. (1985)** “Report on the tests carried out with the filter material of the Canales Dam, to verify its suitability to retain the clays of the core, in the case of fissuration”. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. 1985.
- BRAVO, G., URIEL, S., PÉREZ, J.P. (1982).**- “In situ Test for Control of Cracking of the Clay Core of Canales dam”. 14º ICOLD Congress. Q 55. Rio de Janeiro 1982.

- BRAVO, G., URIEL, S., PÉREZ, J.P. (1988).**- “Anti-cracking measures in the Canales dam”. 16º ICOLD Congress. Q 61. San Francisco 1988.
- CALHOUN, C.C. (1972),** “Development of design criteria and acceptance specification for plastic filter cloths”. Technical Report S-72-7 US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- CALHOUN, C.C., COMPTON, J.R., STROHM, W.E. (1971):** “Performance of plastic filter cloths as a replacement for granular filter materials”. Highway Research Record N° 373. 74-85.
- CASAGRANDE, A. (1937):** “Seepage Through Dams”. New England Water Works Association. Vol LI.
- CEDERGREN, H.R. (1960)** “Seepage, Drainage and Flow Nets” Third edition, John Wiley & Sons, New York
- CHIU, E. (1984)** “Slaking of compacted soils in relation to design of protective filters”, M.A.Sc. thesis, University of Toronto. Toronto, Ontario. Canadá.
- COLE B.A. et al (1976)** “Dispersive Clay in Irrigation Dams in Thailand”, Dispersive Clay, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, pp 24-41.
- COUMOULOS D.G. (1977)** “Experience with Studies of Clay Erodibility in Greece”, Dispersive Clay, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, pp 42-57.
- DAVIDENKOFF R. (1955)** “De la Composition des Filtres dans des Barrages en Terre” 5th ICOLD, Vol. 1, quoted by Vafai (1996)
- DAWSON, A. (1986):** “The role of geotextiles in controlling subbase contamination”. Third International Conference on Geotextiles. Viena.
- DE MELLO, Y.F.B. (1975)** “Some lessons from unsuspected, real and fictitious problems in earth dam engineering in Brazil”. 6th Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering for Africa. Durban. Vol.2 304.
- DELGADO F., LOCKE M. (2000)** “Design of Granular Filters: Guidelines and Recommendations”, Geofilters 2000, June. Poland.
- DELGADO, F., BRAVO, G., URIEL, S. (1999)** “Variables que Influyen en la Eficacia de un Filtro Granular para Bases Cohesivas”, VI Jornadas Españolas de Grandes Presas, Málaga, Comité Nacional Español de Grandes Presas, pag. 107-118

- DELGADO, F., URIEL, S., BRAVO, G. (1999)** “Recomendaciones para los Ensayos de Filtros Granulares”, VI Jornadas Españolas de Grandes Presas, Málaga, Comité Nacional Español de Grandes Presas, pag. 119-137.
- DEN ADEL, H., BAKKER, K.J. & P.E.L. (1987):** “A transport model for filtration”. Proc. of the 9th ECSMFE, Vol 2, p. 899-901. Dublin.
- DEPARTMENT OF AGRICULTURE, SOIL CONSERVATION SERVICE (1986) :** “Soil Mechanics Note n° 1: Guide for Determining the Gradation of Sand and Gravel Filters”, January.
- DEPARTMENT OF ARMY, US CORPS OF ENGINEERS (1941):** “Investigation for filter requirements for underdrains”. Waterways Experiment Station, Vicksburg. Tech.Mem. n° 183-1
- DEPARTMENT OF ARMY, US CORPS OF ENGINEERS (1948):** “Investigation of wooden well screens for Grenada, Enid, Sardis Dams”. Waterways Experiment Station, Vicksburg. Tech.Mem. n° 3- 250
- DEPARTMENT OF ARMY, US CORPS OF ENGINEERS (1953):** “Filter experiments and design criteria”. Waterways Experiment Station, Vicksburg. Tech.Mem. n° 3-250
- DEPARTMENT OF ARMY, US CORPS OF ENGINEERS (1977):** “Civil Works Construction Guide Specification”. CW 02215 November.
- DEPARTMENT OF THE INTERIOR, BUREAU OF RECLAMATION (1987):** “Design of Small Dams”, 3rd. Edition, Water Resources Technical Publication, US Government Printing Office, Washington, D.C.
- DEPARTMENT OF THE INTERIOR, BUREAU OF RECLAMATION (1987):** Design Standards No. 13- Embankment Dams Chapter 5. Protective Filters. May.
- FARHI F.J., HAMON M. (1967),** “Barrage de Djatiluhur. Deformation de Remblai et Fissuration du Noyau”. IX ICOLD.Istambul.
- FAURE, Y. et al. (1984):** “Influence of the filtration opening size on soil retention capacity of geotextiles”. Flexible Armoured Revetments Incorporating Geotextiles International Conference. The Institution of Civil Engineers. Londres.
- FAURE, Y. et al. (1986):** “Theoretical and experimental determination of the filtration opening size”. Third International Conference on Geotextiles. Viena.

- FEDERICO AND MUSSO (1992)** “Some Advances in the Geometric-probabilistic Method for Filter Design”, Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heibaum & Schuler (eds.), 1993 Balkema, Rotterdam, Netherlands, Proceedings of Geofilters'92, held in Karlsruhe, Germany, October 1992, pp 75-82.
- FELL R., MACGREGOR P., STAPLEDON D. (1992)** “Geotechnical Engineering of Embankment Dams”, Balkema, Rotterdam, 675p.
- FISCHER AND HOLTZ (1996)** “A Critical Review of Granular Soil Filter Retention Criteria” Geofilters'96, Comptes rendus Proceedings, Lafleur, J. & Rollin, A. L. (Eds.), ISBN 2-553-00561-X, Montréal, Québec 1996, pp 409-418.
- FLEMMÉ, BAZTÁN Y FUNK (1990).**- “Repairs to the Martín Gonzalo dam”. Water Power and Dam Construction. Nov. 1990.
- FOSTER G., YOUNG R., NEIBLING W. (1985)** “Sediment Composition for Nonpoint Source Pollution Analyses”, Trans. ASAE, Vol. 28, pp 133-146.
- FOSTER Y FELL (1999)** “ Filter Testing for Dams- No Erosion and Continuing Erosion Boundaries”. Proceedings, 8th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Hobart.
- FRY, J.J., BRUN, P., LAUTRIN, D., ALBALAT, C., DROUX, J.M., MERCIER, A., RIESTERER, J.M., THAREAU, L., DEGOUTTE, G. (1997)**, “Typologie de l'érosion interne et détection”, XIX ICOLD, Q.73, R.47, Florencia.
- FUJISAWA, NAKAMURA, YAMAGUCHI Y KAWASAKI (1997)** “Effectiveness of Granular Filters for Embankment Dams against Soil Suspension”. ICOLD, Florencia'97. Q.73 R.19, 1997.
- GIROUD, J.P. (1982):** “Filter criteria for geotextiles”. Second International Conference on Geotextiles. Las Vegas. USA.
- GIROUD, J.P. (1983):** “Geotextile drainage layers for soil consolidation”. Civil Engineering for practicing and design engineers, Vol 2.
- GIROUD, J.P. (1996)** “Granular filters and geotextile filters” Geofilters'96, Comptes rendus Proceedings, Lafleur, J. & Rollin, A. L. (Eds.), ISBN 2-553-00561-X, Montréal, Québec 1996, pp 565-680.
- GOVINDARAJU R., REDDI L., KASAVARAJU S. (1995)** “A Physically Based Model for Mobilization of Kaolinite Particles under Hydraulic Gradients” Journal of Hydrology, Vol 172, pp. 331-350.

GRAAUW, A.F.DE, VAN DER MEULEN, T., VAN DER DOES DE BYE, M.R.

(1984): “Granular Filters: design criteria”. ASCE Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering. Vol 110.

GROOT M., BAKKER K., VERHEIJ H. (1992) “Design of Geometrically Open Filters in Hydraulic Structures”, in Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heibaum & Schuler (eds.), 1993 Balkema, Rotterdam, Netherlands, Proceedings of Geofilters'92, held in Karlsruhe, Germany, October 1992, pp 143-154.

GROUPE DE TRAVAIL DU COMITE FRANCAIS DES GRANDS BARRAGES (1982): “L'utilisation des géotextiles dans les barrages en terre”. 14th Congress on Large Dams Q55 R53.

GÜLER, E. (1992) “Filtration Criteria for Cohesive Soil Geotextile Systems” Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heibaum & Schuler (eds.), 1993 Balkema, Rotterdam, Netherlands, Proceedings of Geofilters'92, held in Karlsruhe, Germany, October 1992, pp 217-224.

