



Dinámica Ambiental
UNIVERSIDAD DE GRANADA

METODOLOGÍA DE MEJORA PARA EL DISEÑO DE LOS DIQUES EN TALUD: CORRECCIÓN DEL EFECTO ESCALA

PROYECTO FIN DE CARRERA

Alumna: Pilar Díaz Carrasco

Directores del Proyecto: Miguel Ortega Sánchez - Montserrat Vílchez Solís

Departamento: Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica

UNIVERSIDAD DE GRANADA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS



ugr

Universidad
de Granada



Resumen

Un dique de abrigo es una obra exterior cuya función básica es proporcionar a las instalaciones portuarias el abrigo necesario frente a la acción de los agentes marítimos, de manera que se pueda asegurar la operatividad de las mismas. Existen 3 tipologías principales de diques dependiendo fundamentalmente de su geometría y de la forma de resistir la acción del oleaje: diques verticales, diques en talud y diques mixtos.

Cuando el oleaje interactúa con el dique de abrigo se modifican sus propiedades (por ejemplo, geometría) debido a las transformaciones energéticas que se producen. Asimismo, la energía del oleaje puede causar fallos o roturas parciales de los elementos que componen las diferentes tipologías de diques. Por ello, es importante conocer el comportamiento hidrodinámico de los diques con objeto de mejorar su diseño. Esta línea de trabajo ha alcanzado recientemente un avance significativo con el empleo de nuevas técnicas experimentales y potentes modelos matemáticos y de cálculo.

En este Proyecto Fin de Carrera se ha planteado en primer lugar la elaboración de un estudio sistemático de los diferentes tipos de diques de abrigo de Puertos del Estado, en los aspectos relacionados con su tipología, modos de fallo, vida útil y reparaciones; así como de los sistemas que habitualmente se aplican de inspección y monitorización. El estudio confirma que los diques en talud, que son obras compuestas por elementos granulares, son los más usados tradicionalmente en España, y que sufren averías de distinta consideración, entre otros factores, por los criterios empleados en su diseño.

A continuación este proyecto se centra en el estudio de los problemas relativos a los criterios de diseño de diques relacionados con el denominado “efecto escala”, que se produce al no conservarse simultáneamente la porosidad al escalar el modelo en los ensayos de laboratorio a escala reducida.

Para el análisis del problema planteado de evaluar el comportamiento del flujo en el medio poroso, se ha realizado una campaña de ensayos experimentales en canal de oleaje, sobre un dique en talud con oleaje regular, con los que se han obtenido, a partir de los datos de diferentes medidas de diámetros del material granular y alturas del talud sobre la cimentación, los principales parámetros que intervienen en la distribución de la energía incidente: los coeficientes de reflexión y transmisión.

A partir de los ensayos realizados, se ha configurado, aplicado y calibrado, con un único coeficiente de fricción, un modelo numérico que permite simular la parte experimental. Esta fase de modelización proporciona también los correspondientes parámetros asociados a la energía incidente, que mantienen una gran similitud con los obtenidos en el proceso experimental, lo que valida la metodología seguida. La fase de modelización y el análisis comparado de los resultados obtenidos, tanto experimentales como en el modelo numérico, se completa mediante nuevos ensayos numéricos para proceder al ajuste y minimización del error conjunto para cada par de parámetros experimentales y numéricos.

Finalmente, se establece la ecuación que describe el coeficiente de fricción asociado al error mínimo y se elabora el correspondiente diagrama de fricción para diques en talud. La ecuación obtenida señala una relación funcional del coeficiente de fricción con la altura del talud sobre la cimentación relativa y el diámetro del material granular. El diagrama obtenido es una herramienta simple y útil para obtener el coeficiente de fricción, que contribuye al conocimiento del comportamiento del flujo en el medio poroso y a la optimización del diseño de diques en talud, reduciendo el problema del efecto escala en los ensayos de laboratorio a escala reducida.

Índice general

Resumen	I
Índice general	III
Índice de figuras	VII
Índice de cuadros	XI
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
1.2. Organización del trabajo	3
2. Conceptos previos y tipologías de diques	5
2.1. Tipologías de diques de abrigo	5
2.2. Balance de energía	8
2.3. Flujo en el medio poroso	12
2.3.1. Introducción	12
2.3.2. Ecuaciones del flujo en el medio poroso	12
2.3.3. Importancia de las fuerzas resistivas	13
2.3.4. Nuevo planteamiento del flujo en el medio poroso	14
2.4. Antecedentes	15
2.4.1. Diagrama de fricción dique poroso	16
2.4.2. Diagrama de fricción dique mixto	17
3. Metodología	23
3.1. Análisis de los diques de abrigo de Puertos del Estado	23
3.1.1. Estudio de las tipologías de diques	23
3.1.2. Fallos y reparaciones de diques	24
3.1.3. Sistemas de monitorización existentes	24
3.2. Ensayos experimentales	24
3.3. Modelo numérico	26
3.3.1. Configuración del modelo	27
3.3.2. Resultados del modelo	29
3.4. Análisis de resultados	29

4. Análisis de los diques de abrigo de Puertos del Estado	33
4.1. Estudio de las tipologías de diques	33
4.2. Vida útil	39
4.3. Fallos y reparaciones realizadas en los diques de abrigo	40
4.3.1. Fallos y repaciones en diques verticales	40
4.3.2. Fallos y reparaciones en diques en talud	41
4.3.3. Averías notables en los diques de abrigo de España	41
4.3.4. Principales causas de fallo y averías	43
4.4. Sistemas de inspección y monitorización existentes	44
4.4.1. Métodos de monitorización	44
4.4.2. Herramientas para el diagnóstico e inspección automatizada de diques	45
4.4.3. Optimización de las decisiones de inspección y mantenimiento	46
4.5. Problemas relativos a los criterios de diseño: Efecto escala	47
5. Ensayos Experimentales	49
5.1. Dispositivo experimental	49
5.2. Adquisición de datos	54
5.2.1. Registros de superficie libre	55
6. Modelo Numérico	57
6.1. Características del modelo	57
6.1.1. Formulación matemática de cálculo del modelo	58
6.1.2. CORAL	59
6.2. Configuración del modelo	59
6.2.1. Geometría del dique en talud	59
6.2.2. Malla	61
6.2.3. Condiciones de oleaje	63
6.2.4. Características del medio poroso	65
6.2.5. Simulación de parámetros	66
6.3. Resultados del modelo	68
6.4. Análisis de Resultados	70
6.4.1. Comparación de Resultados	70
6.4.1.1. Geometría de dique con $F_t=0m$	71
6.4.1.2. Geometría de dique con $F_t=0.2m$	74
6.4.1.3. Geometría de dique con $F_t=0.4m$	77
6.4.2. Ajuste de resultados	80
6.4.3. Minimización de errores	82
7. Diagrama de fricción para dique en talud	85
7.1. Resultados	85
7.2. Ejemplo de aplicación	90
8. Conclusiones	93
8.1. Análisis de los diques de abrigo de Puertos del Estado	93
8.2. Ensayos experimentales	94
8.3. Modelo numérico	94
8.4. Diagrama de fricción para dique en talud	95
8.5. Futuras líneas de investigación	96

Apéndices	97
A. Formulación matemática del IH-2VOF	99
A.1. Flujo fuera del medio poroso: “The Reynolds Averaged Navier -Stokes (RANS) equations”	99
A.2. Ecuaciones de gobierno del flujo en el medio poroso: “The Volume - Averaged Reynolds Averaged Navier - Stokes (VARANS) equations”	101
B. Comparación de resultados numéricos y experimentales	105
B.1. Diámetro del material granular $D=26$ mm	106
B.1.1. Geometría de dique con $Ft=0$ m	106
B.1.2. Geometría de dique con $Ft=0.2$ m	108
B.1.3. Geometría de dique con $Ft=0.4$ m	110
B.2. Diámetro del material granular $D=40$ mm	112
B.2.1. Geometría de dique con $Ft=0$ m	112
B.2.2. Geometría de dique con $Ft=0.2$ m	114
B.2.3. Geometría de dique con $Ft=0.4$ m	116
B.3. Diámetro del material granular $D=52$ mm	118
B.3.1. Geometría de dique con $Ft=0$ m	118
B.3.2. Geometría de dique con $Ft=0.2$ m	119
B.3.3. Geometría de dique con $Ft=0.4$ m	121
B.4. Resumen	123
Bibliografía	125

Índice de figuras

2.1. Dique en talud (Guías de buenas prácticas, Año 2008)	6
2.2. Dique vertical (Guías de buenas prácticas, Año 2008)	7
2.3. Dique mixto compuesto horizontalmente (Guías de buenas prácticas, Año 2008)	8
2.4. Flujo de energía en presencia de la obra, (ROM1.0 (2009) Recomendaciones para Obras Marítimas)	9
2.5. Importancia de las fuerzas resistivas (Gu and Wang, 1991)	14
2.6. Diagrama del coeficiente de fricción característico para dique poroso, (Pérez et al., 2009)	17
2.7. Valores de los coeficientes a y b para el cálculo del coeficiente de fricción . . .	19
2.8. Coeficiente de fricción característico para dique mixto en función de las sume- rgencias relativas	20
3.1. Foto 1: Canal de oleaje de corriente, CEAMA-UGR	25
3.2. Foto 2: Canal de oleaje de corriente, CEAMA-UGR	25
3.3. Esquema del dispositivo experimental con los sensores de nivel	26
3.4. Geometría del dique en talud ensayado	27
3.5. Esquema del procedimiento seguido para obtener el diagrama de fricción de dique en talud	31
4.1. Tipologías de diques de abrigo de interés general para Puertos del Estado. . .	34
4.2. Continuación. Tipologías de diques de abrigo de interés general de Puertos del Estado.	35
4.3. Continuación. Tipologías de diques de abrigo de interés general de Puertos del Estado.	36
4.4. Continuación. Tipologías de diques de abrigo de interés general de Puertos del Estado.	37
4.5. Continuación. Tipologías de diques de abrigo de interés general de Puertos del Estado.	38
4.6. Principales diques de abrigo de interés general de Puertos del Estado que han sufrido averías importantes.	42
4.7. Principales causas de fallo	43
4.8. Porcentaje de averías según la tipología de dique	43
4.9. Porcentaje de averías según las Fachadas Marítimas	44
5.1. Parámetros geométricos del dique en talud irrebalsable ensayado	49
5.2. Dique, Diámetro 12mm	50
5.3. Talud, Diámetro 12mm	50
5.4. Dique, Diámetro 52mm	51

5.5. Talud, Diámetro 52mm	51
5.6. Montaje de la cimentación	52
5.7. Talud, Diámetro 40mm	52
5.8. Esquema del dispositivo experimental con los sensores de nivel	54
6.1. Geometría: Dique en talud con altura del talud sobre la cimentación $Ft = 0m$	60
6.2. Geometría: Dique en talud con altura del talud sobre la cimentación $Ft = 0.2m$	60
6.3. Geometría: Dique en talud con altura del talud sobre la cimentación $Ft = 0.4m$	61
6.4. Malla del modelo numérico	62
6.5. Posición sensores de nivel, Geometría $Ft = 0m$	67
6.6. Posición sensores de nivel, Geometría $Ft = 0.2m$	67
6.7. Posición sensores de nivel, Geometría $Ft = 0.4m$	68
6.8. Caso $D=12mm$ y $Ft=0m$: Comparación $H_{paredmod}$ vs $H_{paredexp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos	71
6.9. Caso $D=12mm$ y $Ft=0m$: Comparación K_{Tmod} vs K_{Texp} para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos	72
6.10. Caso $D=12mm$ y $Ft=0m$: Comparación K_{Tmod} vs K_{Texp} para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos	73
6.11. Caso $D=12mm$ y $Ft=0.2m$: Comparación $H_{paredmod}$ vs $H_{paredexp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos	74
6.12. Caso $D=12mm$ y $Ft=0.2m$: Comparación K_{Rmod} vs K_{Rexp} para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos	75
6.13. Caso $D=12mm$ y $Ft=0.2m$: Comparación K_{Tmod} vs K_{Texp} para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos	76
6.14. Caso $D=12mm$ y $Ft=0.4m$: Comparación $H_{paredmod}$ vs $H_{paredexp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos	77
6.15. Caso $D=12mm$ y $Ft=0.4m$: Comparación K_{Tmod} vs K_{Texp} para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos	78
6.16. Caso $D=12mm$ y $Ft=0.4m$: Comparación K_{Tmod} vs K_{Texp} para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos	79
6.17. Caso $Ft=0m$, $D=12mm$ y $T=1.5$ segundos: Ajuste del coeficiente de reflexión K_R	81
6.18. Caso $Ft=0m$, $D=12mm$ y $T=1.5$ segundos: Ajuste del coeficiente de transmisión K_T	82
6.19. Caso $Ft=0m$, $D=12mm$ y $T=1.5$ segundos: Minimización del error conjunto ϵ^2 de los coeficientes de reflexión y transmisión.	83
7.1. Diagrama de fricción característico para dique en talud en función de las tres alturas del talud sobre la cimentación relativas ensayadas: $0 \leq Ft/h \leq 1$	86
7.2. Valores del coeficiente a según la altura del talud sobre la cimentación relativa ensayada: $0 \leq Ft/h \leq 1$	87
7.3. Ajuste de los coeficientes de fricción característicos para la altura del talud sobre la cimentación relativa de $Ft/h = 0$ y las bandas de confianza del 95 % superior e inferior del ajuste.	89
7.4. Ajuste de los coeficientes de fricción característicos para la altura del talud sobre la cimentación relativa de $Ft/h = 0.5$ y las bandas de confianza del 95 % superior e inferior del ajuste.	89

7.5. Ajuste de los coeficientes de fricción característicos para la altura del talud sobre la cimentación relativa de $Ft/h = 1$ y las bandas de confianza del 95 % superior e inferior del ajuste.	90
7.6. Ejemplo de aplicación del diagrama de fricción para el diseño de un dique en talud.	91
A.1. Representación de la aproximación matemática del modelo IH-2VOF	101
B.1. Caso D=26mm y Ft=0m: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	106
B.2. Caso D=26mm y Ft=0m: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	106
B.3. Caso D=26mm y Ft=0m: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	107
B.4. Caso D=26mm y Ft=0.2m: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	108
B.5. Caso D=26mm y Ft=0.2m: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	108
B.6. Caso D=26mm y Ft=0.2m: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	109
B.7. Caso D=26mm y Ft=0.2m: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	110
B.8. Caso D=26mm y Ft=0.2m: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	110
B.9. Caso D=26mm y Ft=0.2m: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	111
B.10. Caso D=40mm y Ft=0m: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	112
B.11. Caso D=40mm y Ft=0m: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	113
B.12. Caso D=40mm y Ft=0m: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	113
B.13. Caso D=40mm y Ft=0.2m: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	114
B.14. Caso D=40mm y Ft=0.2m: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	114
B.15. Caso D=40mm y Ft=0.2m: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	115
B.16. Caso D=40mm y Ft=0.4m: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	116
B.17. Caso D=40mm y Ft=0.4m: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	116
B.18. Caso D=40mm y Ft=0.4m: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	117
B.19. Caso D=52mm y Ft=0m: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	118
B.20. Caso D=52mm y Ft=0m: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos	118

B.21. Caso $D=52\text{mm}$ y $F_t=0\text{m}$: Comparación $K_{T\text{mod}}$ vs $K_{T\text{exp}}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos	119
B.22. Caso $D=52\text{mm}$ y $F_t=0.2\text{m}$: Comparación H_{paredmod} vs H_{paredexp} para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos	119
B.23. Caso $D=52\text{mm}$ y $F_t=0.2\text{m}$: Comparación $K_{T\text{mod}}$ vs $K_{T\text{exp}}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos	120
B.24. Caso $D=52\text{mm}$ y $F_t=0.2\text{m}$: Comparación $K_{T\text{mod}}$ vs $K_{T\text{exp}}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos	120
B.25. Caso $D=52\text{mm}$ y $F_t=0.4\text{m}$: Comparación H_{paredmod} vs H_{paredexp} para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos	121
B.26. Caso $D=52\text{mm}$ y $F_t=0.4\text{m}$: Comparación $K_{T\text{mod}}$ vs $K_{T\text{exp}}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos	121
B.27. Caso $D=52\text{mm}$ y $F_t=0.4\text{m}$: Comparación $K_{T\text{mod}}$ vs $K_{T\text{exp}}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos	122

Índice de cuadros

4.1. Tipología más adecuada en función de la conservación, la reparación y el desmantelamiento del dique, (Cuadro 2.5, ROM1.1 (2003) Recomendaciones de Obras Marítimas)	39
5.1. Características del material granular	53
5.2. Configuraciones ensayadas	53
5.3. Duración de cada ensayo	54

Capítulo 1

Introducción

Un dique de abrigo es una obra marítima que permite crear zonas protegidas del oleaje. Se pueden considerar como las obras marítimas más importantes de los puertos. En España, el proyecto y la construcción de estos diques se realiza según las Recomendaciones de Obras Marítimas (Puertos del Estado, Ministerio de Fomento).

A lo largo de su vida útil se producen cambios tanto en la geometría como en la batimetría sobre la que están construidos los diques, debido a las acciones que sobre ellos ejercen los agentes climáticos, atmosféricos y marinos. Estas transformaciones pueden cambiar tanto los requisitos iniciales del proyecto como la probabilidad de fallo del dique. Por ello, su conservación, inspección y reparación es fundamental, así como intentar prever posibles fallos futuros del mismo.

El diseño de diques que hagan frente a la acción del oleaje se realiza usando formulaciones empíricas y semiempíricas. Algunas de las más empleadas en ingeniería son [Goda \(2000\)](#) y [Takahashi \(1996\)](#) para diques verticales y mixtos o la de [Losada and Gimenez-Curto \(1979\)](#) para diques en talud. Una vez que la sección se ha prediseñado suele ser habitual proceder a su verificación mediante los ensayos en laboratorio a escala reducida. Cabe señalar que para poder reproducir fielmente el prototipo en laboratorio se requiere la existencia de una similaridad geométrica, dinámica y cinemática entre el modelo y el prototipo; además de disponer de materiales equivalentes.

Pese a las bondades de los ensayos, con frecuencia presentan una serie de limitaciones: en los ensayos hidráulicos, las fuerzas que gobiernan el fenómeno son principalmente las de gravedad e inercia. Por lo tanto, el escalado del modelo se lleva a cabo conservando el número de Froude, no siendo posible conservar simultáneamente el número de Reynolds en los ensayos. De esta manera, la porosidad o permeabilidad del modelo no se conserva, aumentando las fuerzas resistivas del flujo en el interior del medio poroso y, consecuentemente, modificando la distribución de energía del oleaje al incidir sobre el dique. Por todo ello, el comportamiento global del dique se verá modificado. Esto último se conoce como “efecto escala”.

Todas estas circunstancias hacen imprescindible disponer de un método unificado de verificación y de comparación funcional, constructiva y económica de diferentes tipologías, que permita conseguir una modelización adecuada, maximizando la seguridad y minimizando los costes.

En concreto, este Proyecto Fin de Carrera se centra en el estudio de la tipología de dique en talud, donde para las alturas del talud sobre la cimentación bajas se tratará de un dique con berma. Es una de las tipologías más construidas en España, que además contiene una mayor proporción de material poroso en su sección, lo que facilitará el estudio del efecto escala entre el modelo y el prototipo.

Las características de este trabajo se encuadran dentro del Proyecto de Investigación: *Método unificado para el diseño y verificación de los diques de abrigo*, que se desarrolla en el Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada. En este marco se están realizando distintos estudios para poder extrapolar los datos correctamente del modelo al prototipo en el diseño de los diques de abrigo. Basados en esta línea de trabajo, destacan las investigaciones previas de [Pérez et al. \(2009\)](#) y [Vílchez \(2014\)](#)

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Se propone como objetivo general implementar un método que permita escalar adecuadamente los modelos de los ensayos para corregir el efecto escala, y con ello poder evitar la diferencia de porosidad entre modelo y prototipo, mejorando así los criterios de diseño actuales y reduciendo los problemas asociados a los modos de fallo más habituales. Con el conocimiento adquirido se obtendrá una herramienta de diseño y verificación de diques unificada, basada en el balance y el reparto de energía.

Los resultados del objetivo planteado tienen una aplicación práctica directa en la ingeniería marítima y costera consiguiendo mejorar los diseños actuales, así como las formulaciones de cálculo a la hora de realizar los modelos para la construcción de nuevos diques de abrigo.

1.1.2. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Estudio de las tipologías de diques de abrigo de interés general de Puertos del Estado.
- Análisis de los principales modos de fallo y las reparaciones realizadas para cada tipología de dique.
- Estudio de uno de los principales modos de fallo relacionado con los problemas de diseño de diques: *El efecto escala*. Análisis de este efecto para la tipología de dique en talud.
- Desarrollo de ensayos experimentales para estudiar la interacción del oleaje con el medio poroso.
- Empleo de un modelo numérico para estudiar el flujo en el interior del medio poroso basado en balance de energía y para obtener una metodología que permita corregir el efecto escala.
- Desarrollo de un diagrama de fricción característico para dique en talud.
- Proposición de futuras líneas de investigación en consonancia con el trabajo desarrollado.

1.2. Organización del trabajo

Este trabajo se estructura en los siguientes capítulos:

En el **Capítulo 2** se exponen los conceptos previos relativos a las diferentes tipologías de los diques de abrigo, tanto en los que se refiere a su morfología (talud, vertical o mixto), como a los procesos de interacción entre los diques y el oleaje. Analizamos la transferencia de energía incidente (reflexión, transmisión y disipación) y las ecuaciones y parámetros que caracterizan cada proceso. Posteriormente, a partir del análisis de las primeras formulaciones que describen la resistencia al flujo en el medio poroso, se presentan los resultados más recientes en este tema (modelos teóricos y experimentales en el canal de oleaje), que constituyen la base conceptual de nuestro trabajo.

Se dedica el **Capítulo 3** a presentar la metodología que se sigue para la consecución de los objetivos propuestos. Se expone el interés en analizar y disponer de un estudio completo del estado de los diques de abrigo de los Puertos del Estado, deteniéndonos en los modos de fallo para justificar la importancia de mejorar los instrumentos de diseño. Para el problema que se aborda del efecto escala, disponemos de los ensayos experimentales realizados y la configuración de un modelo numérico, cuyos resultados comparados permitan elaborar un diagrama de fricción para dique en talud.

En el **Capítulo 4** se revisan los tipos y características principales (vida útil, fallos y reparaciones) de los diques de abrigo de los Puertos del Estado, así como los sistemas de inspección y monitorización existentes. Se presentan varios cuadros y diagramas que sistematizan, por primera vez, un análisis de este tipo. Se presta especial atención a los diques en talud, por ser los que más se construyen y en donde se producen más fallos, debido a los problemas de diseño relacionados con el efecto escala, objeto de nuestro estudio.

En el **Capítulo 5** se describen los ensayos experimentales realizados en el canal de oleaje (CEAMA-UGR). El modelo seguido es un dique en talud irrebasable que para alturas del talud bajas se trata de un dique con berma. Se dan los parámetros utilizados (ancho del dique, diámetro del material granular, profundidad del agua, altura de la cimentación, altura del talud sobre la cimentación y ancho de coronación del talud), y se aportan los datos experimentales, obtenidos en las distintas configuraciones ensayadas y sometidas a un oleaje regular.