HEERTEN, G. (1982): “Dimensioning the filtration properties of geotextiles considering long-term conditions”. Second International Conference on Geotextiles. Las Vegas. USA.

HEERTEN, G. (1986): “Functional design of filters using geotextiles”. Third International Conference on Geotextiles. Viena.

HEINZEN R. AND ARULANANDAN K. (1977) “Factors Influencing Dispersive Clays and Methods of Identification” Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, J.L. Sherard and R.S. Decker, Eds., ASTM 1977, pp. 202-217.

HOLTZ R. D. Et al (1981) “ An Introduction to Geotechnical Engineering”, Prentice-Hall, Civil Engineering and Engineering Mechanics Series, N.M. Newmark and W.J. Hall Editors, pp 77-91

HONJO Y., VENEZIANO D. (1989) “Improved Filter Criterion for Cohesionless Soils”, Jour. Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol. 115, No. 1, pp 75-94.

HONJO, Y., HAQUE, M. A., TSAI, K. A. (1996) “Self-filtration behavior of broadly and gap graded cohesionless soils” Geofilters'96, Comptes rendus Proceedings, Lafleur, J. & Rollin, A. L. (Eds.), ISBN 2-553-00561-X, Montréal, Québec 1996, pp 227-236.

HORSFIELD, H. TABLA, (1934) “The Strength of Asphalt Mixtures”, Journal of the Society of Chemical Industry, Abril 1934, Vol. 53, pag. 107-115

- HUMES C. (1996)** “A New Approach to Compute the Void-Size Distribution Curves of Protective Filters”, ” Geofilters’96, Comptes rendus Proceedings, Lafleur, J. & Rollin, A. L. (Eds.), ISBN 2-553-00561-X, Montréal, Québec 1996, pp 57-66.
- ICI FIBRES (1978):** “Designing with Terram”. ICI Fibres, Pontypool. UK.
- ICOLD (1986):** “Geotextiles as filters and transitions in fill dams”. International Commission on Large Dams. Bulletin 55.
- ICOLD, Q. 45:** “La investigación sobre fugas y el drenaje de las presas y su cimentación”. XII Congreso, México, 1976.
- ICOLD, Q. 58:** “Tratamiento del cimientto y de la filtración”. XV Congreso, Lausanne, 1985.
- ICOLD, Q. 67:** “Progresos recientes relativos a las presas y ataguías de materiales sueltos”. XVII Congreso, Viena, 1991.
- ICOLD, Q. 73.** “Special problems associated with earthfill dams”. XIX Congreso, Florencia, 1997.
- ICOLD.-** Bulletin 101 – “Tailings dams. Transport. Placement. Decantation”. Review and recommendations. 1995.
- ICOLD.-** Bulletin 88.- Use of thin membranes on fill dams.
- ICOLD.-** Bulletin 97 - Tailings dams - Design of drainage. 1995.
- ICOLD.-** Bulletin. 103 - Tailings Dams and Environment- Review and recommendations. 1996.
- ICOLD.-** Bulletin. 106 - A guide to Tailing Dams and impoundments - Design, construction, use and rehabilitation. 1996.
- ICOLD.-** Bulletin. 77 - Dispersive soils in embankment dams - Review. 1990
- ICOLD.-** Bulletin. 78 - Watertight geomembranes for dams.- State of the art. 1991
- ICOLD.-** Bulletin. 84 - Bituminous cores for fill dams - State of the art. 1992
- ICOLD.-** Bulletin. 89 - Reinforced rockfill and reinforced fill for dams - State of the art. 1993.
- ICOLD.-** Bulletin. 91 - Embankment dams - Upstream slope protection. Review and recommendations. 1993.

- ICOLD.-** Bulletin. 92 - Rock materials for rockfill dams.- Review and recommendations. 1993.
- ICOLD.- Bulletin. 95** - Embankment dams - Granular filters and drains. 1994.
- ICOLD.-** Bulletin. 98 - Tailings Dams and Seismicity - Review and Recommendations. 1995.
- IMDAKM AND SAHIMI (1987)** “Transport of Large Particles in Flow Through Porous Media”, Physical Review A, Vol. 36 No. 11, pp. 5304-5309.
- INDRARATNA B. (1991)** “Erosion of Dispersive Soils in Northeast Thailand”, Geotechnical Engineering, Vol. 22, pp 1-3
- INDRARATNA B. AND VAFAI F. (1997)** “Analytical Model for Particle Migration Within Base Soil - Filter System”, Jour. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol 123, No. 2, pp. 100-109.
- INDRARATNA B., VAFAI F., DILEMA E. (1996)** “An Experimental Study of the Filtration of a Lateritic Clay Slurry by Sand Filters”, Proc. Instn Civ. Engrs. Geotechnical Engineering, Vol 119, pp. 75-83.
- INDRARATNA, B., VAFAI, F. Y HAQUE, M. A. (1996)** “Design of granular filters based on experimental and analytical studies” Geofilters’96, Comptes rendus Proceedings, Lafleur, J. & Rollin, A. L. (Eds.), ISBN 2-553-00561-X, Montréal, Québec 1996, pp 1-10.
- INGOLD, T.S.(1984):** “Geotextiles as filters beneath revetments”. Flexible Armoured Revetments Incorporating Geotextiles International Conference. The Institution of Civil Engineers. Londres.
- ISSMFE.- COMMITTEE ON FILTERS (1987):** “Report on Filters.Revised Draw”
- ISTOMINA, V.S. (1957):** “Filtration Stability of soils”. Moscow, Leningrad.
- JIMÉNEZ SALAS J.A., JUSTO J.L., SERRANO A. (1975)** “Geotecnia y Cimientos” Editorial Rueda, ISBN 84-7207-021-2, Madrid.
- JIMÉNEZ SALAS, J.A. (1993).-** “Núcleos, espaldones y escolleras”. Simposium sobre Geotecnia de presas de materiales sueltos. Zaragoza. Octubre 1993.
- JURADO, A., LÓPEZ BASTIDA J. (1992).-** “Estudio sobre el filtro de la nueva presa de Guadalcaén”. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

JUSTO J.L., CAÑETE P., MANZANARES J.L., DEL CAMPO J., DE PORCELLINIS P. (1988).- “The upstream facing of Martín Gonzalo rockfill dam”. 16° ICOLD Congress. Q 61. San Francisco 1988.

KABASY M. (1993) “Disminución de los riesgos de dispersión en las arcillas mediante tratamiento químico o filtros de geotextiles”. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

KABASY, M., URIEL, S. (1999) “Disminución del Riesgo de Dispersión o Arrastre de Arcilla Mediante Tratamiento Químico o Filtro de Geotextiles”, VI Jornadas Españolas de Grandes Presas, Málaga, Comité Nacional Español de Grandes Presas, pag. 191-202.

KARPOFF K. (1955) “The Use of Laboratory Tests to Develop Design Criteria for Protective Filter”, Proc. 58th Annual Meeting ASTM, pp. 1183-1198.

KASSIF, G., ZASLAVSKY, D., ZEITLEN, J.G. : “Analysis of Filters Requirements for Compacted Clays”.

KENNEY T., CHAHAL R., CHIU E., OFOEGBU G., OMANGE G., UME C. (1985) “Controlling Constriction Sizes of Granular Filters”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 22, pp. 32-43

KENNEY T., LAU D. (1985) “Internal Stability of Granular Filters”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 22, pp. 215-225.

KENNEY, T. C. Y WESTLAND, J. (1992) “Laboratory study of segregation of granular filter materials” Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heibaum & Schuler (eds.), 1993 Balkema, Rotterdam, Netherlands, Proceedings of Geofilters'92, held in Karlsruhe, Germany, October 1992, pp 313-320.

KENNEY, T.C. (1989) “Results of Segregation Tests using 1-metre and 300 mm. Diameter Rotary-Drum Apparatus”, Department of Civil Engineering, University of Toronto. Publication 89-07, ISBN 0-7727-7550-8

KHOR C.H., WOO H.K. (1989) “Investigation of crushed rock filters for dam embankment” Journal of Geotechnical Engineering, vol. 115, No.3, marzo 1989

KJAERNSLI B., TORBLAA I.(1968).- “Leakage through Horizontal Cracks in the Core of Hittejuvet Dam”.

KJOERNSLI, B.G., KVALE, J., LUNDE & J. BAADE-MATHIESEN (1982): “Design, construction, control and performance of the Svartevann earth-rockfill dam”. Trans. of the 14th ICOLD, Vol IV, p. 319-337. Rio de Janeiro.

- KÖLHER, H. J. (1992)** “The Influence of Hydraulic Head and Hydraulic Gradient on the Filtration Process” Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heibaum & Schuler (eds.), 1993 Balkema, Rotterdam, Netherlands, Proceedings of Geofilters'92, held in Karlsruhe, Germany, October 1992, pp 225-240.
- KOVACS, G. (1981)** “Seepage Hydraulics”. Amsterdam. Elsevier Scient. Pub. Co.
- KOVACS, G., STAROSOLSZKY, O., SZILVASSY, Z. (1973):** “Changes in the Materials of Earth Dams and their influence on permeability”, Conference Budapest.
- KWANG T. (1990)** “Improvement of Dam Filter Criterion for Cohesionless Base Soil” M. Eng. Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- LAFLEUR, J. , (1991)** : Prepared Contribution to Question 67, "New Developments for Fill Dams and Fill Cofferdams. XVIIth Congress of the ICOLD. Vienna.
- LAFLEUR, J., (1984):** “Filter Testing of Broadly Graded Cohesionless Tills”. Canadian Geotechnical Journal 21.
- LAFLEUR, J., MIYNAREK, J., ROLLIN, A.L. (1989)** “Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils”. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol 115, No. 12
- LAFLEUR, J., MLYNAREK, J. Y ROLLIN, A.L. (1992)** “Filter Criteria for Well Graded Cohesionless Soils” Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heibaum & Schuler (eds.), 1993 Balkema, Rotterdam, Netherlands, Proceedings of Geofilters'92, held in Karlsruhe, Germany, October 1992, pp 97-106.
- LAL R. AND ELLIOT (1994),** “Erodibility and Erosivity” in Soil Erosion Research Methods 2nd Edition, R. Lal Ed., St Lucie Press, USA.
- LANDAU H.G., ALTSCHAEFFL A.G. (1977)** “ Conditions Causing Piping in Compacted Clay”, Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, pp. 240-259.
- LAWSON, C.R.(1982):** “Filter criteria for geotextiles: relevance and use”. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE. Vol 108.
- LEATHERWOOD F.N. , PETERSON D.F. (1954)** “ Hydraulic Head Loss at the Interface Between Uniform Sands of Different Sizes”, Transactions, American Geophysical Union, 35(4), pp 588-594.
- LEONARDS, HUANG Y RAMOS (1991)** “Piping and Erosion Test at Conner Run Dam”. Journal of Geotechnical Engineering. Vol.117, No.1. Ene. 1991.

- LOCKE M.R. , INDRARATNA B. (2000)** “Erosion and Filtration of Cohesive Soils”, Geofilters 2000, June, Poland.
- LOCKE, M.R., DELGADO, F., INDRARATNA, B. (1999)**, “Métodos Numéricos en el Análisis de Filtros Granulares”, VI Jornadas Españolas de Grandes Presas, Málaga, Comité Nacional Español de Grandes Presas, pag. 137-150.
- LORINCZ J. (1992)** “On Particle Migration with the Help of Entropy”, in Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heiblum & Schuler (eds.), 1993 Balkema, Rotterdam, Netherlands, Proceedings of Geofilters'92, held in Karlsruhe, Germany, October 1992, pp 67-70.
- LOUDIERE, D., FAYOUX, D (1982):** “Filtration and drainage with geotextiles. Tests and requirements”. Second International Conference on Geotextiles. Las Vegas. USA.
- LOUDIERE, D., FAYOUX, D., HOUIS, J., PERFETTI, J., SOTTON, M. (1983):** “The use of geotextiles in French earth Dams”. Water Power and Dam Construction, January 19-2
- LUBOCHKOV, E.A. (1965)** “Graphical and analytical methods for the determination of the properties of non-cohesive soils characterising suffosion”. Isvestia VNIIG, 78
- LUBOCHKOV, E.A. (1968)** “Calculation on the piping properties of cohesionless soils with the use of a nonpiping analog”. Traducido de Gidrotekhnicheskoe Stroitelstvo nº3.
- LUBOCHKOV, E.A. (1969)** “The calculation of suffosion properties of non-cohesive soils when using the non-suffosion analog”. International Conference on Hydraulic Research. Brno. 135-148
- MARANHA DAS NEVES (1989)** “Analysis of Crack Erosion in Dam Cores. The Crack Erosion Test”. De Mello Volumen, pg. 284-298.
- MARANHA DAS NEVES, E. (1987):** Discussion Report, Groundwater Effects in Geotechnical Engineering. Proceedings 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Dublin. September.
- Mc DONALD L.A., STONE P.C., INGLES O.G. (1981)** “ Practical Treatment for Dams in Dispersive Soils”, Proceeding of the 10th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng., Stockholm, June, Vol 2, pp 335-360.
- MC GOWV, A. et al. (1982):** “Compressibility and hydraulic conductivity of geotextiles”. Second International Conference on Geotextiles. Las Vegas. USA.

- MC KEANDE, E. (1977):** "The behaviour of non-woven fabric filters in subdrainage applications". CR Coll Intl Sols Textiles, Paris. Vol.2. 171-176
- MEYER L., HARMON W., MCDOWELL L. (1980)** "Sediment Sizes Eroded from Crop Row Sideslopes", Trans. ASAE, Vol. 23(4), pp 891-898.
- MILLER, R.L. ET AL (1977),** "Threshold of sediment motion under unidirectional currents". Sedimentology 6, pp 303-314
- MÜLLNER, B. W. (1992)** "Erosion Resistance of Widely Graded Cohesive Soils" Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heibaum & Schuler (eds.), 1993 Balkema, Rotterdam, Netherlands, Proceedings of Geofilters'92, held in Karlsruhe, Germany, October 1992, pp 241-248.
- NEWTON, C. T AND HURLEY, H.W. (1940)** "An Investigation to Determine the Practical Application of Natural Bank Gravel as a Protective Filter for an Earth Embankment. MSc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- OFOEGBU,A.I.(1981):** "Design procedures for the protection of earth dams cores against piping drainage". MSc Thesis Dept of Civil Engineering, Univ Toronto. Canadá.
- OGINK, H.J.M. (1975):** "Investigation of the hydraulic characteristics of synthetic fabrics". Delft Hydraulics Laboratory. Pub nº 146
- OKITA Y NISHIGAKI (1992)** " Filtration Pocesess Observed with γ -ray Density Meter ".Filters in Geotechnical and Hidraulic Engineering, Brauns, Heibaum y Schuler (eds.), 1993 Balkema, Rotterdam, Netherlands, Proceedings of Geofilters'92, held in Karlsruhe, Germany, October 1992, pp 57-62.
- PARÉ, J.J., R.ARÉS, L. CABOT & M. GARZON (1982):** "Large Scale Permeability and Filter Tests al LG3". Trans. of the 14th ICOLD. Vol IV, p. 103-123. Rio de Janeiro.
- PECK, R.B. (1990):** "Interface Between Core and Downstream Filter". H.Bolton Seed Memorial Symposium Proceedings, BiTech Publishers, Vancouver.
- PENMAN, A.D.M. (1986).-** "On embankment dam Geotechnique". 26 Rankine Lecture. Geotechnique. Vol 36.
- PEREZ RODRIGUEZ, J.R. (1986)** "Geotextiles: Filtración y Drenaje". Curso sobre el empleo de Geolótopos. CEDEX. Madrid.
- PERRY E.B. (1987)** "Laboratory Test on Granular Filters for Embankment Dams", US Army Eng., Waterways Experiment Station, Tech. Rep. GL-87-22.

- PRITCHETT, E.C. (1985):** “Embankment Seepage Control Design and Construction”. Proceedings, symposium on Seepage and Leakage from Dams and Impoundments, ASCE. Denver.
- QUESNEL, B. (1963)** “Traité d’hydraulique fluviale appliquée – cours d’eau non navigables”. Editions Eyrolles. Paris.
- RALLINGS (1965)** “An Investigation into the Causes of Failure of Farm Dams in the Brigalow Belt of Central Queensland”, Masters of Engineering Thesis, University of Queensland.
- RALLINGS (1966)** “An Investigation into the Causes of Failure of farm Dams in the Brigalow Belt of Central Queensland” Water Research Foundation of Australia Bull. No. 10.
- REDDI L., BONALA M. (1997a)** “Critical Shear Stress and its Relationship with Cohesion for Sand-Kaolinite Mixtures”, Canadian Geotechnical Jour., 34, pp. 26-33.
- REDDI L., BONALA M. (1997b)** “Analytical Solution for Fine Particle Accumulation in Soil Filters”, Jour. Geotechnical Engng Div. ASCE, Vol. 123, No. 12, pp. 1143-1152.
- REHFELD E. (1967)** “Die Erosionsbeständigkeit Bindiger Lockergesteine”, Wiss, Zeitschrift de TU Dresden, 5/67, pp 1431-1437.
- REGE S. AND FOGLER H. (1988)** “A Network Model for Deep Bed Filtration of Solid Particles and Emulsion Drops” Jour. AIChE, Vol. 34, No. 11, pp. 1761-1772.
- RESENDIZ D. (1977)** “Relevance of Atterberg Limits in Evaluating Piping and Breaching Potential”, Dispersive Clay, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, pp 341-353.
- RIPLEY, C.F. (1983):** “Design of filters for clay cores of dams”. ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division. Vol.109.
- ROMANA M. et al (1977)** “Erosion Behavior of a Great Cut in Limestones and Clay Stones at Sagunto, Spain”, Int. Symposium The Geotechnics of Structurally Complex Formations, April, Vol. 1, pp 415-421.
- RYKER N.L. (1976)** “Encountering Dispersive Clays on Soil Conservation Service Projects in Oklahoma”, Dispersive Clay, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, pp 370-389.
- SATTON C.T., MITCHELL J.K. (1977)** “Influence of Eroding Solution Composition on Dispersive Behavior of a Compacted Clay”, Dispersive Clay,

Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, pp 398-407.