En el **Capítulo 6** se presenta el modelo empleado para desarrollar casos numéricos (modelo IH-2VOF). Se describen las características y formulación matemática de cálculo del modelo, así como del módulo CORAL que contiene este modelo para generar la malla computacional. Se señalan y justifican los criterios empleados para definir la malla, las condiciones del oleaje y los parámetros del medio poroso. A continuación, se dan los resultados del modelo numérico, se analizan y comparan con los resultados experimentales.

En el **Capítulo 7** se exponen los resultados obtenidos al analizar los datos experimentales y del modelo numérico, correspondientes al flujo a través del medio poroso, describiéndose las propiedades del coeficiente de fricción característico para dique en talud. Se da un ejemplo para ilustrar la aplicación práctica, en el diseño de un dique en talud, del diagrama de fricción característico obtenido.

En el **Capítulo 8** se presentan las conclusiones finales del proyecto.

Finalmente, se incluyen dos **Apéndices** donde se expone la formulación matemática empleada en el modelo numérico y todos los gráficos de la comparación de los resultados numéricos y experimentales para cada uno de los casos ensayados.

Agradecimientos:

Quiero expresar mi agradecimiento al Grupo de Dinámica Ambiental y en especial a mis directores del proyecto, Miguel Ortega y Montserrat Vilchez, por su gran ayuda y la oportunidad que me han dado de aprender y trabajar con ellos.

Capítulo 2

Conceptos previos y tipologías de diques

Se inicia el desarrollo de este trabajo resumiendo los conceptos previos en relación a los diferentes tipos de diques de abrigo, en base a su morfología y a la transferencia de energía que se produce ante las oscilaciones del mar. Se orienta esta presentación a establecer los avances teóricos y experimentales que se conocen sobre el problema del balance de energía y la cuantificación de los términos que intervienen en su disipación.

Se dedica especial atención a los resultados de investigación más recientes sobre la resistencia del flujo en el interior del medio poroso, que sirven de base para aplicar la metodología aquí propuesta y para la obtención de nuestros resultados.

2.1. Tipologías de diques de abrigo

Un dique es una obra exterior cuya función básica es proporcionar a las instalaciones portuarias el abrigo necesario frente al oleaje exterior, de manera que se pueda asegurar la operatividad de las mismas. Existen tres grupos principales de diques de abrigo, según sean los métodos de construcción y el modo de funcionamiento; lo que conlleva diferentes formas de controlar los agentes climáticos (fundamentalmente el oleaje) y de transmitir los esfuerzos al terreno. Describimos brevemente sus características:

Dique en talud

Los diques de abrigo en talud tradicionalmente se han construido mediante un núcleo de todo uno, encima del cual se superponen capas de elementos de tamaño creciente que cumplen la función de filtro. Habitualmente, los elementos mayores (que conforman los mantos exteriores o principales) son piezas de hormigón en masa de diferentes formas (cubos, dolos, tetrápodos, etc.) o de escollera. Este tipo de estructura resiste la acción del oleaje provocando la rotura y disipación de las olas sobre el talud. Por tanto, tales diques funcionan básicamente por disipación de energía.

En la Figura 2.1 se puede observar la sección de un dique en talud.

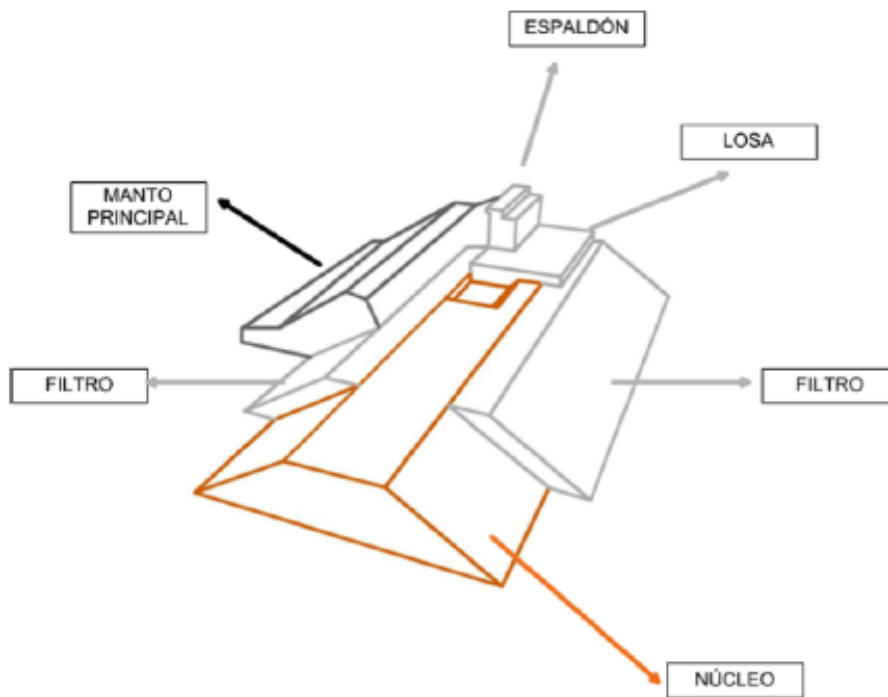


Figura 2.1: Dique en talud (Guías de buenas prácticas, Año 2008)

Dique vertical

Los diques verticales están formados por una banqueta de escollera sobre la que se apoya una estructura de paramentos verticales, generalmente monolítica y realizada con cajones de hormigón armado. Este tipo de diques requiere menos cantidad de material y su proceso constructivo es más rápido que los diques en talud; sin embargo, precisan de unas condiciones de oleaje más favorables. En ellos, la energía no se disipa sino que es devuelta al mar, siendo, por tanto, su modo de funcionamiento por reflexión el mayor porcentaje de la energía del oleaje.

En la Figura 2.2 se muestra la sección de un dique vertical.

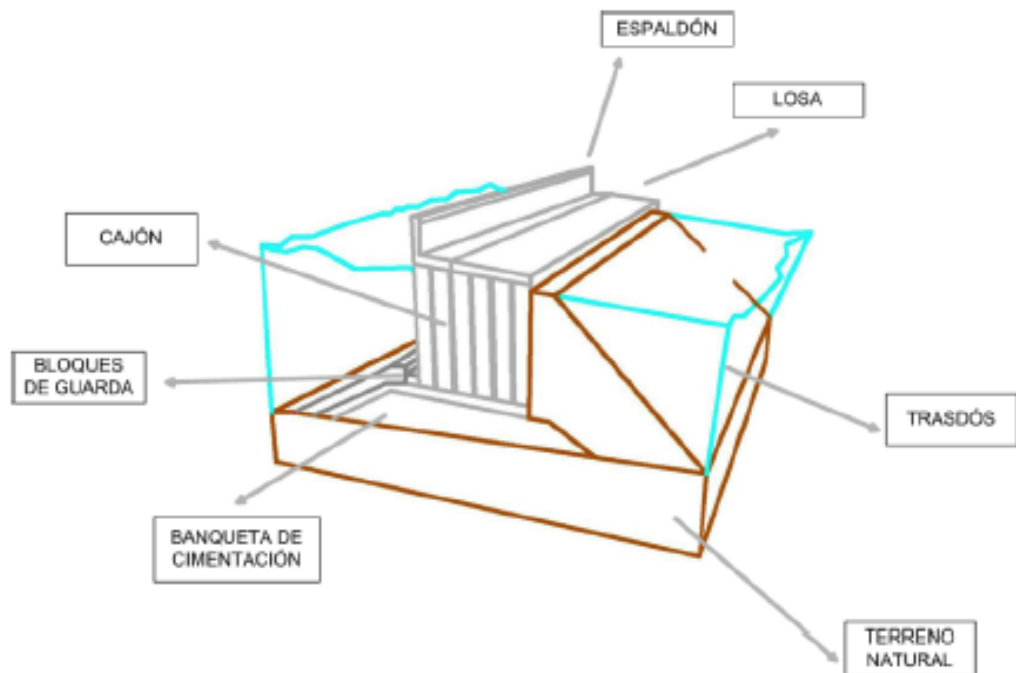


Figura 2.2: Dique vertical (Guías de buenas prácticas, Año 2008)

De la combinación de estos dos grupos resulta otro tipo:

Dique mixto

Los diques mixtos pueden dividirse a su vez en diques mixtos compuestos verticalmente y en diques mixtos compuestos horizontalmente.

- Los primeros son obras de abrigo vertical con una banqueta de cimentación que tiene una altura suficiente, tal que su presencia modifica significativamente la cinemática y dinámica de las oscilaciones del mar. La sección típica de este tipo de dique es similar a la de dique vertical.

- Los segundos son obras de abrigo verticales delante de las cuales se dispone un manto de piezas de hormigón para disipar las acciones del oleaje. El objetivo que persigue este manto es reducir las presiones del oleaje contra los paramentos de la obra vertical, y reducir las reflexiones del oleaje como consecuencia de la disipación de parte de la energía del oleaje incidente.

En la Figura 2.3 se puede observar la sección de un dique mixto compuesto horizontalmente.

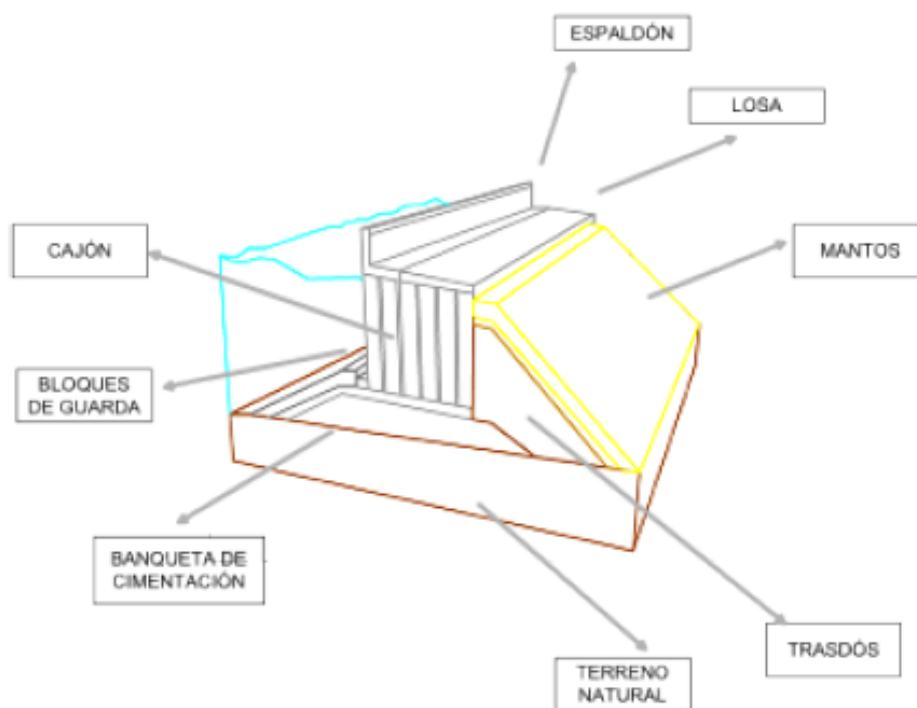


Figura 2.3: Dique mixto compuesto horizontalmente (Guías de buenas prácticas, Año 2008)

Cabe señalar que por las características de su morfología (aunque actúan como diques verticales o en talud) se consideran otros tipos de diques especiales (flotantes, puente, pantallas, berma, etc.)

2.2. Balance de energía

La presencia de los diques de abrigo transforman la energía incidente de las oscilaciones del mar al interactuar con los mismos. Éstos reflejan, disipan e irradian la energía incidente en proporciones que depende de la tipología del dique, de su disposición en planta y de las características de la oscilación.

Como ya hemos mencionado en parte, la energía incidente se distribuye, con más detalle, en:

- Energía reflejada y devuelta hacia al mar debido a un cambio brusco de las propiedades geométricas del medio en el que se propaga el tren de ondas. En general, en los diques de abrigo existen contribuciones de energía reflejada que se dan simultáneamente durante el proceso de la propagación.

- Energía transmitida a través del terreno y la cimentación, cuando estos son permeables; o por encima de la sección, propagándose a sotamar del dique.

2. Conceptos previos y tipologías de diques

- Energía disipada debido a la rotura y a la fricción de las ondas que se propagan por la superficie, el fondo y el interior del dique.
- Energía transferida a otros modos oscilatorios, o bien, generada por otros movimientos circulatorios.

Para completar mejor estos procesos de transformación de la energía se describe, en la Figura 2.4, un volumen de control con anchura transversal la unidad. En dicho volumen se evalúan los flujos de energía de entrada y salida, y los flujos que se producen en su interior; entendiéndose por flujo de energía la cantidad de energía que pasa por una superficie del volumen de control en la unidad de tiempo.

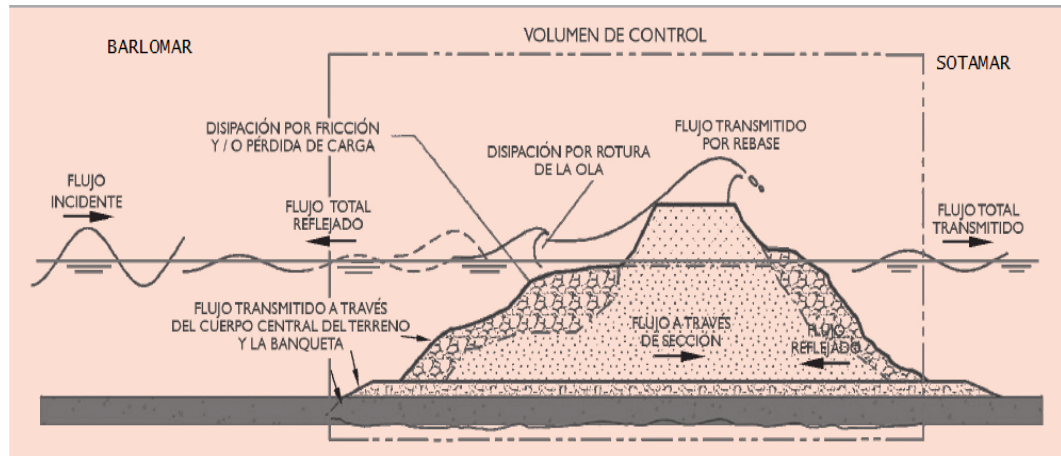


Figura 2.4: Flujo de energía en presencia de la obra, (ROM1.0 (2009) Recomendaciones para Obras Marítimas)

La ecuación de conservación de la energía del movimiento oscilatorio en el volumen de control, se puede escribir de la forma:

$$F_I - F_R - F_T - D'_* = 0 \quad (2.1)$$

Donde F_I , F_R y F_T representan los flujos medios de energía incidente, reflejada y transmitida respectivamente por las secciones a barlomar y sotamar, y D'_* evalúa la disipación por unidad de tiempo en el interior del volumen de control. El signo negativo del término representa extracción o salida de energía del volumen de control y el signo positivo la aportación o entrada de energía al volumen de control.

A continuación, se describe otra forma de expresar la ecuación de conservación de la energía, con el objetivo de evaluar la eficiencia del dique para controlar la energía incidente del tren de ondas.

En concreto, aplicando teoría lineal de ondas y considerando un tren incidente de altura de ola H_I y periodo T_I , el flujo medio de energía incidente con velocidad $C_{g,I}$ es:

$$F_I = E_I C_{g,I} = \frac{1}{8} \rho_w g H_I^2 C_{g,I} \quad (2.2)$$

2. Conceptos previos y tipologías de diques

Donde E_I es la energía media total, cinética y potencial por unidad de superficie horizontal del tren de ondas incidente, dada por la siguiente función cuadrática de la altura de ola:

$$E_I = \frac{1}{8} \rho_w g H_I^2 \quad (2.3)$$

Las velocidades de fase (o celeridad de fase) C , de propagación de la energía C_g del movimiento oscilatorio y el número de onda k , para la onda incidente, se relacionan de la siguiente forma,

$$C_{g,I} = \frac{1}{2} C_I \left(1 + \frac{2k_I h}{\sinh(2k_I h)} \right) \quad (2.4)$$

$$k_I = \frac{2\Pi}{L_I}, \quad C_I = \frac{L_I}{T_I} = \frac{\sigma_I}{k_I} \quad (2.5)$$

Siendo h la profundidad de agua en el volumen de control y σ_I la frecuencia angular que, a su vez, se relaciona con la profundidad h , y el número de onda k , mediante la ecuación de la dispersión:

$$\sigma_I^2 = g k_I \tanh(k_I h) \quad (2.6)$$

La combinación de las anteriores ecuaciones permite concluir que, conocidas la profundidad h y el periodo de la onda T_z , se puede determinar el número de onda k mediante la ecuación (2.6), y conocido éste, se obtiene de forma inmediata la velocidad de propagación de la energía. Además, si se conoce la altura h , se obtiene la energía incidente E_I y el flujo de energía a través de la sección F_I .

De forma análoga se definen los flujos de energía saliente (reflejada y transmitida) del volumen de control (que se indican con los subíndices R y T, respectivamente):

$$F_R = \frac{1}{8} \rho_w g H_R^2 C_{g,R} \quad (2.7)$$

$$F_T = \frac{1}{8} \rho_w g H_T^2 C_{g,T} \quad (2.8)$$

Donde H_R y H_T son las alturas de ola de los trenes reflejado y transmitido respectivamente, y $C_{g,R}$, $C_{g,T}$ son las velocidades de propagación de la energía o celeridades de grupo.

Al describir los procesos de transformación del movimiento oscilatorio, por teoría lineal y en ausencia de corriente, no hay cambio de periodo o de frecuencia angular, y si además la profundidad es constante a ambos lados del dique, la celeridad del tren incidente (C_g) no cambia al reflejarse o transmitirse, por tanto, se puede escribir $k_I = k_R = k_T = k$ y de forma análoga las tres celeridades de fase y las tres de grupo.

2. Conceptos previos y tipologías de diques

Por tanto, si se definen los siguientes coeficientes de transformación del tren de ondas, que relacionan la altura de ola incidente con la reflejada y la transmitida, y la disipación de energía:

- Coeficiente de reflexión, $K_R = \frac{H_R}{H_I}$
- Coeficiente de transmisión, $K_T = \frac{H_T}{H_I}$
- Coeficiente de disipación, $D_* = \frac{D'_*}{\frac{1}{8}\rho_w g H_I^2 C_I}$ (por unidad de energía incidente)

Y si se sustituyen estos coeficientes en la ecuación (2.1), se puede escribir la ecuación de conservación de la energía en el volumen de control como:

$$K_R^2 + K_T^2 + D_* = 1 \quad (2.9)$$

Obsérvese que los coeficientes de reflexión y transmisión influyen directamente en el balance de energía descrito. Por lo tanto, su estudio es fundamental a la hora de cuantificar la disipación de energía que se produce al incidir el oleaje en el dique.

A continuación se analiza cómo se produce esta disipación de energía y qué parte de esta disipación es de interés para el trabajo que se desarrolla en este proyecto, en concreto, la energía por fricción a través del medio poroso.

Disipación de energía por rotura y por fricción

Como se refleja en la Figura 2.4, al incidir el oleaje sobre la estructura, una parte de la energía incidente se disipa por rotura de la ola, debido al incremento del peralte y al propagarse esta por la obra marítima. Según el tipo de mecanismos de rotura que tenga lugar, se producirá una mayor o menor disipación de energía.

Por otro lado, parte de la energía incidente se disipa por fricción en el medio, que depende del régimen hidráulico, de la porosidad del medio y del tamaño de los elementos que lo forman.

En este proyecto nos ocuparemos de analizar la disipación de energía por fricción a través del medio poroso. Su estudio permitirá evitar el efecto escala de los ensayos de laboratorio a escala reducida.

Previamente, para entender mejor este proceso de transformación de la energía, es conveniente resumir brevemente el comportamiento del flujo en el medio poroso.

2.3. Flujo en el medio poroso

2.3.1. Introducción

En efecto, la necesidad de estudiar el flujo del movimiento ondulatorio en el medio poroso y su interacción con las obras marítimas, ha llevado a numerosos autores a desarrollar diversas formulaciones para conocer su comportamiento y poder describirlo.

Describamos brevemente las ecuación inicial de [Forchheimer \(1901\)](#) y sus extensiones posteriores, que describen la resistencia al flujo en el interior del medio poroso. Todas estas formulaciones contienen varios términos que miden diferentes tipos de resistencias, cuya importancia relativa puede ser estimada. Sobre esta base, otros autores como [Sollit and Cross \(1976\)](#), han estudiado otras ecuaciones que aportan una nueva visión del problema de la resistencia y que han servido, a su vez, de base para las investigaciones más recientes sobre el tema.

2.3.2. Ecuaciones del flujo en el medio poroso

La formulación más aceptada y utilizada para describir la resistencia al flujo en el interior del medio poroso viene dada por la ecuación de [Forchheimer \(1901\)](#):

$$I = a u + b u |u| \quad (2.10)$$

Donde I es el gradiente hidráulico y u la velocidad de descarga del fluido, que se define como la velocidad necesaria para que, distribuida en todo el volumen del medio poroso, produzca la misma descarga o caudal que la velocidad de filtración a través de los huecos. Los parámetros a y b son coeficientes dimensionales que dependen de las propiedades del flujo y de la geometría del medio.

Nótese que la ecuación de Forchheimer 2.10 se expresa por un término lineal con la velocidad de flujo ($a \cdot u$) y un término cuadrático con la velocidad del flujo ($b \cdot u |u|$). El primer término representa la contribución laminar y el segundo la contribución de la turbulencia. Para flujos turbulentos en el medio poroso, y en la transición entre el flujo laminar y turbulento, esta ecuación puede ser usada.

Por otro lado, la ecuación de Forchheimer es también válida para flujos estacionarios, esto es, que no dependen del tiempo. No obstante, es importante conocer el flujo en el interior del medio poroso a lo largo del tiempo. Por ello, [Polubarinova \(1952\)](#), desarrolló una extensión de la ecuación de Forchheimer, añadiendo un término dependiente del tiempo:

$$I = a u + b u |u| + c \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.11)$$

Donde c es un coeficiente dimensional que representa la componente inercial dada por el término de masa añadida. Este último término de la ecuación, se puede interpretar como la

2. Conceptos previos y tipologías de diques

cantidad de movimiento adicional que requiere el flujo para vencer el obstáculo presentado por el medio poroso.

La ecuación 2.11 depende de los coeficientes dimensionales a (s/m), b (s²/m²) y c (s²/m). Muchos autores como [Van Gent \(1995\)](#), [Burchath and Andersen \(1995\)](#), entre otros, han planteado las siguientes formulaciones empíricas o semiempíricas para determinar los valores de los coeficientes a , b y c :

$$a = \alpha \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{\nu}{g D^2} \quad (2.12)$$

$$b = \beta \frac{(1-n)}{n^3} \frac{1}{g D} \quad (2.13)$$

$$c = \frac{1 + \gamma \frac{1-n}{n}}{n g} \quad (2.14)$$

Donde n es la porosidad del medio, g es la gravedad, ν la viscosidad cinemática y D la longitud de escala representativa, siendo éste el diámetro característico del material granular. Los parámetros α , β y γ son coeficientes adimensionales que deben ser determinados empíricamente, debido a la falta de conocimiento sobre los materiales y las características del flujo.

En resumen, Forchheimer y otros autores posteriormente, han establecido que la resistencia al flujo en el interior del medio poroso depende de tres términos: dos de ellos miden la resistencia debida al flujo laminar o al flujo turbulento y otro término mide la resistencia inercial; cuyas importancias relativas dependen de las propiedades del flujo y de las características del medio poroso.

Describimos a continuación los resultados de interés sobre el problema de evaluar la importancia relativa de dichos términos, con el objetivo de asentar las bases de parte del trabajo desarrollado en el presente proyecto.

2.3.3. Importancia de las fuerzas resistivas

Distintos autores establecen que la importancia relativa de las fuerzas resistivas puede ser estimada utilizando dos parámetros adimensionales:

– El número de Reynolds, $Re = \frac{uD}{\nu}$, que relaciona la resistencia debida a la turbulencia f_T , con la resistencia laminar f_L :

$$\left| \frac{f_T}{f_L} \right| = 10^{-2} Re \quad (2.15)$$

– El número de Keulegan–Carpenter, $KC = \frac{UT}{D}$, siendo T el periodo de la ola. Este número relaciona la resistencia debida a la turbulencia f_T , con la resistencia inercial f_I :

$$\left| \frac{f_T}{f_I} \right| = KC \quad (2.16)$$

Por último, se puede establecer una correlación entre ambos números adimensionales, relacionando la resistencia inercial con la resistencia debida al flujo laminar:

$$\left| \frac{f_I}{f_L} \right| = 10^{-2} \frac{Re}{KC} \quad (2.17)$$

Mediante el gráfico que se presenta en la Figura 2.5, los autores proponen el dominio de las distintas componentes de la resistencia para un material granular sometido a la acción del oleaje, en función de los números adimensionales KC y Re .

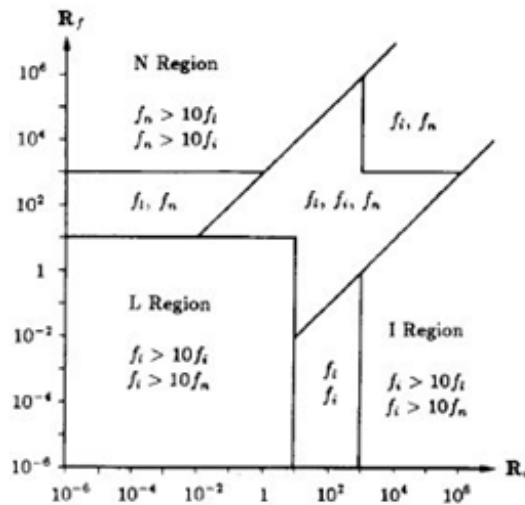


Figura 2.5: Importancia de las fuerzas resistivas (Gu and Wang, 1991)

Se puede observar que para flujos en medios porosos con material granular como la arena, domina la resistencia laminar f_I , siendo la influencia de las otras fuerzas despreciable. Sin embargo, para estructuras de mayor importancia, como son los diques, la resistencia inercial y la resistencia debida a la turbulencia tienen mayor influencia y no se pueden considerar despreciables.

En modelos de pequeña escala, como es el caso de los ensayos en laboratorio, se debe tener en cuenta el efecto de estas tres componentes.

2.3.4. Nuevo planteamiento del flujo en el medio poroso

La formulación del flujo en el interior del medio poroso desarrollada por Forchheimer, ha servido de base para otros autores que han seguido investigando en esta línea de trabajo. Tal es el caso de Sollit y Cross, que proponen una nueva visión del problema de la resistencia al flujo en el interior del medio poroso.

2. Conceptos previos y tipologías de diques

Sollit and Cross (1976) analizaron la incidencia de un tren de ondas monocromático (con una única longitud de onda), actuando sobre una estructura vertical porosa de sección transversal rectangular. La teoría describe que la resistencia al flujo en el interior del medio poroso se puede representar a través de un sólo coeficiente de fricción.

$$I = f \cdot \sigma \cdot u \quad (2.18)$$

Siendo σ la frecuencia angular, u la velocidad de descarga del fluido y f el coeficiente de fricción, que es evaluado utilizando el trabajo equivalente de Lorentz.

$$f = \frac{1}{\sigma} \frac{\int_V dV \int_t^{t+T} \left(\frac{n^2 \nu}{K_p} |u|^2 + \frac{n^3 C_f}{\sqrt{K_p}} |u|^3 \right) dt}{\int_V dV \int_t^{t+T} n u^2 dt} \quad (2.19)$$

Donde K_p es la permeabilidad intrínseca del material, C_f el coeficiente de fricción turbulenta, u es la parte real de la velocidad de descarga, n es la porosidad del medio poroso, ρ la densidad del agua y ν la viscosidad cinemática.

Indiquemos que, el coeficiente de fricción de arriba, se obtiene igualando la ecuación de Forchheimer, ecuación 2.11, con la obtenida por Sollit y Cross ecuación 2.18, integrando en el volumen de control y utilizando la condición de trabajo equivalente de Lorentz.

Por tanto, siguiendo el desarrollo planteado por Sollit y Cross, la energía disipada en el interior del medio poroso, en un periodo de onda T , queda expresada como:

$$D_* = \int_V n dV \int_t^{t+T} f \sigma u \cdot \rho u dt \quad (2.20)$$

Esta teoría ha permitido el desarrollo de otros modelos que extienden el resultado obtenido por Sollit y Cross y que constituyen la base teórica que soporta directamente nuestro estudio.

En el siguiente apartado describimos los principales resultados en esta línea de trabajo más reciente.

2.4. Antecedentes

Siguiendo la nueva visión del problema, propuesto por Sollit and Cross (1976), para describir la resistencia al flujo en el interior del medio poroso, el Grupo de Dinámica Ambiental de la Universidad de Granada ha trabajado, tanto en el desarrollo de modelos teóricos que describen la interacción del oleaje con la estructura, como en su posterior verificación en el canal de oleaje.

Los principales estudios desarrollados, en el marco de esta línea de investigación, son los realizados por Pérez et al. (2009) para un dique poroso, y Vilchez (2014) para un dique mixto, y que resumimos a continuación.

2.4.1. Diagrama de fricción dique poroso

Pérez et al. (2009) obtuvieron un diagrama de fricción característico considerando el balance de energía, a partir del modelo potencial desarrollado por Dalrymple et al. (1991).

Dalrymple et al. (1991) extendieron el resultado obtenido por Sollit y Cross al caso de oleaje regular con incidencia oblicua y obtuvieron resultados experimentales. Utilizando teoría lineal y el desarrollo en serie de auto funciones analizaron también los coeficientes de reflexión y transmisión en una estructura vertical porosa.

El coeficiente de fricción, estacionario en el ciclo de la ola y uniforme dentro del medio poroso, se determina minimizando el error entre el coeficiente de transmisión teórico y experimental, mediante la expresión.

$$\epsilon_{K_T}^2 = \frac{(K_{Texp} - K_{Tteo})^2}{K_{Texp}^2} \quad (2.21)$$

Así, analizando los ensayos experimentales, según las condiciones del oleaje y las características del dique, y comparando los datos teóricos con los experimentales, demostraron que el coeficiente de fricción f depende de:

$$f = \Psi\left(\frac{B}{L}, Dk, \frac{D}{H}\right) \quad (2.22)$$

Donde B es el ancho del medio, L la longitud de onda, D el diámetro del material granular, k el número de onda y H la altura de ola.

Con ello, obtuvieron el siguiente diagrama de fricción característico para dique poroso:

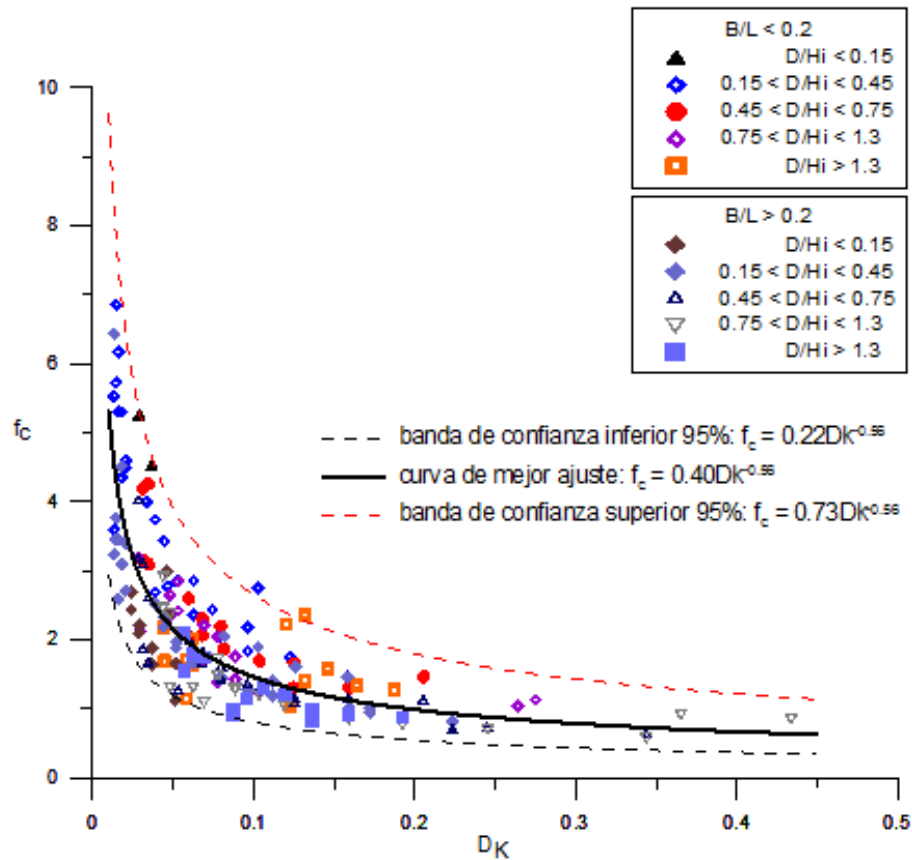


Figura 2.6: Diagrama del coeficiente de fricción característico para dique poroso, (Pérez et al., 2009)

El diagrama de fricción característico para dique poroso permite obtener el valor del coeficiente de fricción, que es constante para unas características de oleaje y dique dadas. Con este coeficiente de fricción, y aplicando la teoría de Sollit y Cross, se puede conocer la energía total disipada en el interior del medio poroso, (ecuación 2.20).

2.4.2. Diagrama de fricción dique mixto

Los resultados obtenidos para un dique poroso pusieron de manifiesto la importancia del tamaño del material (porosidad y permeabilidad) en el proceso de distribución de energía del oleaje al incidir en el dique. Para seguir con este estudio, Vílchez (2014) analizó la disipación de energía en el medio poroso, obteniendo el diagrama de fricción característico para dique mixto.

2. Conceptos previos y tipologías de diques

La metodología seguida por Vilchez para obtener el coeficiente de fricción para un dique mixto, consiste en minimizar el error conjunto en los coeficientes de reflexión, transmisión y la energía disipada experimentales y teóricos.

$$\epsilon^2 = \epsilon_{K_T}^2 + \epsilon_{K_R}^2 + \epsilon_{D_*}^2 \quad (2.23)$$

Siendo los valores del

– Error del coeficiente de transmisión:

$$\epsilon_{K_T}^2 = \frac{(K_{Texp} - K_{Tteo})^2}{K_{Texp}^2} \quad (2.24)$$

– Error del coeficiente de reflexión:

$$\epsilon_{K_R}^2 = \frac{(K_{Rexp} - K_{Rteo})^2}{K_{Rexp}^2} \quad (2.25)$$

– Error de la disipación total:

$$\epsilon_{D_*}^2 = \frac{(D_* - D_{*teo})^2}{D_*^2} \quad (2.26)$$

Los datos teóricos se determinaron a partir del modelo potencial desarrollado por [Losada et al. \(1993\)](#). El modelo proporciona los coeficientes de reflexión y transmisión, mientras que la energía disipada viene dada por la expresión debida a Sollit y Cross:

$$D_* = \int_V \epsilon dV \int_t^{t+T} f \sigma u \cdot \rho u dt \quad (2.27)$$

De nuevo, comparando los resultados experimentales y teóricos, para unas condiciones de oleaje y características del dique dadas, se determinó que el coeficiente de fricción f depende de:

$$f = \Psi\left(\frac{B}{L}, Dk, \frac{D}{H}, \frac{hb}{h}\right) \quad (2.28)$$

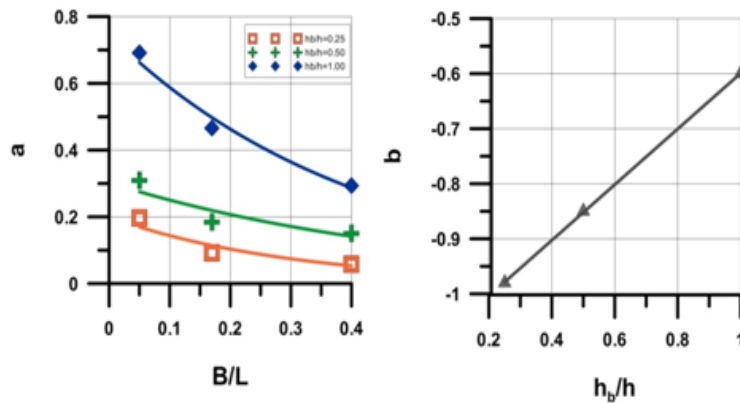
Siendo hb la altura de la cimentación del dique y h la profundidad del agua.

2. Conceptos previos y tipologías de diques

Se estableció también la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de fricción f :

$$f = a(Dk)^b \quad (2.29)$$

Siendo a y b los valores que se muestran en la Figura 2.7 siguiente.



<u>Coeficientes</u>	a	b
$\frac{h_b}{h}=0.25$	$\ln(a) = -3.30 \frac{B}{L} - 1.61$	$b = 0.51 \frac{h_b}{h} - 1.11$
$\frac{h_b}{h}=0.50$	$\ln(a) = -1.90 \frac{B}{L} - 1.20$	
$\frac{h_b}{h}=1.00$	$\ln(a) = -2.39 \frac{B}{L} - 0.29$	

Figura 2.7: Valores de los coeficientes a y b para el cálculo del coeficiente de fricción

Con esta ecuación se obtuvieron los diagramas de fricción característicos separados en función de la sumergencia relativa h_b/h ensayadas. La siguiente Figura 2.8 muestra los diagramas característicos para dique mixto.

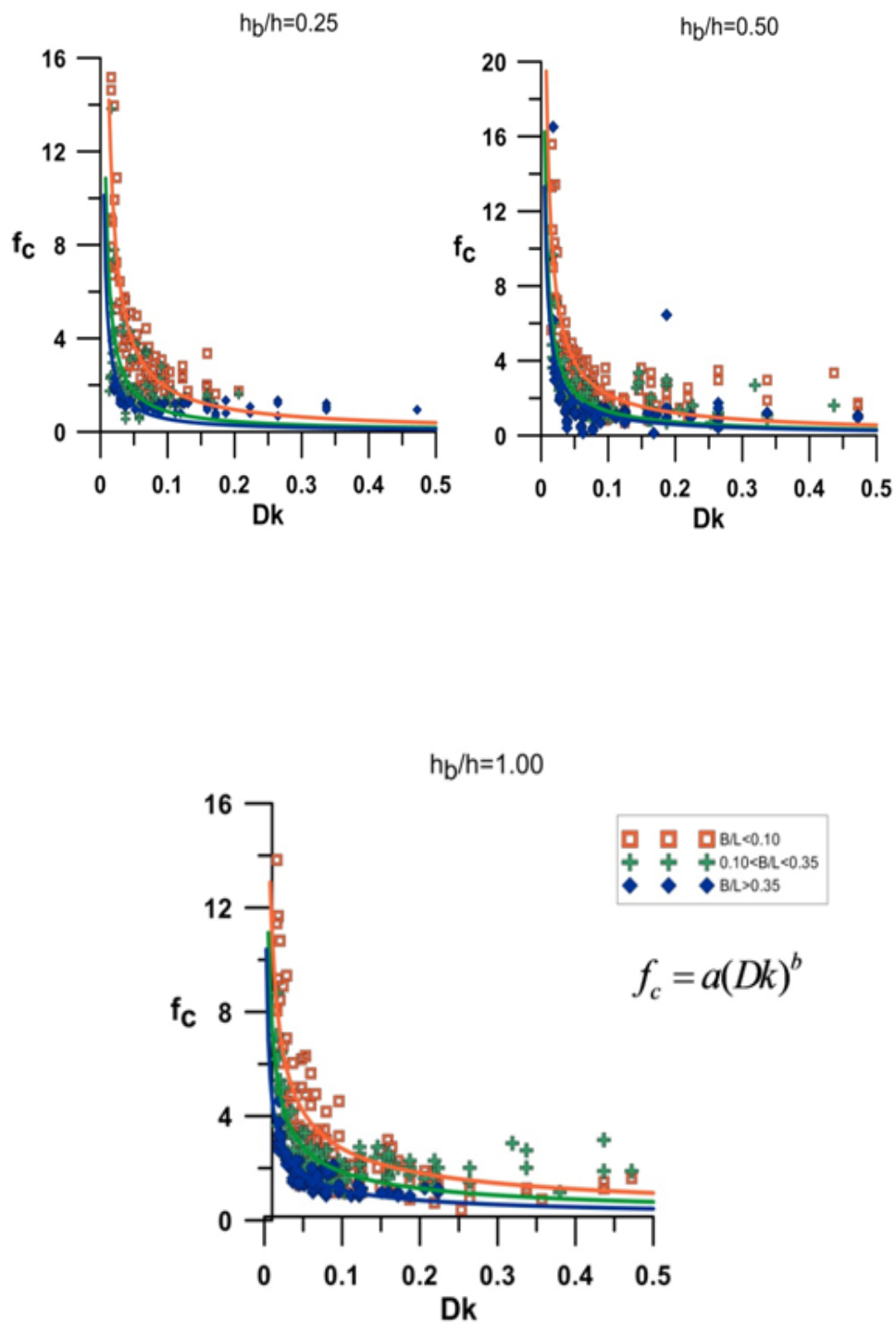


Figura 2.8: Coeficiente de fricción característico para dique mixto en función de las sumergencias relativas

2. Conceptos previos y tipologías de diques

De todo ello, se puede concluir que los resultados obtenidos por [Pérez et al. \(2009\)](#) y [Vílchez \(2014\)](#), han demostrado que el coeficiente de fricción depende principalmente del monomio adimensional Dk . Estos resultados constituyen el punto de partida conceptual para la realización de nuestro trabajo.

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se expone la metodología seguida en el presente proyecto para la discusión y consecución de los objetivos definidos anteriormente.

3.1. Análisis de los diques de abrigo de Puertos del Estado

3.1.1. Estudio de las tipologías de diques

Puertos del Estado cuenta con un registro de todos los diques de abrigo existentes en los puertos españoles. Sin embargo, no existe una información resumida que permita, de manera rápida y concisa, conocer qué tipologías de diques existen en España.

Por ello, se ha realizado un estudio exhaustivo de las distintas tipologías de diques de abrigo de interés general para Puertos del Estado, agrupando los datos en diferentes elementos significativos.

Las fuentes utilizadas para este estudio han sido:

- Diques de Abrigo en los Puertos de Interés General del Estado, [del Estado \(2011\)](#).
- Diques de Abrigo. Tres tomos, [de Puertos y Costas \(1988\)](#).

Con toda la información recopilada se ha elaborado una tabla donde se recogen, por fachadas marítimas y para cada una de las tipologías de diques, los datos de su vida útil, años de inicio y fin de la construcción, así como las reparaciones y/o ampliaciones realizadas en los mismos.

Este estudio es de gran interés para Puertos del Estado y otros organismos ya que permite conocer, de forma rápida y visual, las características básicas de las tipologías de diques más frecuentes. Además, esta recopilación y síntesis de datos no se ha elaborado en otro lugar.

Adicionalmente, a raíz de este estudio, se ha realizado un análisis de la vida útil de estas obras marítimas, comprobando si se ha cumplido con dicha vida útil y, por consiguiente, si precisan de inspecciones y reparaciones periódicas.

Por otro lado, con la información aquí aportada, entendemos que se justifica claramente la necesidad de avanzar en el conocimiento de técnicas que prevean y eviten los modos de fallo.

3.1.2. Fallos y reparaciones de diques

Se describen los distintos modos de fallo y las reparaciones más frecuentes según la tipología de dique, vertical o en talud. Para ello, se revisan todos los diques de abrigo que han perdido su funcionalidad a causa de una avería o por colapso de la estructura. Se recoge en una tabla algunas de las averías más notables en los diques de los puertos de España.

Las principales fuentes utilizadas han sido:

- Diseño de Diques Rompeolas, [Negro and Valera \(2008\)](#).
- Diseño de Diques Verticales, [Negro et al. \(2006\)](#).

Por último, se extraen una serie de conclusiones en cuanto a las principales causas de fallo, realizando una clasificación por tipologías y por fachadas marítimas.

3.1.3. Sistemas de monitorización existentes

Una vez conocidas las diferentes tipologías de diques, sus principales causas de fallo y las reparaciones realizadas en ellos, se ha analizado los sistemas de monitorización, inspección y mantenimiento existentes para la revisión y reparación de los diques.

Las fuentes consultadas para obtener esta información provienen de los siguientes artículos:

- Tools for the Diagnosis and Automated Inspection of Semi-Submerged Structures, [Silva et al. \(2003\)](#).
- Optimization of Inspection and Maintenance Decisions for Infrastructure Facilities under Performance Model Uncertainty: A Quasi-Bayes Approach, [Pablo et al. \(2006\)](#).
- Monitoring and maintenance of breakwaters which protect port entrances, [Tulsi and Phelp \(2009\)](#).

Aquí, se recogen algunos de estos sistemas más significativos, pretendiendo captar la filosofía o funcionalidad de los mismos y su importancia para garantizar un buen mantenimiento de las estructuras.

3.2. Ensayos experimentales

Para poder estudiar el flujo en el interior del medio poroso y, con ello, corregir el efecto escala que se produce en los ensayos de laboratorio a escala reducida, es necesario disponer de ensayos experimentales para poder compararlos con los resultados del modelo numérico.

En este sentido, se ha llevado a cabo una serie de ensayos experimentales para simular la interacción entre oleaje-estructura en el canal de oleaje de corriente del Centro Andaluz de Medio Ambiente, Universidad de Granada (CEAMA-UGR).

Las Figuras 3.1 y 3.2 muestran el canal de oleaje instalado en el CEAMA-UGR. En ellas se puede apreciar las dimensiones del canal y sus características.