SCHOBBER, W., TEINDL, H. (1979): "Filters criteria for geotextiles". Seventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Brighton.

SCHULER U. (1996) "Scattering of the Composition of Soils. An Aspect for the Stability of Granular Filters" Geofilters'96, Comptes rendus Proceedings, Lafleur, J. & Rollin, A. L. (Eds.), ISBN 2-553-00561-X, Montréal, Québec 1996, pp 21-34.

SCHULER U., BRAUNS J. (1992) "Behavior of Coarse and Well-Graded Filters", Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heibaum & Schuler (eds.), 1993 Balkema, Rotterdam, Netherlands, Proceedings of Geofilters'92, held in Karlsruhe, Germany, October 1992, pp 3-18.

SECO E PINTO, P.S., SANTANA, T. (1989) "Filters for Clay Cores of Embankments Dams". Proceedings, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro.

SHERARD ET AL (1992) "Embankment Dams: Sherard Contributions", Sherard Memorial Volumen, Edited by Sukhmander Singh, ASCE Special Publication No. 32, ISBN 0-87262-897-3.

SHERARD J.L. (1953) "Influence of Soil Properties in Construction Methods on the Performance of Homogenous Earth Dams". Technical Memorandum 645 U.S. Bureau of Reclamation. Denver Colorado.

SHERARD J.L. (1973) "Embankment Dam Cracking", capítulo de Embankment Dam Engineering. Casagrande Volume. John Wiley & Sons. New York.

SHERARD J.L. (1979) "Sinkholes in Dams of Coarse, Broadly Graded Soils". ICOLD, 13th Congress on Large Dams, Q.49 R.2. New Delhi.

SHERARD J.L. (1982a) "Filter tests on fine-grained clayey soils using high water pressures". Manuscript SCS Soil Mechanics Laboratory, Lincoln, Nebraska.

SHERARD J.L. (1982b) "Laboratory filter research using very uniform sands as base material with relatively high water pressure and flow". Manuscript SCS Soil Mechanics Laboratory, Lincoln, Nebraska.

SHERARD J.L. (1983): Discussion: Design of filters for clay cores of dams. ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division. Vol.109.

SHERARD J.L. (1984): "Trends and Debatable Aspects in Embankment Dam Engineering". Water Power & Dam Construction, December, p. 26-32.

SHERARD J.L. (1985): “Hydraulic Fracturing in Embankment Dams”. Symposium on Seepage and Leakage from Dams and Reservoirs. Denver. Colorado.

SHERARD J.L. (1986) “Hydraulic Fracturing in Embankment Dams”, Journal of the Geotechnical Division, Vol. 112, No. GT10, October 1986, pp 905-927.

SHERARD J.L., DECKER R. (1977) “Some Engineering Problems With Dispersive Clays” Proceedings, Symposium on Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM, Special Technical Publication 623, 1977, ASTM, Philadelphia, Pennsylvania, pp 3-12.

SHERARD J.L., DECKER R., RYKER N. (1972) “Piping in Earth Dams of Dispersive Clays”. ASCE, Vol.1, Part.1.

SHERARD J.L., DUNNIGAN L.P. (1985) “Filters and Leakage Control in Embankment Dams” Proceedings, Symposium on Seepage and Leakage from Dams and Impoundments, R.L. Volpe and W.E. Kelly eds., ASCE 1985, pp 1-30.

SHERARD J.L., DUNNIGAN L.P. (1989) “Critical Filters for Impervious Soils” Jour. Geotech. Engineering Div. ASCE, Vol 115, No. GT7, July 1989, pp 927-947.

SHERARD J.L., DUNNIGAN L.P., DECKER R. (1976a) “Identification and Nature of Dispersive Soils”, Jour. Geotechnical Engng Div. ASCE, Vol. 102, No. GT4, pp 287-301.

SHERARD J.L., DUNNIGAN L.P., DECKER R., STEEL E. (1976b) “Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils” Jour. Geotech. Engineering Div. ASCE, Vol 102, No. GT1, January 1976, pp 69-85.

SHERARD J.L., DUNNIGAN L.P., TALBOT J. (1984a) “Basic Properties of Sand and Gravel Filters” Jour. Geotech. Engineering Div. ASCE, Vol 110, No. GT6, June 1984, pp 684-700.

SHERARD J.L., DUNNIGAN, L.P., TALBOT, J.R. (1984b) “Filters for silts and clays”. ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division. Vol.110.

SHIELD A. (1936) “Anwendung der aen lickei kemechanik und der tur bulentz porschung auf die geschiebebewegung” (Berlin 1936)

SILVEIRA A. (1965) “An Analysis of the Problem of Washing through in Protective Filters”, Proc. 6th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Canada, Vol. 2, pp. 551-555.

SILVEIRA, A. (1992) “A Method for Determining the Void Size Distribution Curve for Filter Materials”, Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering,

Brauns, Heibaum & Schuler (eds.), 1993 Balkema, Rotterdam, Netherlands, Proceedings of Geofilters'92, held in Karlsruhe, Germany, October 1992, pp 71-74.

SILVEIRA, A. (1996) "Significancy and compatibility of percolation tests" Geofilters'96, Comptes rendus Proceedings, Lafleur, J. & Rollin, A. L. (Eds.), ISBN 2-553-00561-X, Montréal, Québec 1996, pp 463-468.

SMITH, W. O., FOOTE, P.D. Y BUSANG, P.FILTRO (1929) "Packing of Homogeneous Spheres", Physics Review, Vol. 34, Noviembre 1929, pag. 1271-1274

SORIANO, A. (1993) "El Comportamiento de las Presas de Materiales Suelos y su Auscultación". Simposium sobre Geotecnia de presas de materiales sueltos. Zaragoza. Octubre 1993.

SORIANO, A. (1997) "Acceptable Deformation and Hydraulic Fracturing Risk at Tous Dam". Discusión de la Cuestión nº73. XIX ICOLD. Volumen 5º. Florencia.

SUGII, UNO Y KANBE (1996) "Evaluation of Filter Considering Information about Pore Size". Geofilters'96. Comptes Reduns Proceedings, Lafleur y Rollin (Eds.), Bitech Publichers, Canada.

TERZAGHI K. (1922) "Der Grundbruch an Stauwerken und Seine Verhütung Forcheimer-Nummer Wasserkr, 17, pp. 445-449, quoted by Vafai (1996).

TERZAGHI, K., PECK, R.B. (1948) Soil mechanics in engineering practice. New York.

TRAGSA ET AL. (1998) "Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas y Control de la Erosión", TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente, Ediciones Mundi-Prensa, ISBN 84-7114-733-5, Madrid.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1971) "Dewatering and Groundwater Control for Deep Excavations", Technical Memorandum No. 5-818-5 (April), Office of Chief of Engineers, US Army, Washington D.C.

U.S. BUREAU OF RECLAMATION (1980) "Densidad Relativa de Suelos sin Cohesión. Norma E-12". Manual de Tierras, Ed. Bellisco, ISBN 84-85198-06-9. Madrid 1980.

U.S. BUREAU OF RECLAMATION (USBR) (1963) Earth Manual, First Edition (revised), US Govt. Printing Office, Washington D.C., 751p.

URIEL, S. (1981) Nota sobre la ampliación del núcleo de arcilla de la Presa de Canales.