3. Metodología



Figura 3.1: Foto 1: Canal de oleaje de corriente, CEAMA-UGR



Figura 3.2: Foto 2: Canal de oleaje de corriente, CEAMA-UGR

En el canal de oleaje, de dimensiones $20\text{m} \times 0.65\text{m} \times 0.90\text{m}$, se han simulado tres geometrías de dique con un talud de distintas dimensiones y material granular; esta estructura será específicamente el objeto de estudio en el presente trabajo.

Para generar las condiciones de oleaje, el canal consta de una pala estática que genera el oleaje que se establece. Los instrumentos de medida que hemos utilizado son ocho sensores de nivel que miden la superficie libre del oleaje. La ubicación de los instrumentos y de la estructura se pueden ver en la Figura 3.3.

Posteriormente, las variaciones de la superficie libre a lo largo del canal que registran los sensores, se analizan para obtener los coeficientes de reflexión K_R y de transmisión K_T . Los coeficientes experimentales se comparan con los del modelo numérico.

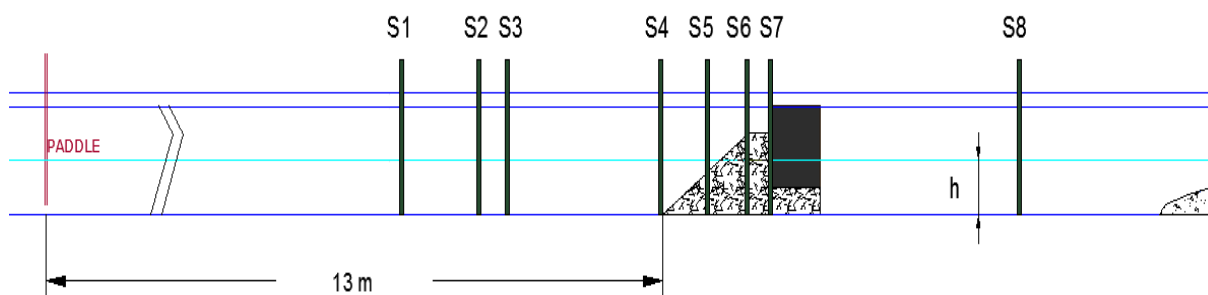


Figura 3.3: Esquema del dispositivo experimental con los sensores de nivel

3.3. Modelo numérico

El modelo numérico empleado para comparar con los ensayos experimentales ha sido el IH-2VOF.

Se ha utilizado este modelo ya que permite simular las condiciones ensayadas en el canal de oleaje con las mismas dimensiones y características geométricas. El modelo posibilita estudiar la propagación del oleaje a lo largo del dominio definido y su interacción con la estructura y el medio poroso.

Cabe señalar que, el modelo IH-2VOF ha sido desarrollado por la Universidad de Cantabria para investigar la interacción entre la propagación del oleaje y el medio poroso de obras marítimas, el run-up y run-down de una playa, así como otras estructuras de interés para conocer su comportamiento debido a las condiciones de oleaje.

Dicho modelo engloba un módulo llamado CORAL, que genera el dominio de estudio y las distintas geometrías con las características del medio poroso.

La formulación matemática de cálculo del modelo se basa en las ecuaciones de Navier - Stokes integradas en un volumen de control y las ecuaciones descriptoras del medio poroso desarrolladas por Forchheimer. Esta formulación se detalla en el **Apéndice A: Formulación matemática del IH-2VOF**.

Brevemente, el trabajo a realizar con el modelo descrito consiste en:

- La configuración del modelo: Generación de casos numéricos.
- La obtención de resultados del modelo.

Y posteriormente, se procede a:

- El análisis de los resultados: Comparación entre datos experimentales y teóricos.

En lo que sigue se describe con detalle estas etapas del trabajo.

3. Metodología

3.3.1. Configuración del modelo

Los casos numéricos generados en el IH-2VOF tienen las mismas características y condiciones de trabajo que los ensayos experimentales llevados a cabo en el canal de oleaje. Para ello, se define:

- La geometría y características del dique en talud.
- El dominio de estudio donde se propaga el oleaje.
- Las condiciones de oleaje.
- Las características del material poroso que conforma el dique en talud.
- La configuración de los instrumentos de medida.

Geometría del dique en talud

Como se ha mencionado anteriormente, los resultados del modelo numérico se comparan con los obtenidos por los ensayos experimentales. Por ello, se generan las mismas geometrías de dique en talud ensayadas en el canal de oleaje, así como las mismas características del material granular que forman el medio poroso del dique.

Se establecen tres geometrías de dique en talud, en función de la altura del talud sobre la cimentación Ft : $Ft_1 < Ft_2 < Ft_3$. Además, se definen cuatro tipos de diámetros D para el material granular que conforman el talud y la cimentación del dique.

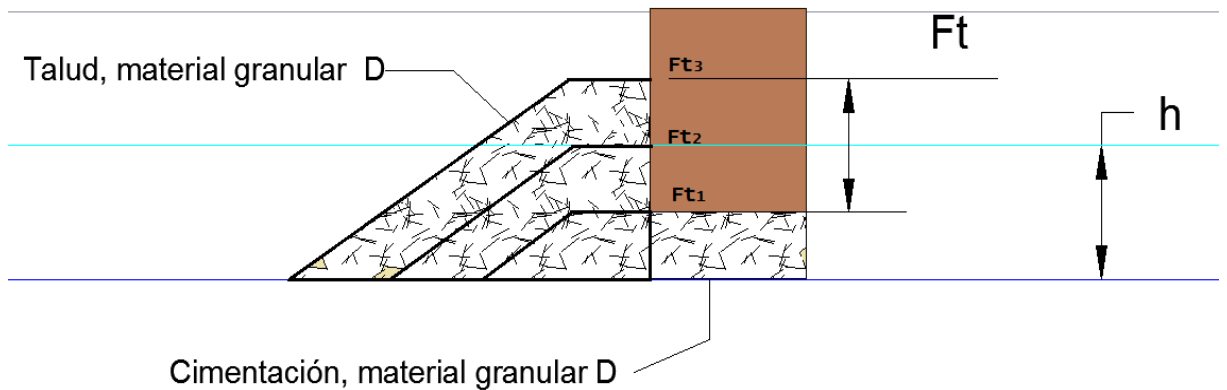


Figura 3.4: Geometría del dique en talud ensayado

Dominio de estudio

Se define un dominio de trabajo con las mismas dimensiones que el canal de oleaje de corriente del CEAMA-UGR, para poder realizar una buena comparación con los ensayos experimentales.

Condiciones de oleaje

Las distintas configuraciones son sometidas a oleaje regular, variando los periodos T , con una altura de ola para cada periodo ensayado.

La altura de ola que se establece en las condiciones de oleaje proviene de los datos experimentales obtenidos por los sensores de nivel del canal de oleaje. De todas las alturas de olas registradas a lo largo del canal, la que interesa en el modelo es la altura de ola incidente H_I .

Para generar las condiciones de oleaje definidas, el modelo cuenta con la simulación de una pala estática.

Características del medio poroso

En el estudio de la interacción entre el oleaje y el medio poroso, con el fin de corregir el efecto escala, se debe definir en el modelo los parámetros que caracterizan el flujo en el interior del medio poroso.

La formulación que describe el flujo en el medio poroso se basa en un coeficiente de fricción f , que representa la resistencia al flujo en el interior del medio poroso. Por tanto, se establecen los tres coeficientes siguientes de fricción según la geometría del dique en talud ensayada en el modelo (esto es, la altura del talud sobre la cimentación Ft):

- Para la menor altura del talud sobre la cimentación Ft_1 , se define un coeficiente del diagrama de fricción característico mixto, estudiado por [Vílchez \(2014\)](#), Figura 2.8.
- Para la mayor altura del talud sobre la cimentación Ft_3 , se establece el coeficiente del diagrama de fricción característico poroso, estudiado por [Pérez et al. \(2009\)](#), Figura 2.6.
- Para la geometría intermedia Ft_2 , se ensaya un coeficiente medio entre el coeficiente de fricción para dique mixto y para dique poroso.

Como se puede observar en los diagramas de fricción característicos, Figuras 2.8 y 2.6, para cada periodo ensayado y diámetro del material granular existirá un coeficiente de fricción ensayado en el modelo numérico.

Por otro lado, se define el diámetro del material granular ensayado D , y su porosidad correspondiente n .

Se han ensayado en el modelo un total de 84 casos numéricos según el diámetro del material D , el periodo del oleaje T y la altura del talud sobre la cimentación Ft que se corresponde con el mismo número de ensayos experimentales definidos. Se muestra una tabla con todas las configuraciones en el **Capítulo 5: Ensayos experimentales**.

Instrumentos de medida

Una vez definido el dominio de trabajo, las geometrías del dique en talud a estudiar y sus características, así como las condiciones de oleaje, se establece, en el modelo, la ubicación de 8 sensores de nivel con la misma posición que en el canal de oleaje. Como ya hemos señalado, tales sensores de nivel miden la variación de la superficie libre a lo largo de dominio definido.

Por último, se simula cada caso numérico completado y definido, y se obtienen los resultados correspondientes.

3. Metodología

3.3.2. Resultados del modelo

El modelo numérico proporciona, a partir de las mediciones de los sensores de nivel, todas las variaciones de la superficie libre. Estos datos los almacena el modelo y, posteriormente, se analizan para obtener los resultados que se compararán con los ensayos experimentales.

Para conseguir los resultados de cada caso numérico, se propaga una rutina en Matlab para:

- Leer los archivos del modelo (variaciones de la superficie libre) de cada uno de los sensores instalados.
- Juntar los registros de cada sensor en un único archivo que contenga las variaciones de la superficie libre de los ocho sensores de nivel.
- Analizar, empleando una función específica creada en Matlab, cada uno de los registros proporcionados por los sensores, de manera que se obtienen las alturas de ola a lo largo del dominio definido y los coeficientes de reflexión y transmisión.
- Guardar, para cada caso numérico, los resultados obtenidos del análisis
- Finalmente, para cada caso numérico, se guardan los resultados obtenidos del análisis para poder compararlos posteriormente con los datos experimentales de los ensayos en el canal de oleaje.

3.4. Análisis de resultados

Comparación de resultados

En primer lugar, se comparan los datos experimentales y numéricos para comprobar y verificar que la metodología seguida para analizar el flujo en el interior del medio poroso, es correcta.

Para cada caso se representan los resultados numéricos frente los experimentales correspondientes a: la altura de la pared del dique H_{pared} y los coeficientes de reflexión y transmisión K_R y K_T . Con ello, se verifica que los casos numéricos se han diseñado correctamente y se prosigue, finalmente, con el siguiente paso fundamental en nuestro trabajo: generar el diagrama de fricción característico.

Diagrama de fricción para dique en talud

No se debe olvidar que uno de los objetivos centrales de este proyecto es conseguir evitar el efecto escala que se produce en los ensayos de laboratorio a escala reducida.

Para la consecución de este objetivo hemos estudiado, siguiendo la línea de trabajo explicada más arriba, el flujo en el interior del medio poroso representado por un coeficiente de fricción f .

Ahora, el trabajo pendiente para completar el estudio consistirá en elaborar un diagrama de fricción característico para dique en talud. Para este fin, se han seguido los siguientes pasos:

- Primero, ajustar los coeficientes de reflexión y transmisión en función de sus respectivos coeficientes de fricción.

Señalemos que, para realizar un ajuste correcto, se han ensayado nuevos casos numéricos implementando coeficientes de fricción superiores e inferiores al coeficiente inicial ensayado para cada caso.

- Después, a partir del ajuste realizado y con un rango de coeficientes de fricción entre [1 - 20], para cada caso numérico, se minimiza el error conjunto entre los coeficientes numéricos y experimentales de reflexión y transmisión.

Finalmente, y dado que el coeficiente de fricción asociado al error mínimo de cada caso, resulta ser el idóneo, con dicho coeficiente se genera el diagrama de fricción característico para dique en talud.

La Figura 3.5 ilustra con detalle el proceso seguido para obtener el diagrama de fricción característico y con ello cumplir el objetivo propuesto.

3. Metodología

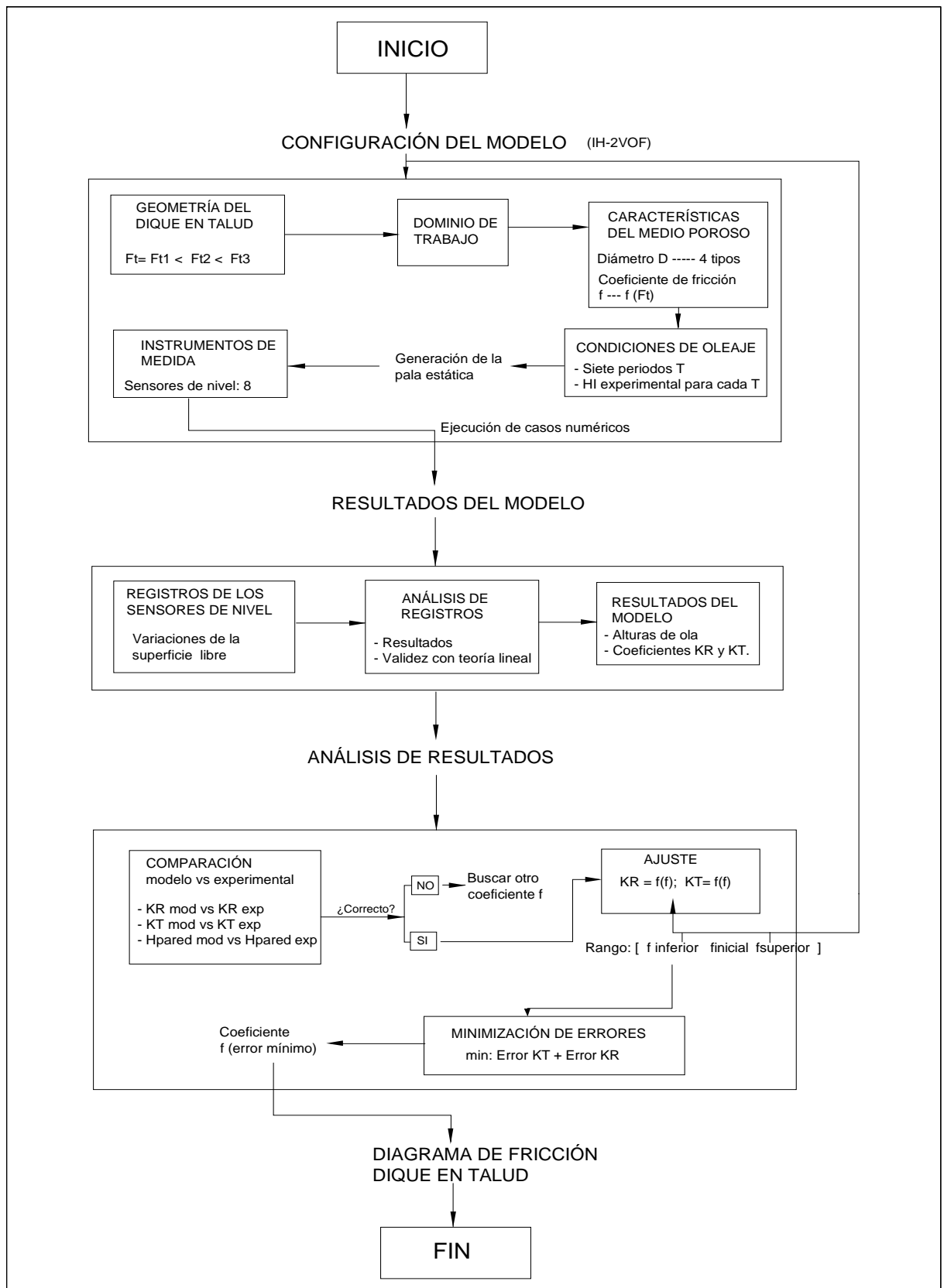


Figura 3.5: Esquema del procedimiento seguido para obtener el diagrama de fricción de dique en talud

Capítulo 4

Análisis de los diques de abrigo de Puertos del Estado

Como ya hemos comentado más arriba, se aborda en esta primera parte del trabajo un estudio crítico de las principales características de los diques de abrigo españoles, en los factores relacionados con su vida útil, los fallos y sus reparaciones. Así como de los sistemas habituales de inspección y monitorización que se aplican. Las figuras y cuadros que se presentan permiten aproximarnos a la situación real existente en este ámbito.

Por otra parte, el análisis de las causas más importantes de averías y fallos, pone de manifiesto la necesidad de profundizar y corregir los problemas inherentes a los criterios de diseño. En particular, en aquellos que se relacionan con el efecto escala, que se estudia más adelante (con ensayos experimentales y modelos numéricos) para el flujo en medio poroso.

4.1. Estudio de las tipologías de diques

En el marco del primer objetivo específico planteado, sobre las tipologías de diques existentes y sus distintos modos de fallo, se ha realizado un estudio por fachadas marítimas de las distintas tipologías de diques de interés general de Puertos del Estado, recogiendo su vida útil y los años de inicio y fin de la construcción. Esto permite, de manera rápida y visual, conocer y analizar qué tipologías de diques son más frecuentes en España, así como comprobar aquellos diques que han cumplido su vida útil y, por tanto, precisan de inspecciones y reparaciones periódicas.

Se ha elaborado una **Tabla** donde se recogen los diques de abrigo por fachadas marítimas en España, inicio y fin de la construcción, vida útil y tipología de cada parte del dique en planta, (siendo DT: dique en talud, DV: dique vertical y DM: dique mixto.) Se presentan, además, aquellos diques que a lo largo de su vida útil han precisado ampliaciones y/o reconstrucciones.

4. Análisis de los diques de abrigo de Puertos del Estado

Puertos Españoles	Nombre del Dique	Construcción		Vida Útil (años)	Partes en planta del Dique				
		Inicio	Fin		Arranque	Alineación Secundaria	Transición	Alineación Principal	Morro
Fachada Marítima Norte									
Puerto de Bilbao									
	Dique de Zierbena	1991	1998	100	DT				DV
	Contradique de Santurzi	1991	1998	100	DT				
	Constradique de Algorta	1894	1902	-	DM				
Puerto de Santander									
	Dique Gamazo	1884	1908	-	DT				
Puerto de Gijón									
	Contradique Príncipe de Asturias	2000	2004	50	DT				
	Dique de la Osa	2000	2004	50	DT				
	Dique de Aboño	2004	2006	50	DT				
	Dique de Torres	2005	2010	50	DT				
	Dique Norte	2005	2010	50	DT	DV			
	Contradique	2005	2010	50	DT				DV
	Taludes Interiores	2005	2010	50	DT				
Puerto de Avilés									
	Dique contención de la arena	2000	2002	50	DT				
Fachada Marítima Galicia									
Puerto de Ferro-San Cibrao									
	Dique de Cabo Prioriño	2002	2005	100	DT				
Puerto de A Coruña									
	Punta Langosteira	2005	2011	50	DT				
Puerto de Vilagarcía de Arousa									
	Dique Ferrazo	1915	1936	-	DT				
Puerto Marín y Ría de Pontevedra									
	Dique Oeste	1986	-	-	DT				
	Esollera de Defensa	1983	1987	-	DT				
Puerto de Vigo									
	Dique de la Coya	1965	1971	-	DT				
	Dique de Berbés	1928	1936	-	DT				
	Dique Este	1982	-	-	DV				
	Dique Oeste	1982	-	-	DV				

Figura 4.1: Tipologías de diques de abrigo de interés general para Puertos del Estado.

4. Análisis de los diques de abrigo de Puertos del Estado

Puertos Españoles	Nombre del Dique	Construcción		Vida Útil (años)	Partes en planta del Dique				
		Inicio	Fin		Arranque	Alineación Secundaria	Transición	Alineación Principal	Morro
Fachada Marítima Surmediterránea									
Puerto de Algeciras									
	Ingeniero Castor Rey del Valle	1977	-	-					
		Recrecimiento: 1990-1998		50			DV		
	Contradique Exterior	1995	1997	50			DT		
	Dique Exento	2005	2008	50			DV		
	Cierre Sur	2004	2011	-			DT		
Puerto de Málaga									
	Dique de Levante	1876	1897	-			DV		
		Reconstrucción completa: 1996-1999		-					
	Contradique	1997	1999	50			DT		DV
Puerto de Motril									
	Dique de Poniente	1926	1944	-			DV		
		Ampliación: 1998-2000		50					
	Contradique	2000	2007	50			DV		
Puerto de Almería									
	Dique de Poniente	1843	1906	-			DT		
		Nuevo dique: 2005-2006		50					
	Dique del puerto Pesquero	2003	2006	50			DT		
Puerto de Carboneras									
	Dique Sur	2003	2004	25			DT		
	Dique Norte	2009	2011	30			DT		
Puerto de Ceuta									
	Noroeste Ampliación I	2002	2004	50			DT		
	Noroeste Ampliación II	2002	2004	25			DT		
	Dique de Levante	1909	1938	-			DT		
	Dique de Poniente	1909	1938	-			DT		
Puerto de Melilla									
	Dique Noreste	1996	1998	50			DV		
	Dique Sur Deportivo	2000	2001	50			DT		

Figura 4.2: Continuación. Tipologías de diques de abrigo de interés general de Puertos del Estado.

4. Análisis de los diques de abrigo de Puertos del Estado

Puertos Españoles	Nombre del Dique	Construcción		Vida Útil (años)	Partes en planta del Dique				
		Inicio	Fin		Arranque	Alineación Secundaria	Transición	Alineación Principal	Morro
Fachada Marítima Levante									
Puerto de Cartagena									
	Dique Sur	2000	2005	50	DV				DT
	Dique Perimetral	2000	2005	50	DV				
	Dique Suroeste	2000	2005	50	DV				
Puerto de Alicante									
	Dique de la Dársena Sur	2003	2007	25	DT				
	Contradique de la Dársena Sur	2003	2007	25	DT				
	Contradique de la Dársena Pesquera	1998	2002	50	DT				
	Dique de Levante	1958	1960	-	DT				
Puerto de Valencia									
	Contradique Sur	1991	2008	25-50	DT				
	Dique del Náutico	2006	2007	50	DT		DV		
	Contradique del Náutico	2006	2007	50	DT				
	Dique Copa de América	2004	2005	50	DV				
	Contradique Copa de América	2004	2005	50	DT				DV
	Dique Norte. Tramo I	2008	2011	50	DT		DV		
	Dique Norte. Tramo II	2008	2011	50	DV		DT		DV
	Contradique Norte	2008	2011	10 50	DT				
Puerto de Sagunto									
	Dique Norte	2002	2004	50	DT		DV		
	Contradique	2002	2004	50	DT		DV		DT
	Dique de la Explanada Norte	1995	1995	50	DT				
Puerto de Castellón									
	Dique	1909	1915 Reconstrucción completa: 1995-2011	- 50	DT		DV		
	Contradique	1956	1968 Reconstrucción completa: 2003-2007	- 20-50	DT		DV		

Figura 4.3: Continuación. Tipologías de diques de abrigo de interés general de Puertos del Estado.

4. Análisis de los diques de abrigo de Puertos del Estado

Puertos Españoles	Nombre del Dique	Construcción		Vida Útil (años)	Partes en planta del Dique					
		Inicio	Fin		Arranque	Alineación Secundaria	Transición	Alineación Principal	Morro	
Fachada Marítima Canarias										
Puerto de Santa Cruz de Tenerife										
	Defensa de la Explanada dársena de la Pesca	1998	2008	15-50	DT	DV		DT		
	Dique muelle de los Llantos	1971	1980	-		DV				
	Dique Exterior de los Llantos	1983	1987	-		DT				
	Dique muelle del Este	1966	1987	-		DV				
	Dique muelle del Sur	1927	1966	-		DM				
Puerto de Santa Cruz de la Palma										
	Dique Muelle	1976	1982 Morro Final: 1992-1995	- 50		DV				
Puerto de San Sebastián de la Gomera										
	Dique Muelle	1976	1980 Alineación 1º final: 1991-1995 Morro final: 2009-2011	- 50 50		DV				
	Dique del Roque de la Hita	2002	2004	6-30-50		DT		DV		
Puerto de La Estaca										
	Dique Muelle	1999	2005	50		DT		DV		
Puerto de las Palmas										
	Dique Reina Sofía	1989	2006	50		DV				
	Dique de la Esfinge	2002	2010	50		DT		DV		
	Dique Sur	2007	2009	25		DT				
Puerto de Arinaga										
	Dique de Agüimes	1997	2006	50		DT		DV		
Puerto de Rosario										
	Dique Muelle	1997	2010	50		DT				

Figura 4.4: Continuación. Tipologías de diques de abrigo de interés general de Puertos del Estado.

4. Análisis de los diques de abrigo de Puertos del Estado

Puertos Españoles	Nombre del Dique	Construcción		Vida Útil (años)	Partes en planta del Dique				
		Inicio	Fin		Arranque	Alineación Secundaria	Transición	Alineación Principal	Morro
Fachada Marítima Suratlántica									
Puerto de Huelva									
	Dique Juan Carlos I	1975	1981	-	DT				
Puerto de Sevilla									
	NO DIQUES DE ABRIGO								
Puerto de la Bahía de Cádiz									
	Dique de Mar de Leva	1996	1998	50	DT				
	Dique de Levante	1964	1969	-	DT				
Fachada Marítima de Cataluña									
Puerto de Tarragona									
	Dique de Levante	1790	-	-	DT		DV		
		Nuevo Arranque y Alineación 2ª 2002-2002		50					
		Alineación 1ª y Morro: 2005-2007							
	Contradique	1997	1998	50	DT				DV
Puerto de Barcelona									
	Nueva Bocana	1998	2003	50	DT		DV		
	Sur. Tramo I	2001	2008	50	DT				
	Sur. Tramo II	2001	2008	50	DV	DT		DV	
	Este	1898	1917	-	DT				
		Ampliación tramo final: 2001-2007		50					
Fachada Marítima Baleares									
Puerto de Eivissa (Ibiza)									
	Dique de Botafoc	2000	2003	50	DV				

Figura 4.5: Continuación. Tipologías de diques de abrigo de interés general de Puertos del Estado.

4. Análisis de los diques de abrigo de Puertos del Estado

En España se han construido las tres tipologías de diques de abrigo principales existentes: vertical, talud y mixto. No obstante, la tipología más frecuente en los Puertos del Estado es el dique en talud.

Por ello, este proyecto se centra en el estudio de los diques en talud, buscando métodos destinados a solventar los problemas de diseño y averías de esta tipología de dique. Por otro lado, es la tipología que más material poroso contiene en su sección. Este hecho nos permitirá estudiar adecuadamente, para esta tipología, el efecto escala de los modelos en los ensayos a escala reducida.

Además, debemos mencionar que la mayoría de los diques de abrigo tienen una vida útil de 50 años y en algunos de ellos se han tenido que realizar reparaciones y/o ampliaciones debido a fallos producidos en su sección.

4.2. Vida útil

Con toda la información disponible y recopilada para este estudio, se pueden aportar datos generales sobre la vida útil de los diques de abrigo de Puertos del Estado.

La mayoría de los diques de abrigo construidos en el siglo XX tienen una vida útil de unos 100 años, lo cual resulta inadmisiblemente y carece de sentido, siendo 50 años de vida útil una estimación de tiempo más razonable, como se señala más arriba.

Los últimos diques construidos con reparaciones y/o ampliaciones realizadas tienen una vida útil entre 50 y 25 años. En algunos de ellos, sus tramos tienen vidas útiles diferentes entre sí, debido a las condiciones de oleaje y medioambientales a las que están sometidos.

Para cumplir con esta vida útil es necesario establecer unos costes de conservación y una serie de reparaciones, ya estudiados a la hora de elegir la tipología del dique, para asegurar la durabilidad de la estructura.

La Tabla 4.1 muestra un cuadro de la ROM 1.1 donde se recoge la tipología más adecuada en función de la conservación, reparación y el desmantelamiento del dique.

Tipología	Conservación	Reparación	Interacción	Desmantelamiento
En talud	factible	lenta, cara	alta	complicado, difícil
Vertical	compleja	rápida, cara	baja	sencillo
Mixto	compleja	lenta, cara	baja/media	complicado, difícil

Tabla 4.1: Tipología más adecuada en función de la conservación, la reparación y el desmantelamiento del dique, (Cuadro 2.5, ROM1.1 (2003) Recomendaciones de Obras Marítimas)

Cabe destacar que cuando se produce una avería importante o el dique ha colapsado, se puede decir que no ha cumplido con la vida útil prevista.

Con los datos recogidos de los distintos diques de abrigo de interés general de los Puertos del Estado y en función de las averías descritas anteriormente, podemos señalar que, aproximadamente, en un 15 % de los diques de abrigo en España, que no han cumplido su vida útil, se han tenido que realizar reparaciones para su conservación.

4.3. Fallos y reparaciones realizadas en los diques de abrigo

4.3.1. Fallos y repaciones en diques verticales

Fallos y averías

Son múltiples los daños y averías de esta tipología estructural de modo de fallo instantáneo que se producen por la acción de la ola máxima, al tratarse de monolitos o elementos rígidos. Podemos destacar los siguientes fallos más significativos y frecuentes:

– Fallos por deslizamiento, que se producen fundamentalmente en las disposiciones de alineaciones de diques verticales por efecto rompiente, y por la superposición de olas reflejadas en la concavidad, que por sobreelevación provocan la existencia de olas mayores.

– Fallos por las diferencias en las profundidades y en las orientaciones de los frentes, así como la existencia de bajos rocosos o de fondos móviles socavables, que repercuten en las acciones y en la posibilidad de fallo puntual-local por impacto en algunas estructuras.

– Fallos producidos por el violento choque de las olas al romper sobre el paramento. Este hecho es el origen y la causa principal de averías puntuales, debido a las elevadas presiones instantáneas que producen tanto deslizamientos como una socavación progresiva.

– Fallos por combinación de mareas astronómicas con sobreelevaciones de presión, “wave-setup” y efecto viento, que inducen a mayores láminas de agua provocando olas en rotura superiores. Esta es una de las causas más comunes de destrucción del dique.

Reparaciones

En función del modo de fallo producido en esta tipología de diques se realizan unas reparaciones u otras, entre las que podemos señalar las siguientes:

- Reconstrucción del dique vertical.
- Pasar de un dique vertical a un dique en talud o a un dique mixto artificial rebasable.
- Rigidización de la estructura.
- Aumento de la berma.

4.3.2. Fallos y reparaciones en diques en talud

Fallos y averías

Un dique en talud es una estructura que presenta un modo de fallo gradual. Este se manifiesta porque el dique va perdiendo estabilidad hasta alcanzar una fase de daño moderado o de inicio de destrucción, producido por filtro visible o por colapso de sus componentes. Se consideran los siguientes aspectos como causa de las averías más comunes:

- El clima marítimo del proyecto: Errores en la estimación.
- El diseño inicial de las bases y criterios de diseño de partida, así como los derivados de posibles ensayos en el modelo físico.
- El funcionamiento de los elementos del manto.
- La rotura y pérdida de las piezas del manto.
- El factor de escala de las piezas del manto principal.
- El comportamiento hidráulico de las secciones.
- Los problemas existentes durante los procesos de ejecución.
- La naturaleza del terreno de apoyo y cimentación.
- El vuelo del espaldón.
- El comportamiento tras el esfuerzo, reparación o mantenimiento de las secciones dañadas.

Reparaciones

Las reparaciones más usuales llevadas a cabo en esta tipología de dique son:

- Reconstrucción del dique en talud.
- Recarga y refuerzo del manto principal.
- Recarga del pie del talud y berma de pie hasta el encuentro con el terreno natural.
- Refuerzo del espaldón.
- Extracción y retirada de los dolos del manto.
- Aumento de la anchura y peso de la berma.
- Creación de una banquetta protectora.

4.3.3. Averías notables en los diques de abrigo de España

Los principales diques de abrigo de interés general de Puertos del Estado que han sufrido averías importantes a lo largo de su vida útil se recogen en la siguiente tabla:

4. Análisis de los diques de abrigo de Puertos del Estado

Puerto	Dique	Tipología	Avería	Causas	Reparación
Gijón	Príncipe de Asturias	Talud	Rotura y rebase	Temporal intenso	Refuerzo de los bloques
Marín y Ría de Pontevedra	Dique Oeste	Talud	Fallo del muelle adosado	Errores de diseño	Reposición de escollera y bloques
Vigo	Dique del Berbés	Talud	Socavaciones en el pie Pérdida de escollera	Temporal intenso	Recarga de la banqueta y relleno de socavaciones
Huelva	Juan Carlos I Rey de España	Talud	Socavaciones y descenso de la cota del manto	Temporal intenso	Reconstrucción del perfil
Algeciras	Dique Ingeniero Castor Rey del valle	Vertical	Rebase y caída de algunos bloques	Errores de diseño	Recrecimiento del espaldón y relleno de huecos
Málaga	Dique de Levante	Vertical	Rebase del dique, desaparición de escollera y grieta en el morro	Temporal intenso	Refuerzo del perfil y reconstrucción del espaldón
Motril	Dique Poniente	Vertical	Destrucción total del dique	Temporal intenso	Proyecto de Reconstrucción
Almería	Dique Poniente	Talud	Remoción y descomposición de la de la escollera	Errores de diseño	Reposición de escollera y reconstrucción
Ceuta	Dique Poniente	Talud	Desmoronamientos y arrastres del manto principal	Errores de diseño	Recargo de escollera
Castellón	Dique	Talud y Vertical	Arrastre de escollera del manto, descalce y rotura del hormigón	Temporal intenso y errores de diseño	Refuerzo con hormigón en masa
Barcelona	Dique Este	Talud	Desaparición de bloques, asiento y dislocaciones en la banqueta	Temporal intenso y errores de diseño	Relleno de huecos y obras de mantenimiento
Estaca	Dique - Muelle	Talud y Vertical	Rebases ocasionales	Insuficiencia del espaldón	Recrecimiento del espaldón

Figura 4.6: Principales diques de abrigo de interés general de Puertos del Estado que han sufrido averías importantes.

4.3.4. Principales causas de fallo y averías

Las principales causas de fallo en los diques de abrigo de los puertos españoles se señalan en el siguiente esquema:

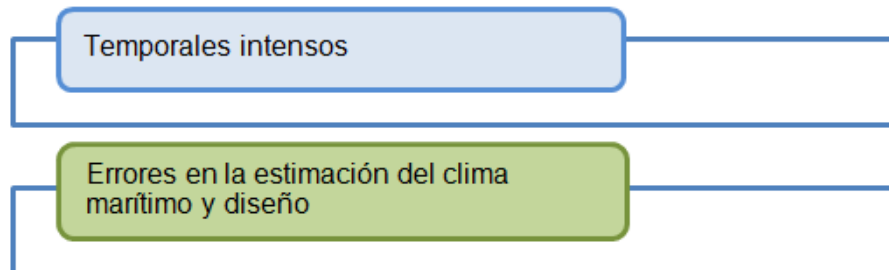


Figura 4.7: Principales causas de fallo

Los diagramas de abajo, Figuras 4.8 y 4.9, recogen una estimación de dónde se produce el mayor número de averías según la tipología de dique y la fachada marítima en la que se encuentren.

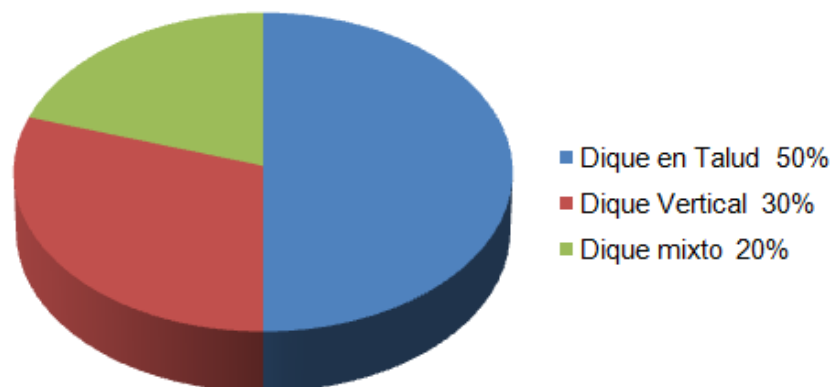


Figura 4.8: Porcentaje de averías según la tipología de dique

El número de averías es mayor en los diques en talud porque es la tipología de dique que más se contruye en España, como se ha mencionado anteriormente.

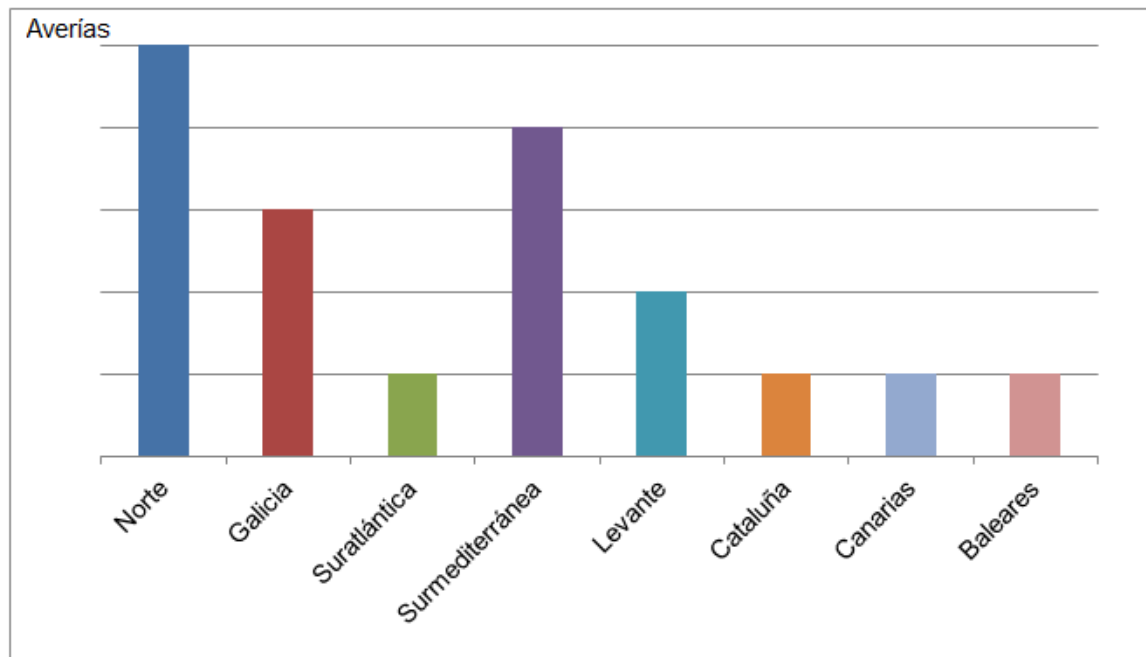


Figura 4.9: Porcentaje de averías según las Fachadas Marítimas

La fachada marítima Norte presenta mayor número de fallos posiblemente por las condiciones de oleaje, con un clima más adverso y, por tanto, con temporales más fuertes.

4.4. Sistemas de inspección y monitorización existentes

Se ha realizado para este estudio una búsqueda acerca de los sistemas de inspección, mantenimiento y monitorización de diques de abrigo, que nos aporta los siguientes datos y valoraciones.

4.4.1. Métodos de monitorización

Como idea principal, podemos destacar que los métodos se basan en inspeccionar y observar los diques con regularidad para que, al final, se pueda clasificar el daño y, superado un umbral, actuar sobre la estructura.

Los métodos de monitorización que se desarrollan son:

- Inspecciones visuales: Para una comprobación específica del daño. Este proceso requiere mucho tiempo.
- Inspecciones submarinas: Extensión de las inspecciones visuales aguas abajo. En este caso es difícil obtener una posición fija y se requiere más tiempo.

- Supervisión fotográfica: Permite obtener posiciones fijas del daño utilizando técnicas de parpadeo. Es el método más útil y efectivo. Las fotografías pueden ser tomadas desde barco, una grúa o avión.
- Grúa y revisiones de pelota: Monitorizan el perfil del dique en intervalos predefinidos. Este método es fundamental durante la construcción del dique, aunque presenta problemas en relación con el alcance de la grúa.
- Revisiones sísmicas, batimétricas y escáneres sonares: Complemento de la grúa para la extensión de la monitorización mar adentro.
- Escáner Laser: Puede ser usado para supervisar posiciones y niveles de la losa de coronación y unidades de la armadura que han sufrido un deterioro por asentamiento de la estructura.

4.4.2. Herramientas para el diagnóstico e inspección automatizada de diques

Estas herramientas hablan de la clasificación de las estructuras mediante datos obtenidos en la supervisión de las mismas. Se trata de tener una idea de su evolución y tasar el estado de riesgo.

Para ello se utiliza un instrumento, IRIS, capaz de realizar una inspección con alta precisión en partes sumergidas y emergidas del dique. El objetivo es producir revisiones tridimensionales con una regularidad espacial adecuada para esta clase de estructura, es decir, genera un prototipo.

Por otro lado, se intenta condensar el volumen de datos procedentes de las inspecciones periódicas, en un pequeño conjunto de parámetros que permitan la caracterización del estado y la evolución de la estructura.

El IRIS va instalado en un catamarán autónomo (DELFIM) o de modo independiente, y dispone de una serie de sensores y sistemas:

- Radar ultrasónico.
- Laser en 2D.
- GPS.
- Sensor magnético.

Toda la información recogida durante la inspección se almacena y procesa en una Consola de Monitorización para, posteriormente, definir parámetros y establecer unos umbrales que permitan clasificar y tasar el estado de riesgo de la estructura.

Para validar estos umbrales se utilizan, tanto el resultado del modelo a escala, como las pruebas y los datos del prototipo medido con el instrumento desarrollado.

4.4.3. Optimización de las decisiones de inspección y mantenimiento

Habitualmente, se realiza un modelo de optimización para encontrar políticas de mantenimiento e inspección conjuntas de las instalaciones bajo la incertidumbre del modelo de comportamiento. Su objetivo es obtener una formulación que posibilite minimizar el coste de los gastos de reparación y mantenimiento, además de obtener una planificación.

El modelo de comportamiento se explica representando el deterioro de las instalaciones como una mezcla de modelos conocidos tomados de un conjunto finito. Son variables arbitrarias continuas con densidades de probabilidad que se actualizan con el tiempo. Presentan un estudio paramétrico para analizar el efecto de incertidumbre del modelo de comportamiento inicial y la tendencia del coste esperado en el manejo de una instalación.

Para la realización de estos modelos se efectúan inspecciones periódicas con el fin de:

- Conocer la evolución de la condición actual de la estructura.
- Obtener información que permita actualizar los datos para realizar predicciones sobre la condición futura de la estructura.

Estos modelos se formulan como un conjunto finito de acciones y estados de Procesos de Decisión de Markow, PDM:

– Se trata de una programación dinámica donde se define un horizonte de planificación T , $t: 1, 2, \dots, T$. Durante ese tiempo la estructura pasa por una serie de estados donde hay que tomar decisiones de reparación y mantenimiento (acciones), y se estima la probabilidad de que la estructura pase de un estado (i) a otro (j). Todo ello se programa con el objetivo de obtener un mínimo coste esperado del problema evaluado.

Sin embargo, los problemas de optimización de Markow consideran que los datos de partida son verdaderamente ciertos y solo asumen un error de la tecnología utilizada. Por ello, para mejorar esta formulación, se emplea una estrategia de Quasi-Bayes para la estimación de la mezcla finita de PDMs (acciones y estados) con una información imperfecta. Las inspecciones en este contexto revelan el estado actual de la estructura y proporcionan información sobre los errores de medida asociados, así como información sobre el proceso de deterioro.

En resumen, esta optimización se basa en obtener modelos de comportamiento del deterioro de la estructura y tales modelos permiten minimizar los costes de los gastos en reparación y mantenimiento.

4.5. Problemas relativos a los criterios de diseño: Efecto escala

De las consideraciones expuestas más arriba, se puede concluir que la tipología de dique con mayor número de fallos son los diques en talud. Esto se debe, como ya hemos comentado en parte, a que esta es la tipología más construida en los Puertos del Estado, pero principalmente, a los criterios de diseño que se utilizan para su construcción.

En efecto, a la hora de diseñar un dique en talud se emplean formulaciones empíricas, donde la altura de ola de diseño utilizada para el cálculo se obtiene multiplicando por un coeficiente o factor constante. Este coeficiente no tiene en cuenta la distribución de energía real que se produce en la interacción del oleaje con la obra marítima. Esta distribución de energía determinará la oscilación a pie de dique, que debe ser la altura de ola considerada para el diseño.

Mediante modelos realizados en los ensayos de laboratorio a escala reducida se puede analizar la interacción del oleaje con la obra. Sin embargo, existen otras limitaciones que originan un diseño insuficiente en los modelos de diques.

En concreto, estos ensayos en laboratorio a escala reducida requieren que existan similitud geométrica, dinámica y cinemática entre el modelo y el prototipo. En los ensayos hidráulicos las fuerzas que gobiernan el fenómeno son principalmente las de gravedad e inercia. Por lo tanto, el escalado del modelo se conserva, no siendo posible conservar simultáneamente la porosidad y la permeabilidad, lo que modifica la distribución de energía del oleaje al incidir sobre el dique. Como consecuencia, el comportamiento global del dique se verá modificado por este hecho, que se denomina *efecto escala*, y que puede ser el origen de múltiples averías.

Capítulo 5

Ensayos Experimentales

Para el estudio del flujo en el interior del medio poroso se han llevado a cabo una serie de ensayos experimentales que, comparados con los resultados del modelo numérico, permitirán obtener una herramienta útil para corregir el efecto escala.

5.1. Dispositivo experimental

Los ensayos se han realizado en el canal de ola-corriente del Centro Andaluz de Medio Ambiente- Universidad de Granada (CEAMA-UGR); de dimensiones $20\text{m} \times 0.65\text{m} \times 0.90\text{m}$.

El modelo ha consistido en un dique en talud irrebalsable que para alturas del talud bajas se trata de un dique con berma, formado por un cajón impermeable apoyado sobre una cimentación de material granular de diámetro uniforme y por un talud del mismo material. Los parámetros geométricos del dique son (Figura 5.1): ancho del dique B , diámetro característico del material granular D , profundidad del agua h , altura de la cimentación hb , altura del talud sobre la cimentación Ft y ancho de coronación del talud Bo .