- URIEL, S. (1993a)** “Criterios de fracturación hidráulica en núcleos de presas de materiales sueltos”. Simposium sobre Geotecnia de presas de materiales sueltos. Zaragoza. Octubre 1993.
- URIEL, S. (1993b)** “Diseño estático y dinámico. Riesgo de fisuración. Casos patológicos de presas españolas”. Simposium sobre Geotecnia de presas de materiales sueltos. Zaragoza. Octubre 1993.
- URIEL, S. (1994)** “Criterios para los estudios básicos. Consideraciones geotécnicas, del cemento y de los materiales”. Curso de seguridad de presas. Madrid. Mayo 1994.
- URIEL, S. (1999)**, “Determinación del riesgo de Fisuración en Presas de Materiales Suelos”, VI Jornadas Españolas de Grandes Presas, Málaga, Comité Nacional Español de Grandes Presas, pag. 277-290.
- URIEL, S. et al. (1986)**: Curso sobre el empleo de Geolótropos. CEDEX. Madrid.
- USACE (1948)** “Laboratory Investigation of Filters, Enid and Grenada Dams”. Technical manual nº3-245. United States Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- USACE (1953)** “Filters experiments and design criteria”. Technical memorandum nº3. United States Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- USACE (1982)** “Earth and Rock Fill Dams. General Design and Construction Considerations”. EM-1110-2-2300, May.
- USACE (1986)** “Engineering and Design - Seepage Analysis and Control for Dams”. EM 1110-221901 September.
- VAFAI F. (1996)** “Analytical Modelling and Laboratory Studies of Particle Transport in Filter Media”, PhD Thesis, University of Wollongong, NSW, Australia.
- VAID, Y.P., TOMLINSON, S.S. (1996)** “Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion” Geofilters’96, Comptes rendus Proceedings, Lafleur, J. & Rollin, A. L. (Eds.), ISBN 2-553-00561-X, Montréal, Québec 1996, pp 419-428.
- VALLARINO E. (1998)** “Tratado Básico de Presas”, Vol. 1 y 2, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. ISBN 84-380-0145-9, Madrid.
- VAN ZANTEN, R. (1986)** “Geotextiles and Geomembranes in Civil Engineering”. Rotterdam.

- VAUGHAN P., SOARES H. (1982)** “Design of Filters for Clay Cores of Dams”, Jour. Geotech. Engineering Div., ASCE, Vol. 108, pp. 17-31.
- VAUGHAN P.R. (1970)** “Cracking of Clay Cores of Dams”. Surveyor.London.
- VIZCAÍNO, M. (1993)** “Núcleos Impermeables en Presas de Escollera con Materiales no Convencionales”. Tesis Doctoral, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
- VIZCAÍNO, M. (1999)** “Erosión Interna a través de la Presa y el Cimiento”, VI Jornadas Españolas de Grandes Presas, Málaga, Comité Nacional Español de Grandes Presas, pag.99-106.
- WILSON,L.C., MELVILL, A.L. (1983)** “Discussion: Design of filters for clay cores of dams”. ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division. Vol.109.
- WILSON,S.D., MARSAL, R.J. (1979)** “Current Trends in Design and Construction of Embankment Dams”. ASCE.
- WITT K. (1992)** “Reliability Study of Granular Filters”, Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heibaum & Schuler (eds.), 1993 Balkema, Rotterdam, Netherlands, Proceedings of Geofilters'92, held in Karlsruhe, Germany, October 1992, pp 35-42.
- WITT, K.J. & J. BRAUNS (1984)** “The influence of parameter variation on the reliability of filters”. Proc. of the International Conference on Safety of Dams. Coimbra.
- WITTMANN, L. (1977)** “Zur Problematik der Filterbemessung bei kunstlichen und natuerlichen Filtern”. Colloque International sur l'Emploi des Textiles en Geotechnique. Paris.
- WITTMANN, L. (1979)** “The process of soil filtration: its physic and approach in engineering practice”. Proc. 7th European Conference on Soil Mechanics, Vol.1.
- WITTMANN, L. (1980)** “Filtrations:und Transportphaenomenon in Poroesen Medien”. Veroeffentlichunger. Universitaet Karlsruhe. Helf 86.
- WITTMANN, L., (1982)** “Soil Filtration Phenomena of Geotextiles”, Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles, Vol. 1, Las Vegas, Nevada, USA, Agosto 1982, pag. 79-83
- WOLSKI W. (1965)** “Model Tests on the Seepage Erosion in the Silty Clay Core of an Earth Dam”, 6th Int. Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Canada, Vol II, pp 583-587.

WOLSKI W., FURSTEMBERG, A., MIODUSZEWSKI, W., RECZECK, J. (1970) “Protection against piping of dam cores made of flisch origin cohesive soils”. X Congreso ICOLD.

WOLSKI, W., SZYMANSKI, A., KODA E. (1991) “Efficiency of strips drains in soil foundation of an embankment dam”. 17° ICOLD Congress. Q 67. Viena 1991.

YAMAGUCHI, Y., KAWASAKI, M., NAKAMURA, A. (1996) “Filter design and problems in Japanese rockfill dams” Geofilters’96, Comptes rendus Proceedings, Lafleur, J. & Rollin, A. L. (Eds.), ISBN 2-553-00561-X, Montréal, Québec 1996, pp 265-274.

ZASLAVSKY,D., KASSIF, G. (1965) “Formulation of piping mechanism in cohesive soils”. Faculty of Civil Engineering, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa.

ZHU, J. H., ANDERSON, S. A. (1996) “Permeability, erosion resistance and filters of well-graded gravelly soil for embankment dam construction” Geofilters’96, Comptes rendus Proceedings, Lafleur, J. & Rollin, A. L. (Eds.), ISBN 2-553-00561-X, Montréal, Québec 1996, pp 317-326.

ZIEMS J. (1968) “ Beitrag zur Kontakterosion Nichtbindiger Erdstoffe”, Dissertation TU Dresden.

ZWECK H. , DAVIDENKOFF R. (1957) “Experiments on uniformly graded filters”. Proc.of 4th Conference ISSMFE.

12 ANEJOS

12.1 Propuesta de norma para la realización de ensayos NEF

12.1.1 Preparación del Filtro:

1.- Confeccionar la granulometría del filtro objeto del ensayo a partir de las distintas fracciones lavadas y secas, para obtener 1.500 grs. de material. (FOTOS 1, 2 y 3)

2.- Añadir un 3% de agua (aproximadamente 45 cm^3), con respecto a su peso seco, homogeneizando perfectamente toda la muestra.

3.- Cuartear en cuatro partes de aproximadamente igual peso, teniendo la precaución de arrastrar todo el material fino que quede adherido en el cuarteador, cubetas, etc. (FOTO 4)

4.- Introducir la camisa de perpex de 80 mm. de diámetro en el soporte de aluminio, colocar un papel de filtro del mismo diámetro y sobre éste un discomalla de luz cuadrada de 1,19 mm. Pesarse el conjunto en una balanza de sensibilidad 0,1 gramo y medir la altura correspondiente al mismo. (FOTO 5)

5.- Colocar todo el conjunto anterior sobre una mesa vibratoria, anclando la base de aluminio a la mesa mediante los tornillos de sujeción. Agregar uno de los cuarteos anteriormente efectuados para conseguir una vez compactado, una tongada de una pulgada (2,54 cm.) (Usar aprox. 261 gr.). Introducir la sobrecarga de 20 libras, (9,07 Kg.) y someter a compactación la muestra mediante 1 minuto de vibración. (FOTOS 6 y 7)

6.- Sacar la sobrecarga, con cuidado de no perder el material a ella adherido, y sin escarificar, agregar una segunda fracción de filtro con las mismas consideraciones que la anterior.

7.- Repetir el proceso hasta completar 3 tongadas de filtro.

8.- Colocar un cordón de arcilla de modelar o plastilina, de aproximadamente 5mm de espesor. Ajustarlo presionando levemente con las yemas de los dedos contra las paredes de la probeta. Rellenar el hueco interior con la cuarta fracción de filtro e introducir la sobrecarga procediendo a la compactación.

(NOTA : muchos autores emplean como material lateral arena más fina que el filtro, pero esto puede dar problemas de migración de partículas al compactar por vibración y por lo tanto falsear los resultados)

9.- Reunir los sobrantes de los 4 cuarteos para determinar realmente la humedad de la muestra.

10.- Quitar los tornillos de sujeción y pesar el conjunto formado por la base de aluminio, el papel, la malla y el filtro húmedo compactado.

11.- Determinar la altura media de la probeta de filtro confeccionada, con un mínimo de cuatro lecturas. (FOTO 8)

12.- De las determinaciones efectuadas anteriormente se deberán obtener los pesos húmedo y seco del filtro así como su humedad, volumen y densidad seca.

12.1.2 Preparación de La Base

1.- Colocar de nuevo todo el conjunto en la mesa vibratoria y fijar con los tornillos de sujeción.

2.- Tomar en una cápsula de porcelana una fracción representativa del material base a ensayar y determinar la humedad con la que va a ser compactada, utilizando una balanza de 0,1 gramo de precisión.