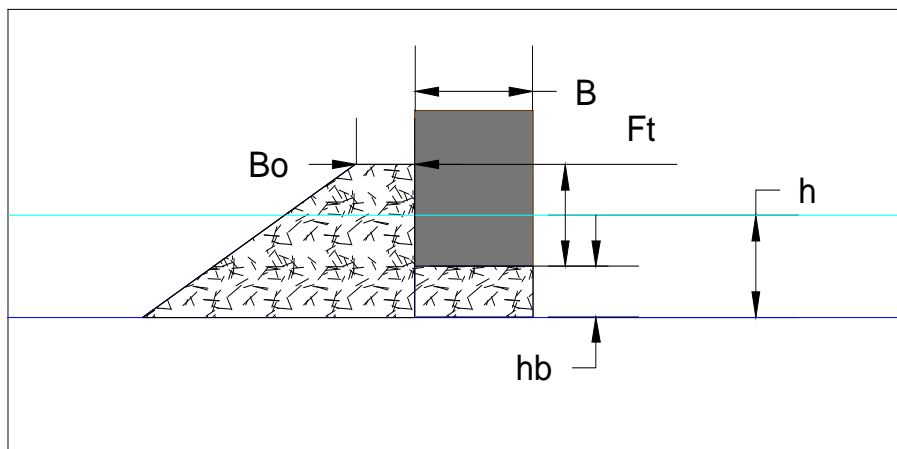


Figura 5.1: Parámetros geométricos del dique en talud irrebalsable ensayado

A continuación, en las Figuras 5.2-5.7 se muestran algunas imágenes de la construcción del modelo en el canal de ola-corriente del Centro Andaluz de Medio Ambiente (CEAMA-UGR), donde se pueden apreciar sus dimensiones, los distintos tamaños del material granular y sus características:

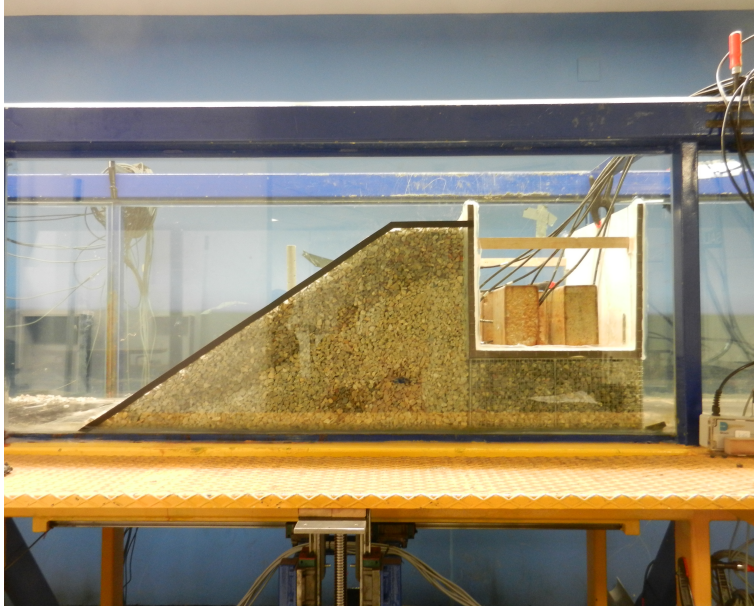


Figura 5.2: Dique, Diámetro 12mm



Figura 5.3: Talud, Diámetro 12mm

5. Ensayos Experimentales



Figura 5.4: Dique, Diámetro 52mm

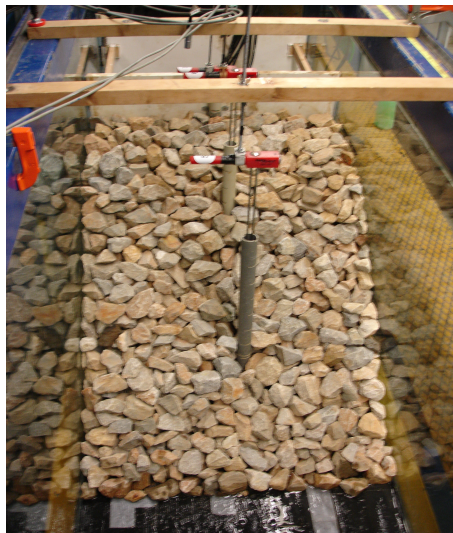


Figura 5.5: Talud, Diámetro 52mm



Figura 5.6: Montaje de la cimentación



Figura 5.7: Talud, Diámetro 40mm

5. Ensayos Experimentales

Para realizar los ensayos se han variado una serie de parámetros que permiten profundizar en el estudio, y otros se han mantenido constantes. Asimismo, se ha variado el diámetro del material característico D y la altura del talud sobre la cimentación Ft , para un ancho de coronación del talud constante, $Bo : 0.10$ m.

Para la construcción de la cimentación, se ha trabajado con cuatro diámetros del material granular para tener los diferentes regímenes de flujo presentes en el talud del dique y la cimentación. Sus principales características se detallan en la Tabla 5.1:

Material	D (mm)	n (porosidad)
1	52	0.474
2	40	0.473
3	26	0.462
4	12	0.391

Tabla 5.1: Características del material granular

Se han ensayado tres alturas del talud sobre la cimentación: $Ft = 0$ m, 0.2 m, 0.4 m. Esto permite estudiar las siguientes tres tipologías para el dique en talud-berma:

- Con $Ft = 0$ m, se tiene un dique con una berma baja de material granular, donde no se produce prácticamente rotura del oleaje y se refleja la mayor parte de la energía incidente.
- Con $Ft = 0.2$ m, se tiene un dique con una berma alta, por lo que hay mayor proporción de material granular y aumenta la disipación de energía por fricción y rotura .
- Con $Ft = 0.4$ m, se obtiene un dique en talud donde la energía incidente se transforma en energía reflejada y se produce la rotura del oleaje incidente.

Las variables que se mantienen constantes son la profundidad del agua de los ensayos $h = 0.40$ m, la cota de cimentación $hb = 0.20$ m y el ancho del dique $B = 0.5$ m.

La Tabla 5.2 muestra las 12 configuraciones ensayadas dadas por cuatro diámetros de material granular D , y tres alturas de talud sobre la cimentación Ft .

D (mm)	Ft=0m	Ft=0.2m	Ft=0.4m
12	1	2	3
26	4	5	6
40	7	8	9
52	10	11	12

Tabla 5.2: Configuraciones ensayadas

$T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos; $H=0.04$ m; $Bo=0.10$ m

Las distintas configuraciones han sido sometidas a oleaje regular, variando los periodos con una altura de ola teórica de $H_I = 0.04$ m para cada periodo ensayado T .

La duración de cada ensayo, véase Tabla 5.3, debe ser suficiente para que sea representativo de un estado de mar, es decir, se debe fijar un periodo de medición que sea, por un lado, lo suficientemente corto para poder admitir la hipótesis de estacionaridad, y por otro, lo suficientemente largo para que al analizar la muestra, tenga un número representativo de olas para su tratamiento. Se han establecido un mínimo de 50 olas en cada ensayo.

T(s)	Duración
1.05	1':15"
1.25	1':15"
1.5	1':30"
1.75	1':45"
2	2':00"
2.25	2':00"
2.5	2':15"

Tabla 5.3: Duración de cada ensayo

5.2. Adquisición de datos

Los registros de superficie libre (η) se han obtenido mediante el uso de ocho sensores de nivel, cuya distribución se muestra en la Figura 5.8:

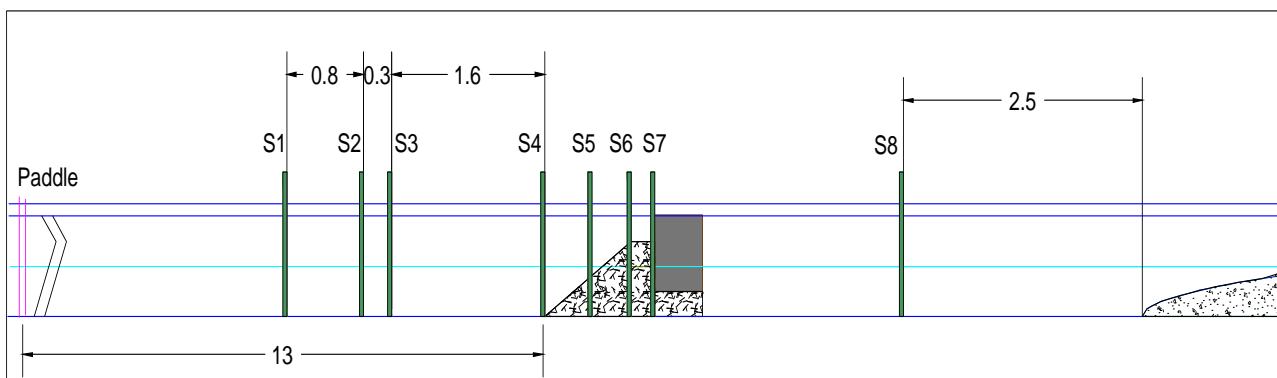


Figura 5.8: Esquema del dispositivo experimental con los sensores de nivel

Se han colocado dos grupos de tres y cuatro sensores a barlomar y un sensor a sotamar del dique para obtener la medida de la reflexión y la transmisión, separados de tal forma que permita la aplicación de Método de [Baquerizo \(1995\)](#). La frecuencia de muestreo de los sensores es de 20Hz.

Para determinar la altura de ola total a pie de dique H_{pie} , se ha colocado un sensor de nivel S4 en el pie del talud. Se ha obtenido también la altura de ola en la pared H_{pared} , colocando un sensor de nivel lo más próximo posible a la pared vertical, S7.

5. Ensayos Experimentales

Para medir la superficie libre a lo largo del manto se han colocado los sensores S5 y S6; encontrándose los dos últimos a 1/3 de la distancia entre S4 y S7 respectivamente.

En lo que sigue, se muestra de forma más detallada los diferentes parámetros obtenidos a partir de la colocación de los sensores de nivel, con una frecuencia de muestreo de 20Hz.

5.2.1. Registros de superficie libre

Para oleaje regular los datos experimentales que se obtienen son:

– Altura incidente $H_{I\,exp}$, coeficiente de reflexión $K_{R\,exp}$, y su fase ϕ a partir de los sensores de nivel S1, S2 y S3, y la aplicación del Método [Baquerizo \(1995\)](#).

– Altura de ola total a pie de dique $H_{pie\,exp}$, con el sensor S4, ascenso del oleaje sobre la pared vertical $H_{pared\,exp}$, con el sensor S7 y ascensos del oleaje en el talud a partir de las medidas de los sensores de nivel S5, S6.

– Altura de ola transmitida $H_{T\,exp}$, a partir de la medida del sensor de nivel S8.

– Coeficiente de transmisión $K_{T\,exp}$, el cual se ha obtenido como el cociente entre la altura de ola transmitida y la altura de ola incidente: $K_{T\,exp} = H_{T\,exp}/H_{I\,exp}$.

Se debe mencionar que la obtención de los coeficientes de reflexión y transmisión, se basa en la transformación de energía que sufre el oleaje incidente en el volumen de control que contenga la sección del dique. Este balance de energía se ha explicado en el **Capítulo 2 del proyecto: Balance de energía**.

$$K_R^2 + K_T^2 + D_* = 1 \quad (5.1)$$

– La energía total disipada se ha obtenido según la ecuación 5.2 (energía total disipada en el volumen de control), sustituyendo los valores experimentales del coeficiente de reflexión y transmisión.

$$D_* = \frac{D'_{*exp}}{\frac{1}{8} \cdot \rho_w \cdot g \cdot H_{I\,exp}^2 \cdot C_g} = 1 - K_{R\,exp}^2 - K_{T\,exp}^2 \quad (5.2)$$

Capítulo 6

Modelo Numérico

En este capítulo se presenta el modelo numérico empleado para desarrollar casos numéricos cuyos resultados permitan, comparando con los resultados experimentales, corregir el efecto escala de los ensayos de laboratorio a escala reducida.

En primer lugar, se describen las características y la formulación básica de cálculo del modelo usado: IH-2VOF, así como el módulo CORAL que genera su correspondiente malla computacional.

La parte central del capítulo la constituye el análisis de la configuración del modelo. Por una parte, se estudia la geometría específica del dique en talud que se ensaya, el diseño y características de la malla que nos proporciona datos discretos de las zonas en las que se genera, intera o transmite el oleaje, así como de la simulación numérica de las condiciones del oleaje de tipo regular. A continuación, se analizan los parámetros del medio poroso que caracterizan el medio granular del dique en talud, y el análisis de la superficie libre, que nos permiten medir las variaciones de nivel a lo largo de un dominio preestablecido.

Tanto para las condiciones de oleaje, como para los parámetros del medio poroso, se detallan las condiciones de los datos que se definen en el modelo y se aportan también ejemplos para apreciar el orden de las magnitudes aplicadas. Varias figuras ilustran la geometría del talud, la malla del modelo y la posición de los sensores de nivel. Finalmente, se estudian los resultados del modelo para cada caso numérico ensayado.

6.1. Características del modelo

El modelo numérico que se ha utilizado para la propagación del oleaje y el análisis del flujo en el interior del medio poroso de un dique en talud, es el IH-2VOF. Entre todos los programas comerciales conocidos para las simulaciones del oleaje, se ha utilizado el modelo IH-2VOF, ya que este es el que mejor se adapta a las necesidades exigidas en nuestro trabajo y ha sido validado en numerosos trabajos de interacción del oleaje con estructuras costeras, fundamentalmente a sus utilidades en lo que se refieren a:

- Estudiar la propagación del oleaje a lo largo del dominio definido y su interacción con la estructura y el medio poroso.

– Definir las condiciones ensayadas en el canal de oleaje con las mismas dimensiones y características geométricas; lo cual resulta idóneo para poder comparar los resultados del modelo con los ensayos experimentales.

El modelo IH-2VOF ha sido desarrollado por la Universidad de Cantabria para investigar la interacción entre la propagación del oleaje y el medio poroso de obras marítimas, el run-up y run-down de una playa, así como otras estructuras en las que resulta de interés conocer su comportamiento debido a las condiciones del oleaje. El modelo utilizado incluye un módulo denominado CORAL que permite definir el dominio de trabajo, la estructura y las características de los materiales que forman las distintas geometrías establecidas.

6.1.1. Formulación matemática de cálculo del modelo

El modelo IH-2VOF resuelve el flujo en el dominio hidráulico con las ecuaciones de Navier - Stokes en una región, tanto fuera del medio poroso, como dentro del mismo medio poroso. Por otro lado, el movimiento de la superficie libre es monitorizado en un volumen de control del fluido.

La no linealidad y las características de las ecuaciones de Navier - Stokes permiten modelar los complejos procesos de transformación del oleaje. Específicamente, el flujo en el medio poroso es modelado por la resolución de las ecuaciones de VARANS (Volume - Average Reynolds Average Navier - Stokes equations), derivadas de integrar las ecuaciones de RANS (Reynolds Average Navier - Stokes equations) dentro de un volumen de control con un apropiado modelo de turbulencia ($k - \varepsilon$):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{1+c_A}{n} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\bar{u}_j}{n^2} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}_o}{\partial x_i} + \frac{\nu}{n} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \\ \frac{1}{n^2} \frac{\partial (\bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial x_j} - \frac{\alpha \nu (1-n)^2}{n^3 D_{50}^2} \bar{u}_i - \frac{\beta (1-n)}{n^3 D_{50}} \bar{u}_i |\bar{u}| \end{aligned} \quad (6.2)$$

Las variables t , u y p_o son, respectivamente, el tiempo, la velocidad promedio de Reynolds y la presión efectiva, dada por la expresión $p_o = p + \rho \cdot g_i \cdot x_i$, donde p es la presión y g la aceleración de la gravedad; la variable n es la porosidad, ρ es la densidad y ν es la viscosidad cinemática. Los subíndices i y j representan las direcciones horizontal y vertical respectivamente. Para un desarrollo más extenso de las ecuaciones véase el **Apéndice A: Formulación matemática del IH-2VOF**.

Obsérvese que los dos últimos términos de la ecuación 6.2 representan la formulación descrita por Forchheimer (1901) para describir el flujo en el medio poroso. Por tanto, el sistema de cálculo del modelo numérico IH-2VOF para modelar el flujo a través del medio poroso se basa en las ecuaciones de Forchheimer, (ecuación 2.11).

6. Modelo Numérico

En este punto, tal y como se ha señalado en el **Capítulo 2** relativo a los conceptos teóricos del proyecto, cabe señalar que existen nuevos desarrollos para el planteamiento del problema.

En este proyecto se ha seguido la formulación descrita por Sollit y Cross, implementando en el modelo la resistencia al flujo en el interior del medio poroso a través de un sólo coeficiente de fricción f , y que puede expresarse mediante la ecuación:

$$I = f \cdot \sigma \cdot u \quad (6.3)$$

Siendo σ la frecuencia angular, u la velocidad de descarga del fluido y f el coeficiente de fricción.

6.1.2. CORAL

Como ya hemos mencionado antes, el módulo CORAL incluido en el modelo utilizado, genera la malla computacional del IH-2VOF. En él se definen tanto el dominio de trabajo, como la diferentes geometrías que forman la estructura, estas son:

- El dominio del fluido (en este caso agua).
- Geometrías permeables y sus características.
- Geometrías impermeables

Estas geometrías se posicionan dentro del dominio, definido con las coordenadas que se establecen según el diseño de la estructura, y que pasamos a describir con detalle a continuación.

6.2. Configuración del modelo

6.2.1. Geometría del dique en talud

Para desarrollar el mismo esquema de trabajo, que permita realizar una comparación adecuada entre los resultados experimentales y numéricos, se han ensayado las mismas configuraciones geométricas definidas en el **Capítulo 5: Ensayos experimentales**. Véase la Tabla 5.2.

En consecuencia, la geometría ensayada consiste en un dique en talud irrebalsable, formado por un cajón impermeable sobre una cimentación de material granular y un talud del mismo material. En esta situación, para poder estudiar la influencia del proceso de rotura en la interacción entre el oleaje y el medio poroso presente en el talud y la cimentación del dique, se definen tres geometrías de dique en función de la altura del talud sobre la cimentación Ft .

La descripción de estas geometrías y sus figuras correspondientes siguen a continuación.

- Altura del talud sobre la cimentación $Ft = 0m$: Dique con una berma baja de material granular.

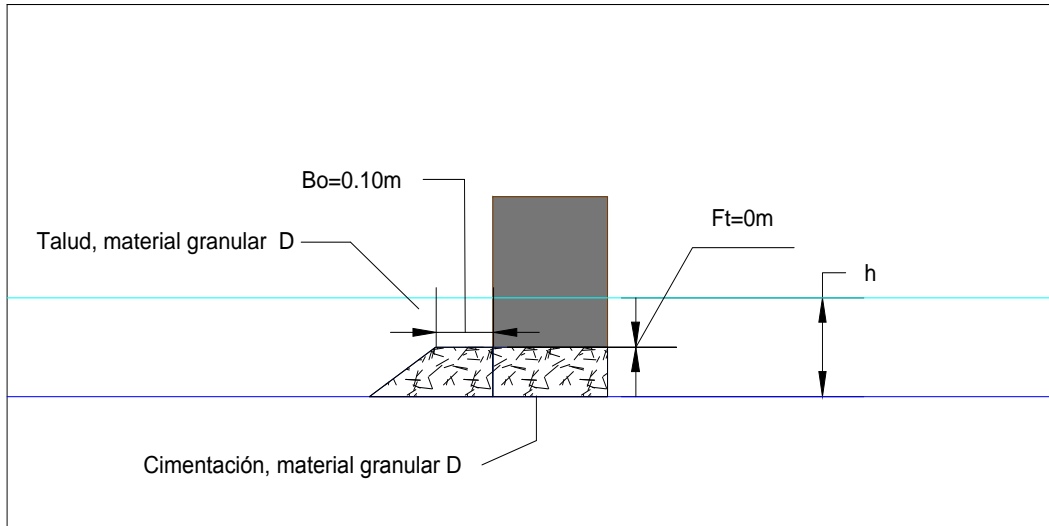


Figura 6.1: Geometría: Dique en talud con altura del talud sobre la cimentación $Ft = 0m$

- Altura del talud sobre la cimentación $Ft = 0.2m$: Dique con una berma alta de material granular.

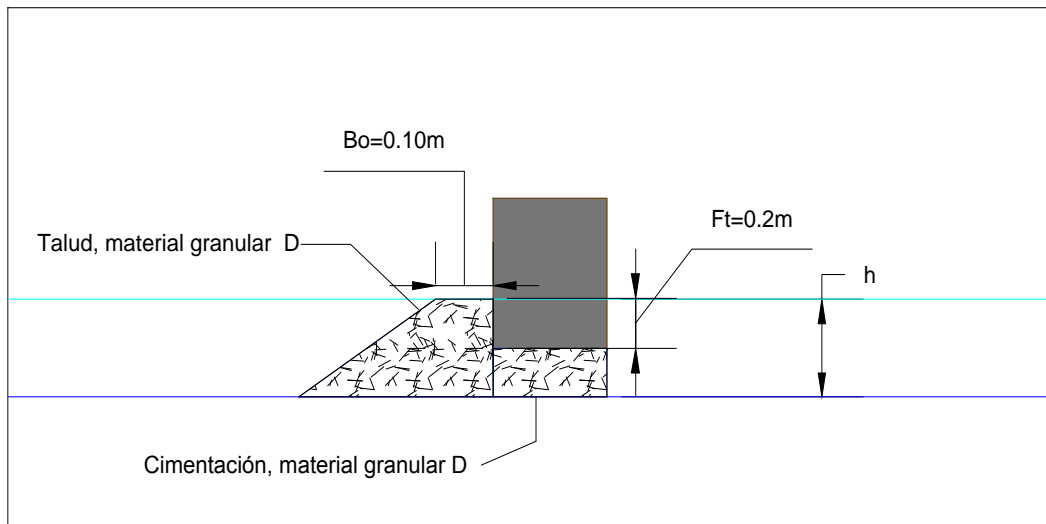


Figura 6.2: Geometría: Dique en talud con altura del talud sobre la cimentación $Ft = 0.2m$

6. Modelo Numérico

- Altura del talud sobre la cimentación $Ft = 0.4m$: Dique en talud.