3.- Introducir la primera fracción de material base (unos 138 grs. de material con la humedad preestablecida) y regularizar la superficie con una espátula. Introducir la

sobrecarga de 20 libras y sin presionar, girarla con el objeto de allanar la superficie y evitar que cuando se empiece a compactar, la base se encuentre demasiado esponjosa.

4.- Compactar manualmente esta primera capa de material base mediante 25 golpes con la maza tipo “Army” diseñada para tal fin, escarificando la superficie al finalizar la compactación. (FOTO 9)

5.- Repetir el proceso, excepto la escarificación, con una nueva tongada para conseguir una altura total de aproximadamente una pulgada (2,54 cm.). (FOTO 10)

6.- Limpiar la superficie de la última capa, eliminando el material adherido a la camisa de perpex.

7.- Perforar la pastilla de material base con la aguja de 1 milímetro de diámetro, hasta introducirse 5 milímetros en el filtro. Retirar la aguja con cuidado de no deformar el orificio practicado. (FOTOS 11 y 12)

8.- Pesar en la balanza el conjunto formado por la base de aluminio, el papel, el discomalla, la camisa de perpex, el filtro húmedo y la probeta de material base húmedo y compactado.

9.- Determinar por diferencia la altura media de la probeta de material de base con un mínimo de 4 lecturas.

10.- De las determinaciones efectuadas anteriormente, es decir, de los pesos, humedades y mediciones ; obtener los siguientes parámetros :

- Peso de la base húmeda
- Humedad de compactación de la base
- Peso seco de la base
- Volumen ocupado por la base

- Densidad seca de la base

12.1.3 Terminación de la Probeta de Ensayo

1.- Colocar un discomalla sobre la superficie del material de base, y a continuación agregar gravilla de tamaño comprendido entre 2,5 - 5,0 milímetros, bien limpia y tamizada, repartiéndola en el interior de la camisa sin someterla a ningún tipo de compactación. Colocar otro discomalla sobre la gravilla y encastrar la cabeza de la célula que lleva acoplado el manómetro. El espesor de la gravilla debe ser tal que al encastrar la cabeza de la célula no se pueda producir esponjamiento. (FOTOS 13 y 14)

2.- Girar 180° todo el conjunto, de manera que apoye sobre la mesa la cabeza de la célula recién colocada. Retirar ahora la base de aluminio y quitar el papel de filtro con ayuda de unas pinzas. Agregar de nuevo gravilla de tamaño comprendido entre 2,5 - 5,0 milímetros, como se indicó en apartados anteriores, colocando los discomallas necesarios. Terminar por encastrar la otra cabeza de la célula (salida de agua), asegurándose que exista una perfecta estanqueidad.

12.1.4 Ejecución del Ensayo

1.- Introducir por la boca de entrada agua sin presión hasta llenar por completo la probeta, con cuidado de expulsar las burbujas de aire que suelen formarse. Conectar la manguera del agua a la entrada de la probeta y colocarla sobre su soporte.

2.- Someter el conjunto a la presión requerida y controlada por el manómetro situado a la entrada de la célula, lo más rápidamente posible, con ayuda del sistema de presión utilizado.

3.- Anotar cada intervalo de tiempo correspondiente la turbidez del agua, su presión de entrada y su caudal o volumen; así como el comportamiento del conjunto filtro-base.

4.- Finalizado el ensayo, desmontar la probeta cuidando no alterar la pastilla de material de base y observar el orificio de entrada y salida anotando su diámetro así como otras indicaciones de interés.

12.1.5 Propuesta de Hoja de Ensayo :

12.2 Determinación de la turbidez por nefelometría

12.2.1 Fundamento.

Las suspensiones realizadas con suelo en agua, presentan una absorbancia que es proporcional a la cantidad de suelo presente en la suspensión. Esta se podría medir si mantenemos estable y suficientemente homogénea la suspensión, durante un espacio de tiempo idóneo para medir la absorbancia que la misma produzca.

El suelo seco de cada muestra problema, se obtiene a partir de la curva de calibrado previamente obtenida.

Este método de medición de la turbidez ha sido elaborado en colaboración con D. Francisco Lamas, del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

12.2.2 Material y aparatos.

- Frascos cilíndricos calibrados a 100 cm³, con tapón.
- Pesa filtros tarados de 50 cm³ de vidrio.
- Baño termostático para 20 °C +- 0.5 °C.
- Estufa para 110 °C +- 1 °C.
- Balanza gravimétrica, con una precisión de 0,1 mgr.
- Espectrofotómetro de emisión con haz colimado de longitud de onda variable, con posición a 420 nm.

12.2.3 Reactivos.

- Exametafosfato sódico [(Na P O₃)₆]. P.R.S.

- Goma Arábica. P.R.S.
- Solución Peptizante.- se disuelve en agua, $[(\text{Na P O}_3)_6]$ al 4 %, y se añade 25 cm^3 , de solución de goma arábica al 5 %, filtrando la solución resultante.

12.2.4 Curva de calibrado.

En frascos cilíndricos de un litro, se introducen partes alícuotas de agua destilada y suelo pesado con precisión de 0,1 mgr, previamente desecado a peso constante, en la proporción requerida para producir una concentración final perfectamente conocida.

Se fabrica un frasco por tipo de suelo a ensayar. Para cada suelo, se efectúan las disoluciones pertinentes para obtener 100 cm^3 , de cada una de las concentraciones patrón.

Se toman 40 cm^3 de cada una de las anteriores, y se completa a 50 cm^3 con la solución de peptizante. Todas las muestras resultantes se homogeneizan con agitación suave durante 5 min, y se llevan al baño termostático durante otros 5 min. Después se vuelven a agitar durante un minuto, y se disponen en las cubetas del espectrofotómetro, midiendo las absorbancias correspondientes. Se hace un blanco con agua destilada y 10 cm^3 , de solución peptizante.

Con los valores obtenidos se construye la recta de calibrado. Una para cada tipo de suelo.

12.2.5 Valoración de las muestras.

Se opera exactamente igual a como se ha indicado anteriormente, haciendo también un blanco.

12.2.6 Comprobación por pesada. (Método de la estufa)

De la muestra en suspensión que llega al laboratorio, se toman 50 cm³, o un volumen conocido, y se pasan a un pesa filtros tarado. Se introduce en una estufa a 110 °C llevándose a sequedad. Se deja enfriar y se pesa.

12.2.7 Cálculo de los resultados.

12.2.7.1 Del Turbidímetro.

El contenido de soluto de las muestras se obtiene llevando las lecturas de absorbancias netas (restando el blanco), a la curva de calibrado. Expresando los resultados en p.p.m.

12.2.7.2 Del método de la estufa.

Por diferencia de pesada entre el peso final y la tara, tenemos el peso de suelo en 50 cm³. Esto lo expresamos en p.p.m.

12.2.8 Observaciones.

Si se sospecha que la lectura sobrepasará la máxima, de la recta de calibrado, se procederá en la suspensión original, a una dilución, teniéndose en cuenta en los cálculos.

Si se producen coloraciones que interfieren en la lectura, estas se obviarán efectuándose blancos testigo de color. En los casos ensayados no se ha tenido este problema.

12.2.9 Referencias.

- Método utilizado en el laboratorio de suelos y aguas de IRYDA para algunos precipitados. Revista de la empresa PANREAC “ Informes de química analítica” pp. 1-6 1981.
- Método utilizado para otros precipitados , por el instituto de hidrología del CSIC.
- Determinación de la turbidez en aguas naturales. Método nefelométrico. J. Rodier. “Análisis de aguas”, editorial Omega pp. 66-69 (1981).

12.3 Métodos estadísticos empleados²⁶

12.3.1 Correlaciones bivariadas

Se han construido varias tablas que muestran la correlación parcial entre distintas variables, con objeto de determinar la existencia de relaciones lineales entre las mismas. Las tablas contienen el valor:

$$r = \frac{\text{cov}(X, Y)}{S_X \cdot S_Y}$$

coeficiente de correlación lineal de Pearson, así como su significación estadística para el tamaño muestral considerado. Estas correlaciones son útiles además para formular estudios de colinealidad entre variables independientes que estén altamente correlacionadas en un modelo de regresión múltiple.

12.3.2 Regresión estadística simple y múltiple

En el estudio se han propuesto varios modelos de regresión simple (lineal y no lineal) y múltiple. El modelo genérico es el habitual, es decir, $Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$, siendo Y la variable dependiente o explicada y X_i con $i=1\dots n$, las variables independientes o explicativas.

En una primera fase se han considerado ajustes “sin modelo”, esto es, sin suponer ninguna hipótesis distribucional sobre los datos. Posteriormente, comprobando mediante tests de normalidad que no puede ser rechazada esta hipótesis, se han construido modelos de regresión con los supuestos de normalidad, homocedasticidad, incorrelación de los errores. Además se supondrá que éstos están centrados en 0. Para ello, con el programa SPSS ver 9.0, se han realizado los siguientes análisis:

²⁶ El estudio estadístico se ha realizado con la colaboración de D. Pedro García, Profesor Titular de Estadística de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Granada

Estudio de los residuos del modelo para comprobar las hipótesis del mismo. Sobre éstos se estudió la normalidad mediante la prueba χ^2 , se establecieron diagnósticos por caso con objeto de detectar valores atípicos, y la incorrelación de los mismos mediante la prueba de Durbin-Watson.

A continuación se han construido tablas que muestran los coeficiente asociados a las variables independiente en el modelo de regresión múltiple, así como su valor t-Student asociado al coeficiente, que determina la significación estadística del mismo. Además se estudiará la posible colinealidad de las variables independientes del modelo.

12.3.3 Regresión Paso a Paso

En una segunda fase, y con objeto de detectar las variables que con mayor incidencia explican la variable dependiente se han formulado modelos de regresión paso a paso Forward con el criterio estándar F=4 de entrada de variables explicativas. Una vez incluidas las variables en el modelo de regresión se construye una tabla de coeficientes como en el caso anterior.

12.3.4 Análisis Factorial

Este tipo de análisis intenta identificar variables subyacentes, o factores, que expliquen la configuración de las correlaciones dentro de un conjunto de variables observadas. El análisis factorial se suele utilizar en la reducción de los datos para identificar un pequeño número de factores que explique la mayoría de la varianza observada en un número mayor de variables manifiestas. También puede utilizarse para generar hipótesis relacionadas con los mecanismos causales o para inspeccionar las variables para análisis subsiguientes (por ejemplo, para identificar la colinealidad antes de realizar un análisis de regresión lineal).

En nuestro caso se usa con el objeto de confirmar la existencia de factores principales y otros que se pueden considerar concomitantes con éstos. El método

proporciona por tanto una forma de reducir la dimensionalidad del problema estadístico.

Los estadísticos considerados en el análisis han sido los autovalores de la matriz de correlaciones, el porcentaje de variación explicada por cada dimensión principal y la medida KMO de la adecuación muestral. Así mismo se han construido los biplots de proyección en las dimensiones principales rotadas.

13 FOTOGRAFÍAS



Foto 1.- Fracciones del filtro (I)



Foto 2.- Fracciones del filtro (II)



Foto 3.- Filtro 20/0.9 preparado para el ensayo



Foto 4.- Operación de cuarteo del filtro



Foto 5.- Pesado de la probeta con el soporte y el disco



Foto 6.- Compactación del filtro por vibración con sobrecarga



Foto 7.- Supeficie del filtro después de compactar



Foto 8.- Medición del espesor del filtro después decompactar



Foto 9.- Escarificado de la primera tongada de suelo base compactado



Foto 10.- Superficie de la segunda tongada de suelo base compactado



Foto 11.- Perforación del orificio de 1 mm con soporte de plástico



Foto 12.- Orificio de 1 mm después de perforar

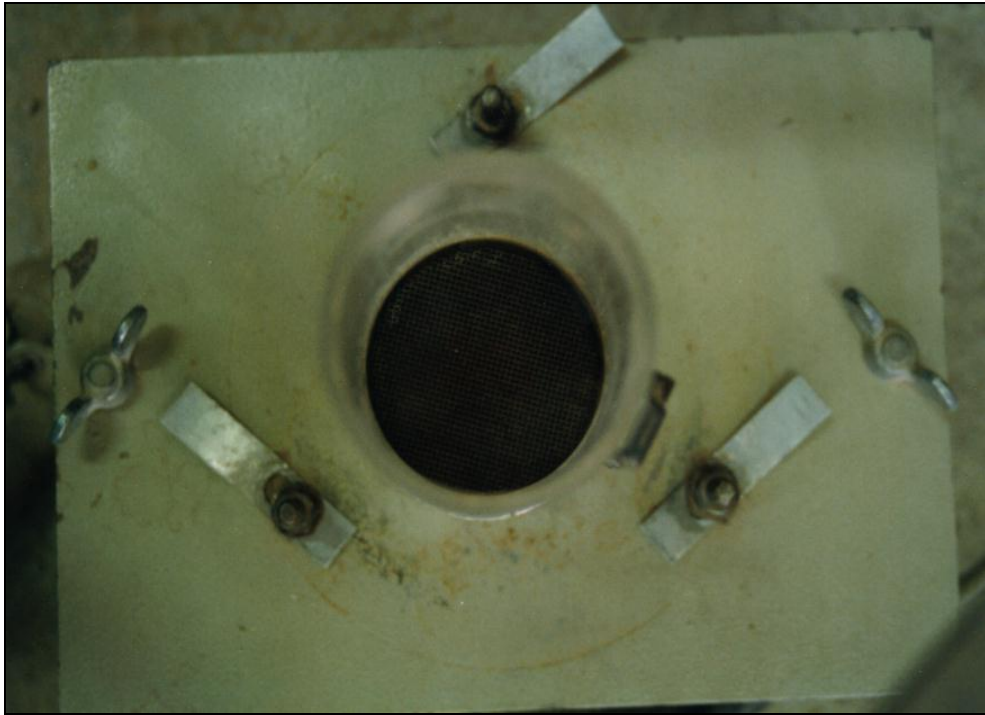


Foto 13.- Colocación de una disco-malla sobre la superficie del suelo base



Foto 14.- Colocación de la grava de tranquilización

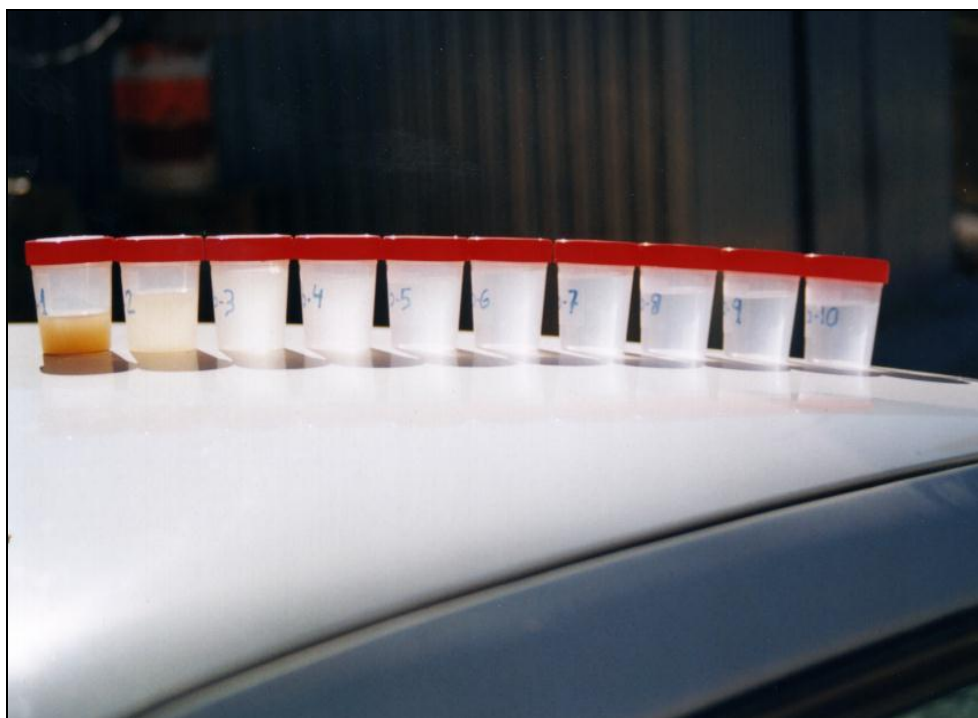


Foto 15.- Muestras de agua de salida del ensayo



Foto 16.- Retirada cuidadosa de filtro al terminar el ensayo



Foto 17.- Orificio de aguas arriba después del ensayo



Foto 18.- Orificio de aguas arriba después del ensayo: obsérvese que está intacto