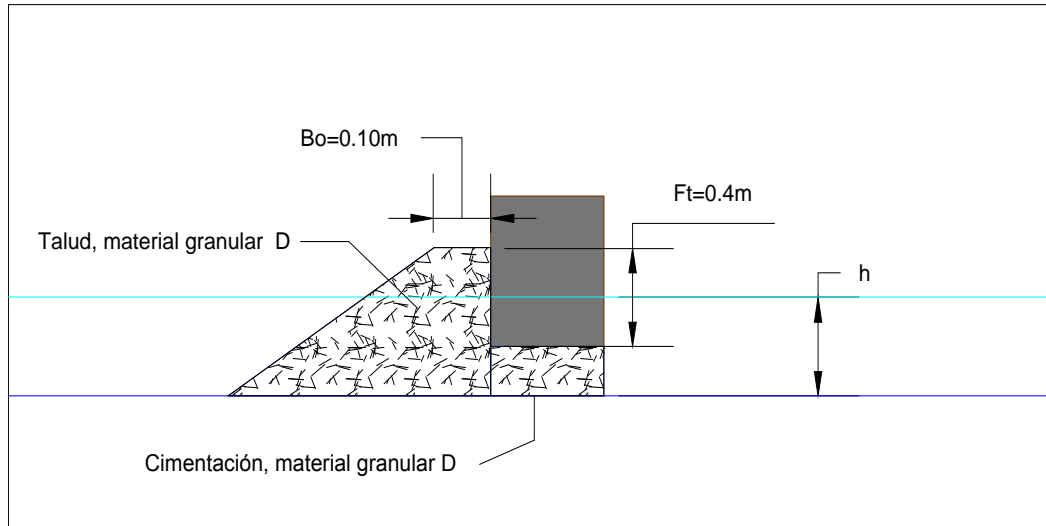


Figura 6.3: Geometría: Dique en talud con altura del talud sobre la cimentación $Ft = 0.4m$

6.2.2. Malla

La malla se genera a partir del módulo CORAL, que permite discretizar el dominio de trabajo para la propagación del oleaje y el análisis del flujo en el medio poroso. El diseño de la malla es un proceso que debe basarse en la experiencia y en el ensayo-error. Los criterios empleados para definir la malla siguen las siguientes pautas:

- Mínimo 10 celdas por altura de ola, por tanto, $\Delta y = \frac{h}{10} = \frac{0.04m}{10} = 0.004$
- Establecer un tamaño de celda uniforme para evitar errores numéricos debido a variaciones en las dimensiones de las celdas.
- Definir subzonas, dentro de la malla, donde el número de celdas a la izquierda y a la derecha asegure un buen anidamiento de las mismas; es decir, la posición del borde izquierdo de la subzona derecha debe coincidir con la posición del borde derecho de la subzona izquierda.
- Evitar diferencias grandes en el espaciado de la celda, a través de las subzonas y dentro de cada subzona. Por regla general, el espaciado de las celdas contiguas no se debe diferenciar en más del 10-20 %, siendo los ratios de celda deseables: $1 < \frac{\Delta x}{\Delta y} < 5$.

Finalmente, en el trabajo se ha definido una sola malla para todos los casos numéricos, cuyas características fundamentales describimos a continuación.

Características de la malla

Las dimensiones de la malla son $21\text{m} \times 1\text{m}$, que nos proporciona un dominio de trabajo similar a los ensayos experimentales realizados en el canal de oleaje.

Se ha dividido la malla en tres subzonas con un espaciado de las celdas de $\Delta x = 0.008$, $\Delta y = 0.004$ para la subzona 1 y 3, y un espaciado de $\Delta x = 0.006$, $\Delta y = 0.004$ para la subzona 2. Nos encontramos dentro del intervalo que hemos calificado como deseable para los ratios de celda $\frac{\Delta x}{\Delta y}$.

En la Figura 6.4 se observa la malla definida junto con la geometría del dique en talud.

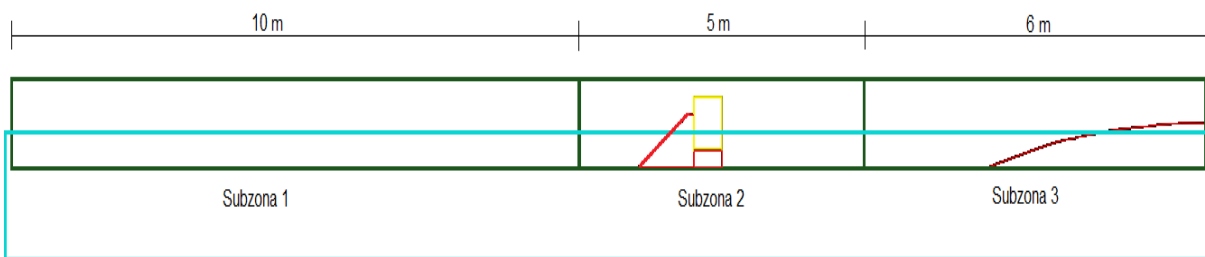


Figura 6.4: Malla del modelo numérico

Subzona 1

Esta submalla cubre la zona de generación del oleaje. Tiene una longitud de 10 metros con el objetivo de conseguir una propagación adecuada del oleaje; el número de celdas a la izquierda es de 625 y a la derecha de 1.

Subzona 2

Esta submalla abarca la geometría del dique en talud donde se produce la interacción del oleaje con la estructura. Requiere un mayor grado de resolución para poder recoger todos los procesos de transformación que tienen lugar. La submalla tiene una longitud de 5 metros y un número de celdas a la izquierda de 1 y a la derecha de 624.

Subzona 3

Por último, una tercera submalla abarca la zona final de propagación del oleaje, con una longitud de 6 metros y un número de celdas a la izquierda de 1 y a la derecha de 375.

Elementos de estudio

Para realizar una división adecuada de la malla, se deben ubicar previamente los elementos que forman el dique en talud, estos son: la cimentación, el cajón impermeable y el talud del dique. Con este fin, se establecen los elementos, definiendo sus coordenadas con la misma posición que tienen en el canal de oleaje del CEAMA y las dimensiones definidas anteriormente.

Adicionalmente, debemos hacer notar que las coordenadas del agua deben definirse fuera del dominio de trabajo, para evitar problemas de contorno. Véase Figura 6.4

La malla generada será la misma para cada caso numérico, variando únicamente las dimensiones del talud y características del material granular en función de la geometría del dique que se ensaye, es decir, según la altura del talud sobre la cimentación Ft .

Por último, el módulo CORAL permite definir las características de los elementos porosos que forman el dique en talud (cimentación y talud). En el apartado 6.2.4 de este capítulo, se describe con detalle la forma de establecer las características del medio poroso.

6.2.3. Condiciones de oleaje

Una vez definida la malla en el CORAL e importada al modelo IH-2VOF, se deben generar las condiciones de oleaje a las que están sometidos cada caso numérico del dique en talud objeto del estudio. Para ello, el modelo permite simular diferentes condiciones de oleaje: regular, irregular y onda solitaria. Los casos numéricos ensayados están sometidos a oleaje regular, variando los periodos T , con una altura de ola para cada periodo ensayado.

A continuación, se muestra un esquema de los datos de oleaje que se deben definir en el modelo, explicando más adelante cada uno de ellos, y junto a los comentarios que justifican la elección de los datos.

CONDICIONES DE OLEAJE

- **Series de oleaje:** Regular
- **H (m):** H_I experimental
- **fs (Hz):** 20
- **Fase:** $\frac{3\pi}{2}$
- **T (s):** [1.05, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5]
- **Tiempo de simulación (s):** T·50 + tiempo extra
- **Teoría:** Teoría Lineal

– Como se ha mencionado en repetidas ocasiones a lo largo del proyecto, cada configuración formada por una altura de talud sobre la cimentación Ft y un diámetro del material granular D , ha sido sometida a siete periodos de oleaje T : [1.05, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5] segundos. Véase **Capítulo 5: Ensayos experimentales, Tabla 5.2**.

– Para cada periodo ensayado, la altura de ola que se establece en las condiciones de oleaje proviene de los datos experimentales obtenidos por los sensores de nivel del canal de oleaje.

De todas las alturas de olas registradas a lo largo del canal, la que interesa en el modelo es la altura de ola incidente H_I .

– La frecuencia de muestreo de los sensores de nivel en el canal de oleaje es de 20 Hz; por tanto, se ha definido la misma frecuencia constante para los casos numéricos. En nuestro estudio, la *Fase* no se cambia, dejando la que da el modelo por defecto.

– El tiempo de simulación de las condiciones de oleaje se define en función de la duración de cada ensayo. Se requiere un periodo de medición que sea adecuado para que, al analizar la muestra, tenga un número representativo de olas para su tratamiento. Así pues, y de manera análoga los ensayos experimentales, se ha fijado un número mínimo de 50 olas, estableciendo una duración de: $T \cdot 50 + tiempo\ extra$ para conseguir el número representativo de olas fijado.

– Por último, se aplica Teoría Lineal ya que, como se expondrá más adelante, la obtención de los resultados del modelo y su posterior análisis se sustentan en aspectos de esta teoría.

Damos aquí un ejemplo de uno de los casos numéricos ensayados para apreciar el orden de magnitud de los parámetros definidos.

- Para el Caso: **Ft=0m, D=12mm y periodo T=1.5 segundos.**

CONDICIONES DE OLEAJE

- **Series de oleaje:** Regular
- **H (m):** 0.0289
- **fs (Hz):** 20
- **Fase:** $\frac{3\pi}{2}$
- **T (s):** 1.5
- **Tiempo de simulación (s):** 135
- **Teoría:** Teoría Lineal

Cabe señalar que para poder generar las condiciones de oleaje se debe activar la pala estática que proporciona el modelo IH-2VOF.

6.2.4. Características del medio poroso

Como ya hemos mencionado más arriba, a la hora de definir en el modelo los elementos que forman el dique en talud, se deben definir también las características del medio poroso presente en el talud y en la cimentación. Estos parámetros se definen en el módulo CORAL cuando se ubica la geometría dentro de la malla.

Se presenta un esquema de los parámetros del medio poroso que caracterizan los elementos del dique en talud, junto a la explicación de la elección de los datos.

PARÁMETROS DEL MEDIO POROSO

- **Porosidad:** Porosidad n del material granular
- **Coefficiente de fricción:** $f = \Phi(Ft)$
- **$D_{50}(m)$:** Diámetro característico del material granular

Recordemos que el modelo numérico permite estudiar la resistencia al flujo en el interior del medio poroso implementando un único coeficiente de fricción f . En nuestro trabajo, para cada geometría de dique en talud ensayada, se establecen los siguientes tres coeficientes de fricción:

- Para la menor altura del talud sobre la cimentación $Ft = 0$ m, se define un coeficiente del diagrama de fricción característico para dique mixto, estudiado por [Vílchez \(2014\)](#), Figura 2.8. La razón de elegir este coeficiente es que la geometría ensayada consiste en un dique con una berma baja de material granular, semejante a la tipología de dique mixto.
- Para la mayor altura del talud sobre la cimentación $Ft = 0.4$ m, se establece el coeficiente del diagrama de fricción característico para dique poroso, estudiado por [Pérez et al. \(2009\)](#), Figura 2.6. Para esta geometría, al ser la que mayor cantidad de material poroso tiene, parece adecuado definir el coeficiente de fricción del diagrama para dique poroso, por ser éste el que mejor se ajusta a este caso.
- Para la geometría intermedia $Ft = 0.2$ m, se ensaya un coeficiente medio entre el coeficiente de fricción para dique mixto y para dique poroso. Es decir, dado que se trata de un caso intermedio de los anteriores, el coeficiente de fricción establecido será también intermedio entre los coeficientes mixto y poroso.

Señalemos que, para cada periodo de oleaje y diámetro del material granular, existirá un coeficiente de fricción ensayado en el modelo numérico.

Por otra parte, se definen los mismos tipos de materiales granulares ensayados en los ensayos experimentales del canal de oleaje. Por tanto, existen cinco tipos de diámetros característicos del material granular D : 12mm, 26mm, 40mm, 52mm; cada uno de ellos con su correspondiente porosidad n . Véase **Capítulo 5: Ensayos experimentales, Tabla 5.1**.

De nuevo, para poder apreciar mejor el orden de magnitud de los parámetros que se implementan en el modelo, con el fin de configurar los casos numéricos, se muestra un ejemplo de las características del medio poroso para uno de los casos numéricos ensayados.

- Para el Caso: **$Ft=0m$, $D=12mm$ y periodo $T=1.5$ segundos.**

PARÁMETROS DEL MEDIO POROSO

- **Porosidad:** 0.391
- **Coefficiente de fricción:** 4.345
- **$D_{50}(m)$:** 0.012

6.2.5. Simulación de parámetros

El modelo numérico permite la simulación de varios parámetros. En nuestro caso, interesa conseguir los registros de superficie libre a lo largo del dominio definido y, de este modo, poder comparar el mismo tipo de datos entre los ensayos experimentales y los casos numéricos. Para este objetivo, el modelo posibilita la ubicación de sensores de nivel que medirán las variaciones de la superficie libre. Las posiciones de cada sensor se especifican introduciendo las coordenadas dentro del dominio de estudio.

Siguiendo el mismo esquema de los ensayos experimentales, se colocan 8 sensores de nivel: dos grupos de tres y cuatro sensores a barlomar, además de un sensor a sotamar del dique, que permiten obtener la medida de la reflexión y la transmisión, respectivamente. Como ya se indicó antes al hablar de las condiciones de oleaje, la frecuencia de muestreo de los sensores es de 20 Hz.

Nótese también que se disponen cuatro sensores equidistantes para medir la superficie libre a lo largo del talud: desde el pie del talud hasta la pared del cajón. La posición de estos sensores cambia según lo haga la geometría de dique ensayada, es decir, en función de Ft .

En lo que sigue, se muestran unas capturas del modelo que reflejan las posiciones de los sensores de nivel según la geometría de dique ensayada.

6. Modelo Numérico

- Para $Ft = 0m$: Dique con berma baja de material granular.

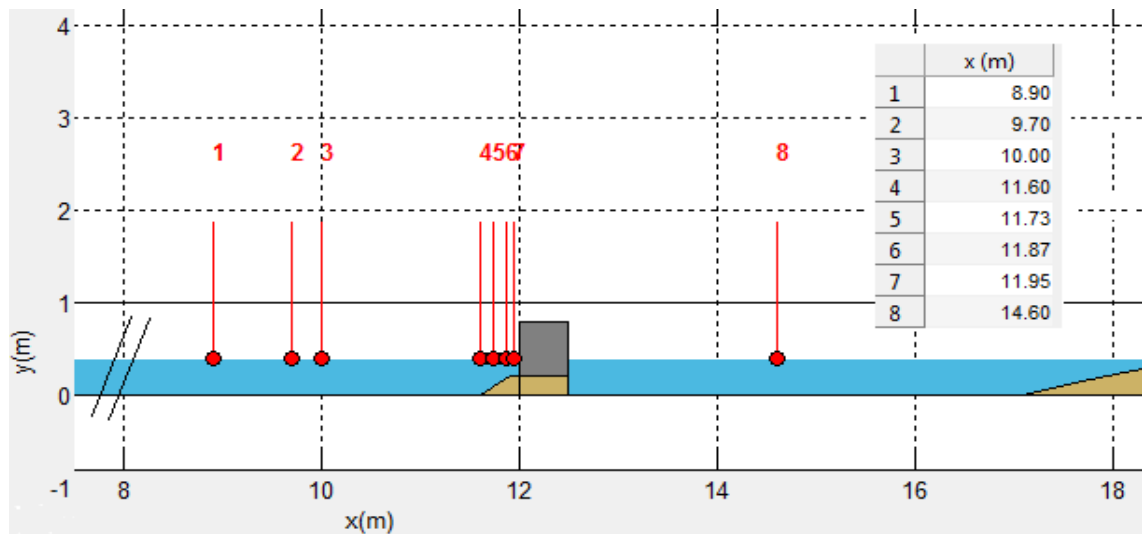


Figura 6.5: Posición sensores de nivel, Geometría $Ft = 0m$

- Para $Ft = 0.2m$: Dique con berma alta de material granular.

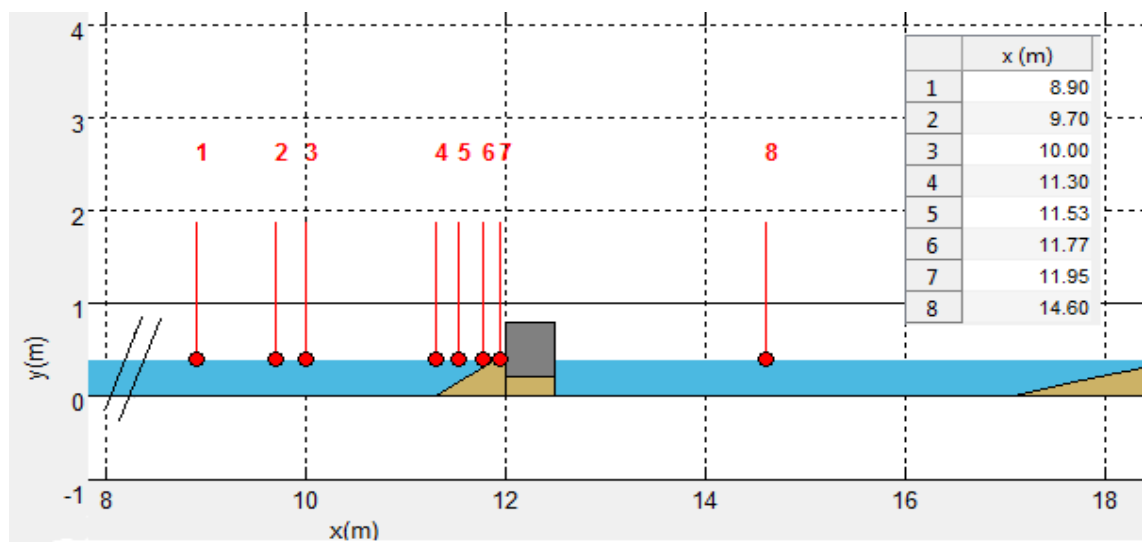


Figura 6.6: Posición sensores de nivel, Geometría $Ft = 0.2m$

- Para $Ft = 0.4m$: Dique en talud.

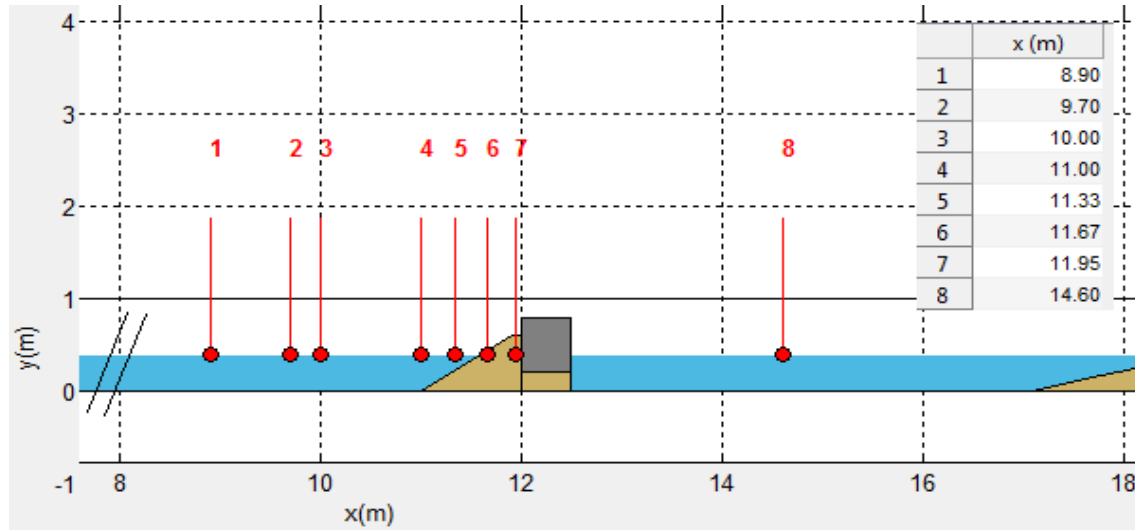


Figura 6.7: Posición sensores de nivel, Geometría $Ft = 0.4m$

6.3. Resultados del modelo

Como ya hemos comentado, a partir de las mediciones de los sensores de nivel, el modelo numérico proporciona todas las variaciones de la superficie libre. Estos datos los almacena el modelo y, posteriormente, se analizan para obtener los resultados del modelo que, a su vez, se compararán con los ensayos experimentales. En concreto, el análisis de las variaciones de la superficie libre se realiza por medio de una rutina programada en Matlab, a la que ya nos hemos referido en el **Capítulo 3. Metodología**.

En consecuencia, los resultados del modelo para cada caso numérico ensayado se corresponden con:

- La altura de ola indicente $H_{I\,mod}$ a partir de los sensores de nivel S1, S2 y S3, y el coeficiente de reflexión $K_{R\,mod}$ y su fase ϕ obtenidos mediante la aplicación del Método de Baquerizo (1995).
- Altura de ola total a pie de dique $H_{pie\,mod}$ con el sensor S4, ascenso del oleaje sobre la pared vertical $H_{pared\,mod}$ con el sensor S7 y ascensos del oleaje en el talud a partir de las medidas de los sensores de nivel S5, S6.

6. Modelo Numérico

- Altura de ola transmitida $H_{T_{mod}}$ a partir de los registros del sensor de nivel S8.
- Coeficiente de transmisión $K_{T_{mod}}$, determinado a partir del cociente entre la altura de ola transmitida y la altura de ola incidente: $K_{T_{mod}} = H_{T_{mod}}/H_{I_{mod}}$.

Recordemos que la obtención de estos coeficientes de reflexión ya citados, se basa en la transformación de energía que sufre el oleaje incidente en un volumen de control que contenga la sección del dique:

$$K_R^2 + K_T^2 + D_* = 1 \quad (6.4)$$

Por otra parte, como ya tuvimos ocasión de señalar en la presentación de los conceptos teóricos y el análisis de nuevas líneas de investigación, un resultado más del modelo, necesario para estudiar el flujo en el medio poroso, es la energía total disipada.

- La energía total disipada se ha obtenido mediante la ecuación 6.5 (energía total disipada en el volumen de control), sustituyendo los valores del coeficiente de reflexión y transmisión del modelo:

$$D_* = \frac{D'_{*mod}}{\frac{1}{8} \cdot \rho_w \cdot g \cdot H_{I_{mod}}^2 \cdot C_g} = 1 - K_{R_{mod}}^2 - K_{T_{mod}}^2 \quad (6.5)$$

Los resultados del modelo se almacenan y guardan, para cada caso numérico, en un único archivo que, posteriormente, se compararán con los resultados experimentales para conseguir el objetivo propuesto.

6.4. Análisis de Resultados

En este apartado se describe el análisis de los ensayos experimentales y numéricos obtenidos del canal de oleaje y del modelo IH-2VOF, respectivamente. El objetivo del análisis es comprobar la validez de los resultados numéricos y fijar una metodología para obtener el coeficiente de fricción f . Esto permitirá abordar a continuación la consecución de unos de los objetivos principales propuestos: Determinar el diagrama de fricción para dique en talud. Para llevar a cabo este proceso de análisis se realizan las siguientes etapas:

- Comparación de los resultados experimentales y numéricos.
- Ajuste de los coeficientes de reflexión y transmisión.
- Minimización de errores.

6.4.1. Comparación de Resultados

Se comparan los datos experimentales y numéricos para comprobar y verificar que los casos ensayados se han diseñado correctamente y las hipótesis establecidas son ciertas. En tal caso, podemos afirmar que la metodología seguida para analizar el flujo en el interior del medio poroso es correcta.