Foto 19.- Ensayo NEF con gran erosión

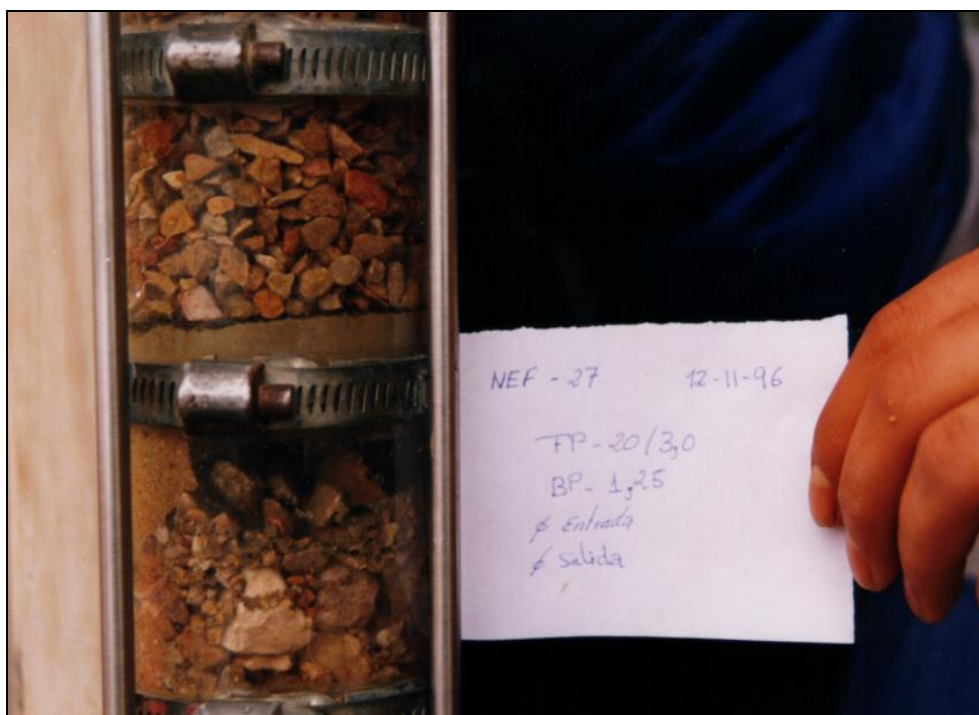


Foto 20.- Ensayo NEF con gran erosión: obsérvese la pérdida de filtro

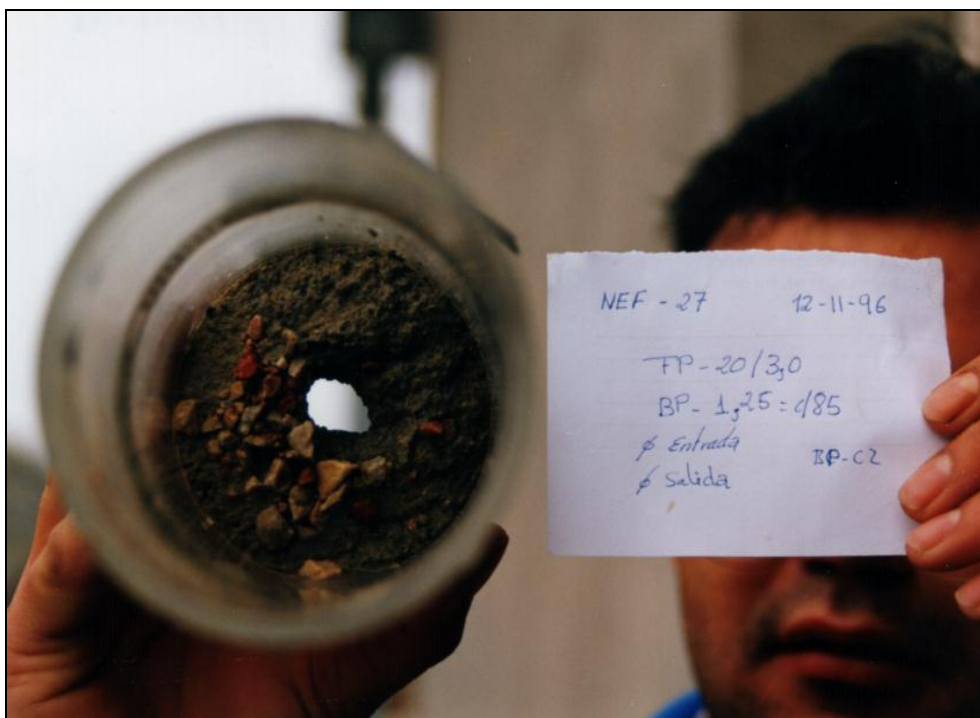


Foto 21.- Ensayo NEF con gran erosión: estado final del orificio



Foto 22.- Ensayo NEF con gran erosión: vista desde aguas arriba

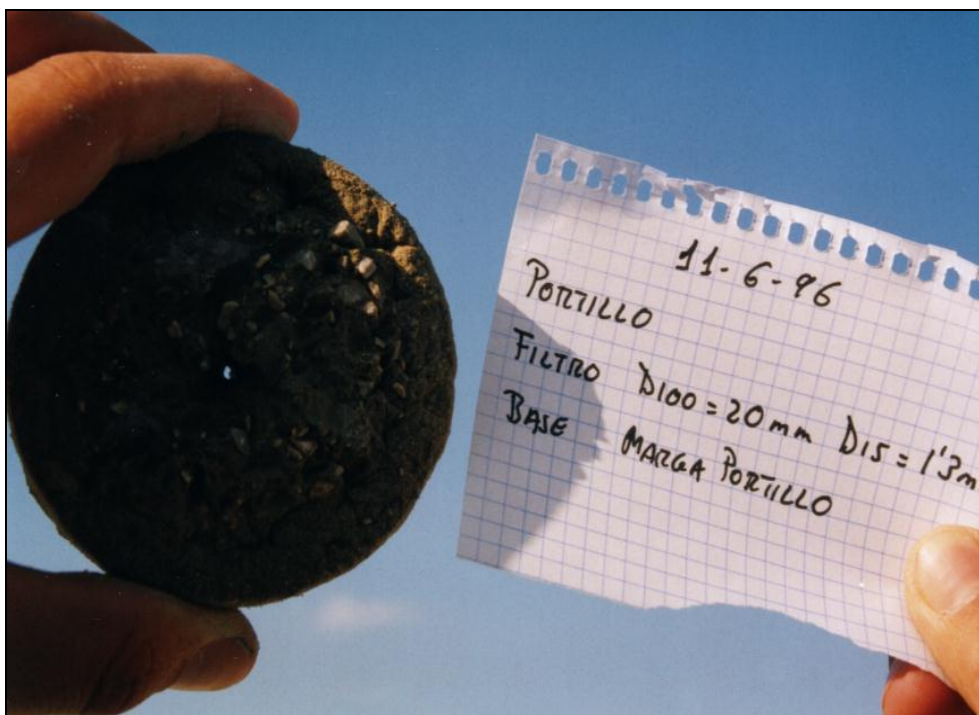


Foto 23.- Pastilla de suelo base recuperada después del ensayo

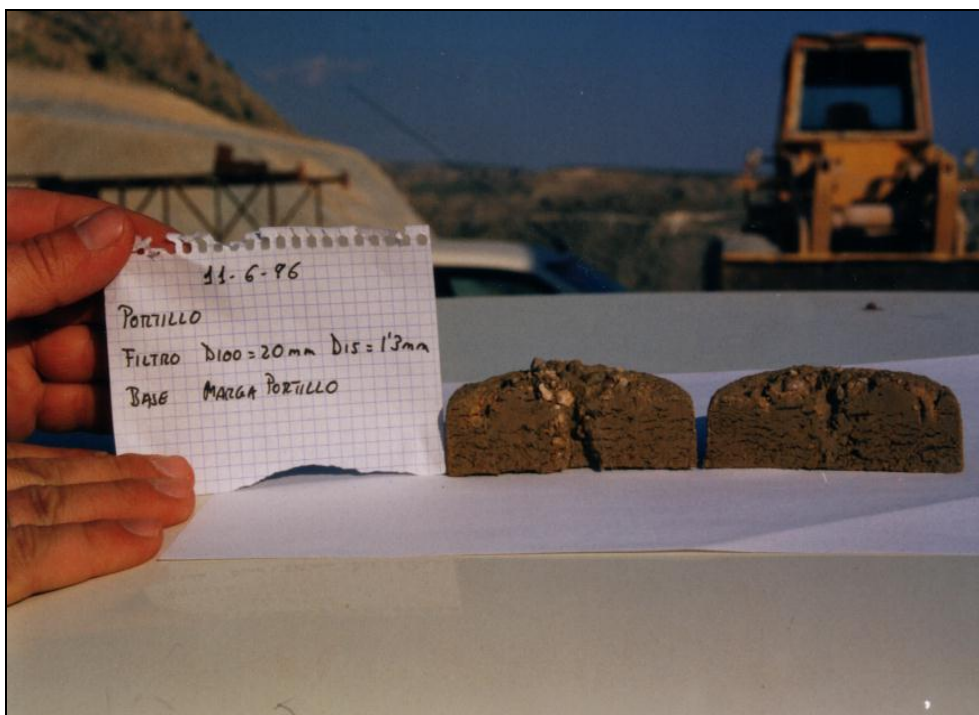


Foto 24.- Pastilla de suelo base seccionada por el orificio: nótese la erosión

FOTOGRAFÍAS