Para cada caso, según la geometría de dique Ft y diámetro del material granular D , se representan los resultados numéricos de todos los periodos T ensayados frente los experimentales. En concreto, de todos los parámetros que proporciona el modelo y los ensayos experimentales, se han comparado los resultados correspondientes a:

– La altura de ola en la pared del dique H_{pared} : El análisis de este resultado es importante ya que se emplea, en general, para el diseño de los diques a la hora de fijar las dimensiones y cotas sobre la cimentación, con el objetivo de conseguir una estructura irrebalsable.

– Los coeficientes de reflexión K_R y transmisión K_T : La obtención de estos coeficientes se basa en el balance de energía que se produce en un volumen de control que contiene la sección del dique. Analizar esta disipación de energía, en relación con las fuerzas resistivas, permite conocer el flujo en el interior del medio poroso.

En lo que sigue, se muestran las comparaciones de los resultados numéricos y experimentales para un mismo tipo de diámetro del material granular $D=12$ mm, y para todos los periodos de oleaje ensayados T : [1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos agrupados según las tres geometrías de dique definidas, acompañando una explicación que justifica tales resultados. Recordar que para cada geometría de dique se ha ensayado un coeficiente de fricción f distinto definido en el **Apartado 1.2.4. Características del medio poroso.**

6.4.1.1. Geometría de dique con $Ft=0m$

– *Altura de ola en la pared del dique H_{pared} .*

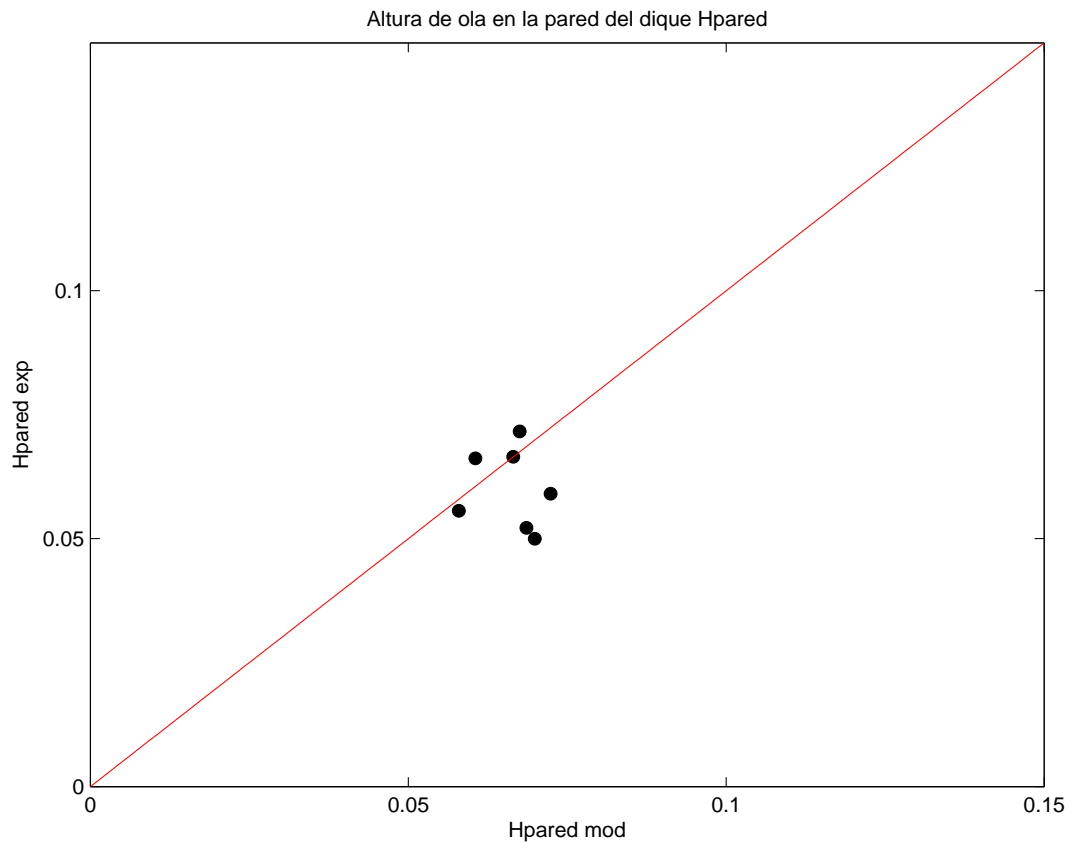


Figura 6.8: Caso $D=12mm$ y $Ft=0m$: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos T : [1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos

En la Figura 6.8 se observa que la comparación de los resultados numéricos y experimentales de la altura de ola en la pared del dique es bastante satisfactoria, ya que los datos relativos a cada periodo T de oleaje se aproximan bastante a la recta de 45° . Por otra parte, la altura de ola en la pared del dique H_{pared} toma valores que oscilan entre [0.05-0.07] m; lo cual resulta razonable ya que la altura de ola incidente ensayada se encuentra entorno a $H_I = 0.04$ m y la reflexión es casi total como se observa en la siguiente Figura 6.9.

La representación de los coeficientes de reflexión K_R y transmisión K_T se hace entre [0-1], siendo un coeficiente de 0: reflexión o transmisión nula, y un coeficiente de 1: reflexión o transmisión total.

– Coeficiente de reflexión K_R .

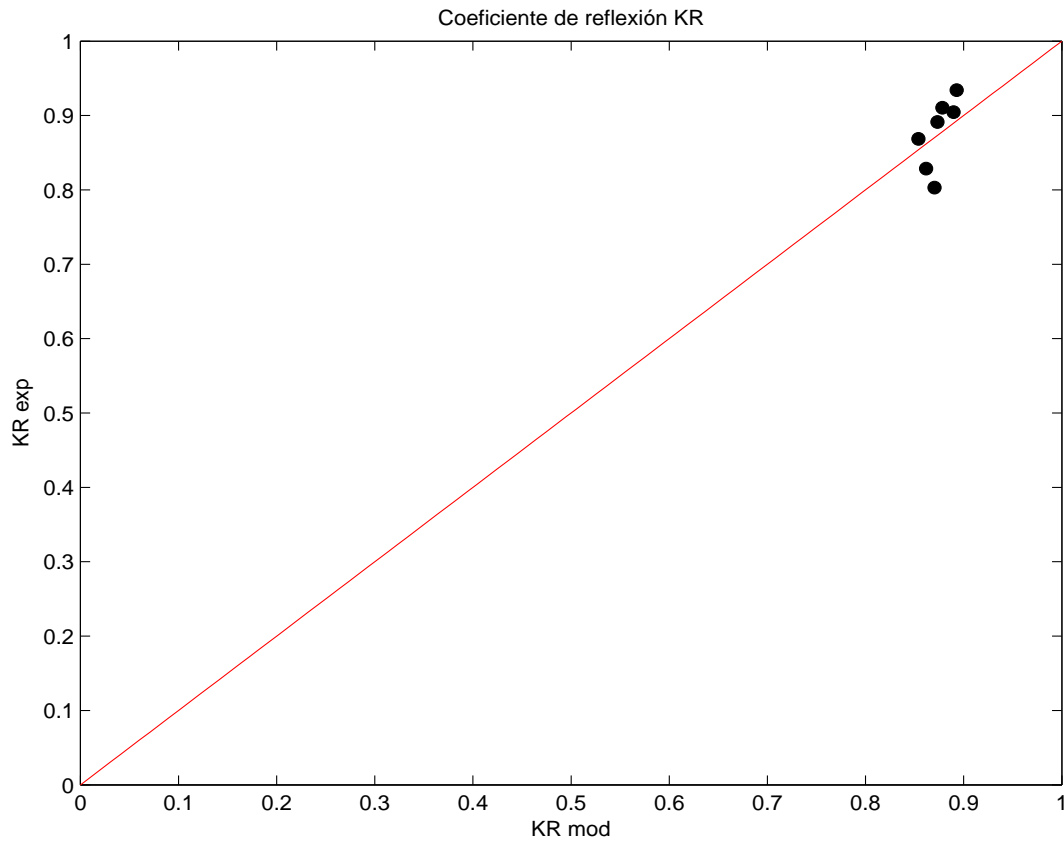


Figura 6.9: Caso $D=12\text{mm}$ y $Ft=0\text{m}$: Comparación $K_{T\text{ mod}}$ vs $K_{T\text{ exp}}$ para todos los periodos T : [1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos

Para la geometría de dique con una berma baja de material granular $Ft = 0\text{ m}$, la reflexión del oleaje es prácticamente total, tomando el coeficiente de reflexión K_R valores cercanos a 1. Este resultado es de esperar ya que al ser la berma del dique baja, el cajón vertical impermeable refleja la mayor parte de la energía incidente debido al cambio brusco de las propiedades geométricas del medio.

6. Modelo Numérico

- Coeficiente de transmisión K_T .

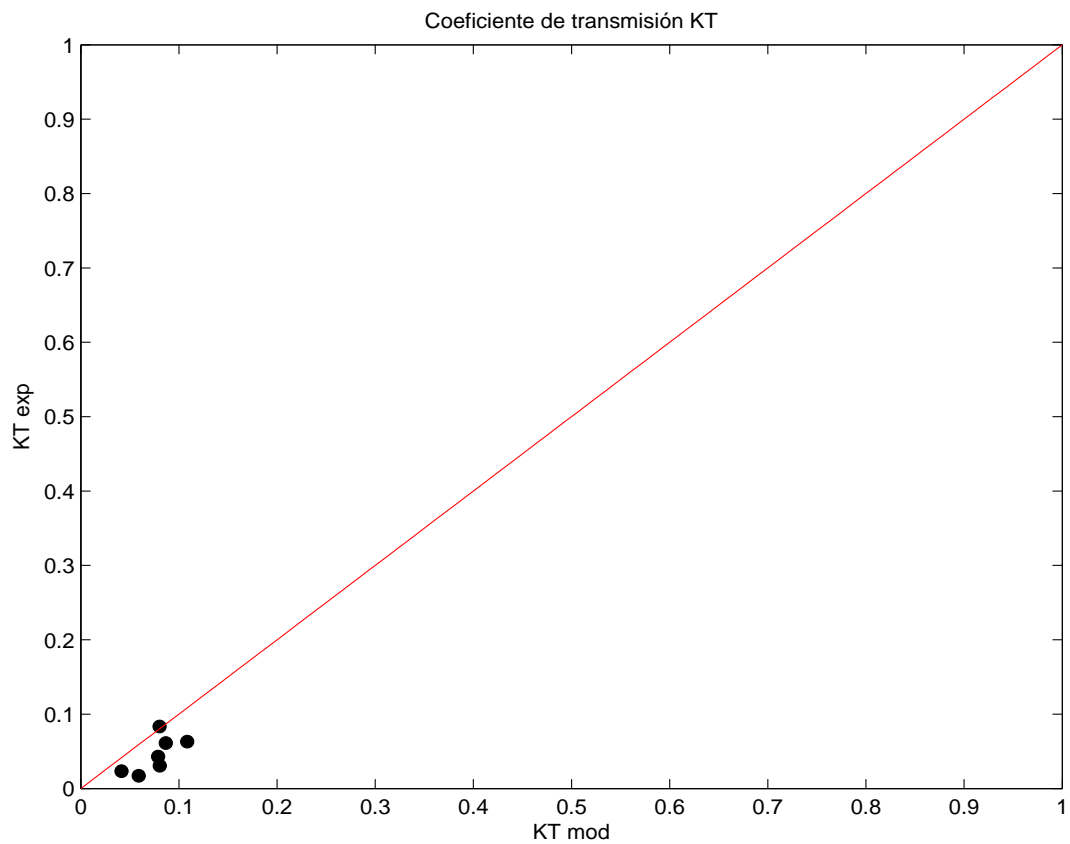


Figura 6.10: Caso $D=12\text{mm}$ y $F_t=0\text{m}$: Comparación $K_{T \text{ mod}}$ vs $K_{T \text{ exp}}$ para todos los periodos T : [1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos

Al contrario que con la reflexión, en este caso, el coeficiente de transmisión K_T toma valores cercanos a 0, lo que significa una escasa transmisión del oleaje incidente debido a la existencia de un obstáculo como es el dique, y la poca cantidad de material granular presente en la geometría de dique ensayada.

Se puede concluir que para un dique con berma baja de material granular con un diámetro característico pequeño, la energía incidente se distribuye principalmente en **energía reflejada** y transferida hacia el mar.

6.4.1.2. Geometría de dique con $Ft=0.2m$

– Altura de ola en la pared del dique H_{pared} .

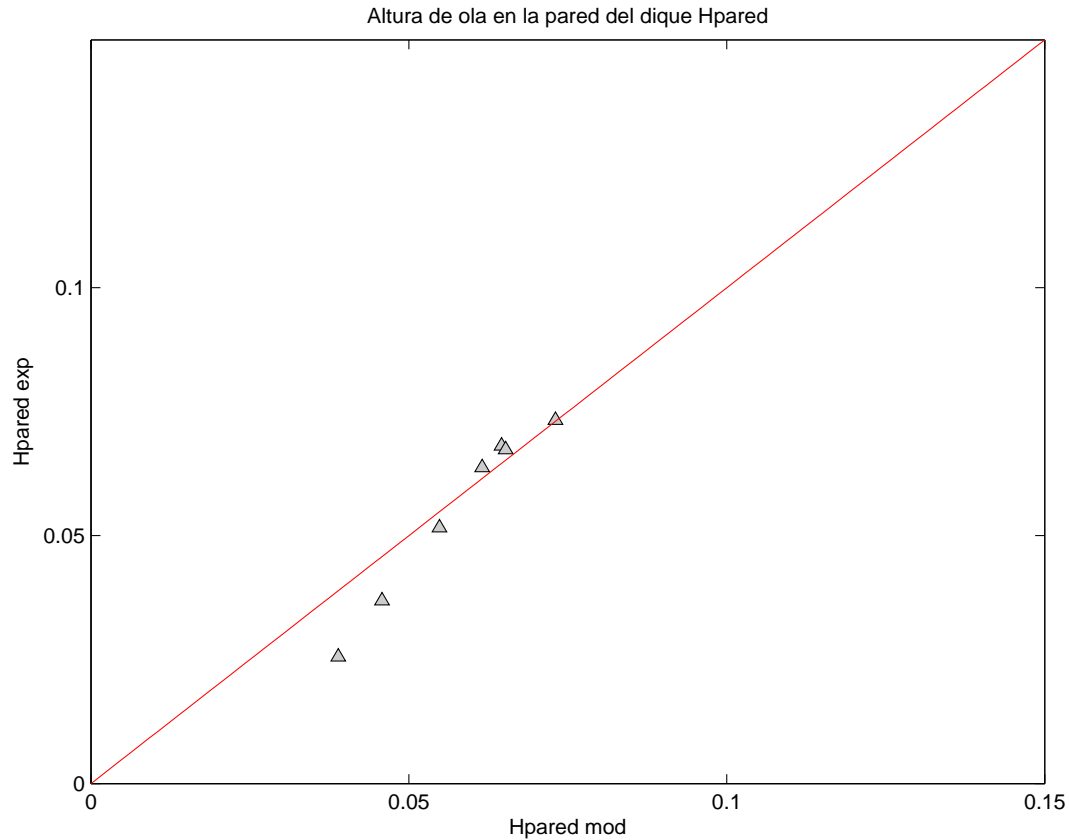


Figura 6.11: Caso $D=12mm$ y $Ft=0.2m$: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

Lo mismo que sucede en el caso anterior, los resultados experimentales y numéricos se ajustan bastante bien a la recta de 45° ; es decir, las alturas de ola experimentales y numéricas prácticamente coinciden, tomando valores acordes con la altura de ola incidente H_I generada.

6. Modelo Numérico

– Coeficiente de reflexión K_R .

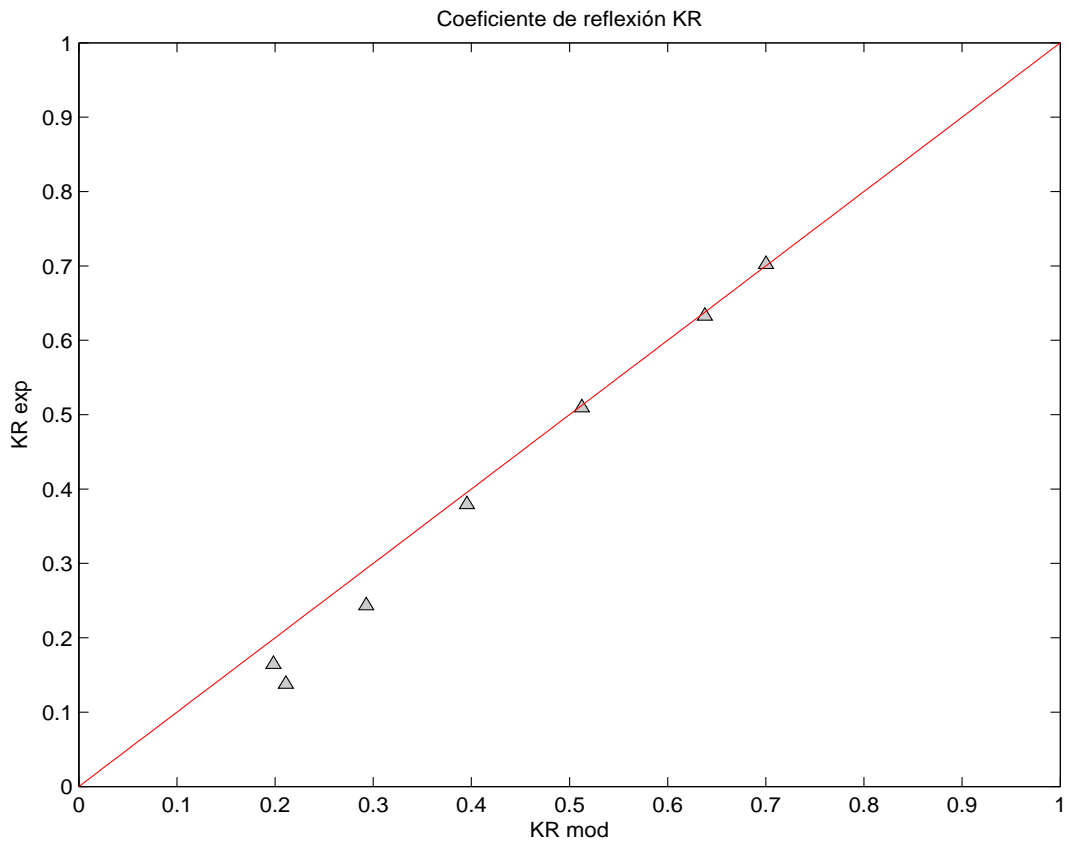


Figura 6.12: Caso $D=12\text{mm}$ y $Ft=0.2\text{m}$: Comparación $K_{R\text{mod}}$ vs $K_{R\text{exp}}$ para todos los periodos T : [1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos

Como se observa en la Figura 6.12, para un dique con una altura del talud sobre la cimentación intermedia $Ft = 0.2\text{ m}$, la reflexión del oleaje incidente disminuye, tomando valores altos para las ondas cortas, es decir con periodos de oleaje T bajos. La razón por la que se dan estos coeficientes de reflexión es que, al aumentar la berma del dique, comienza a producirse la rotura del oleaje incidente al colisionar con la estructura, por lo que la energía incidente se distribuye en energía reflejada y disipada por la rotura del oleaje sobre la berma del dique y por fricción a través del medio poroso.

Nótese que los valores de los coeficientes de reflexión del modelo $K_{R\text{mod}}$, coinciden para casi todos los periodos de oleaje ensayados con los coeficientes experimentales $K_{R\text{exp}}$.

– Coeficiente de transmisión K_T .

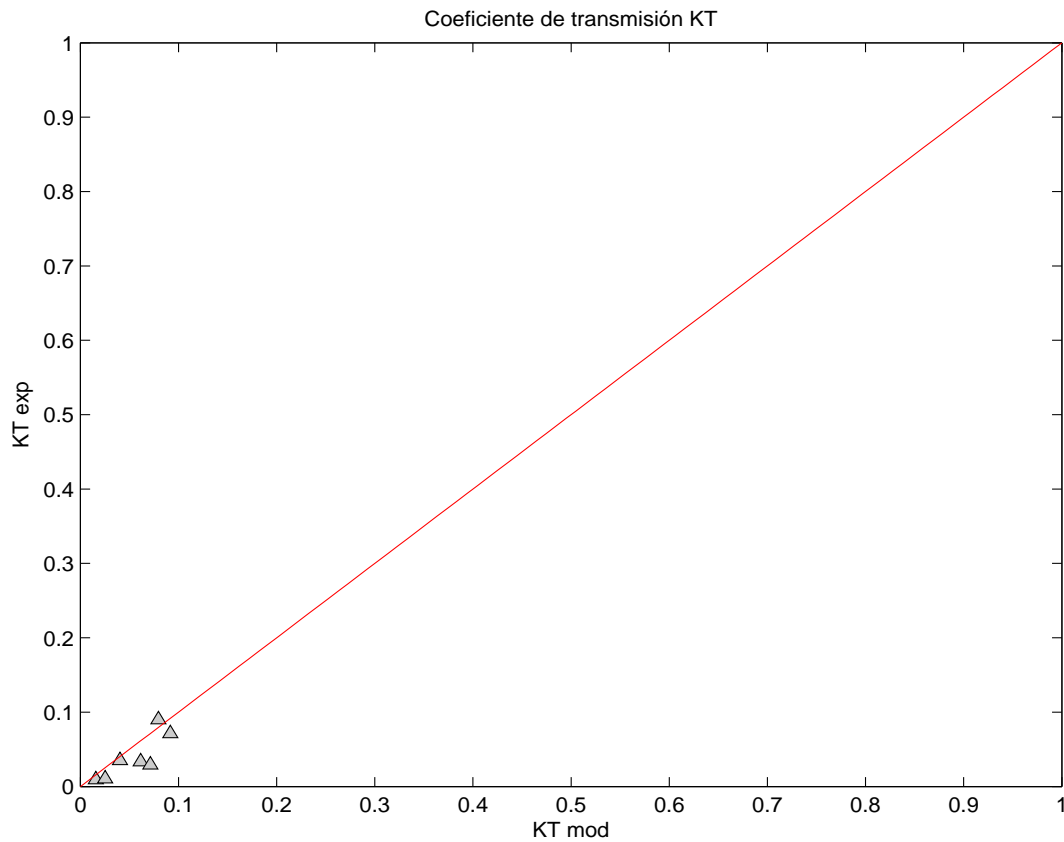


Figura 6.13: Caso $D=12\text{mm}$ y $Ft=0.2\text{m}$: Comparación $K_{T \text{ mod}}$ vs $K_{T \text{ exp}}$ para todos los periodos T : [1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos

Los valores de los coeficientes de transmisión experimentales y numéricos son, como en el caso anterior, bajos, tomando valores próximos a cero. El motivo de estos resultados es el mismo que para una berma baja de material granular $Ft = 0 \text{ m}$; es decir, a pesar de que aumente la porosidad en el medio, la energía incidente se transforma principalmente en energía reflejada y disipada, ya que la presencia de la estructura dificulta la propagación del oleaje a través de la misma.

Por otro lado, se puede observar que los valores experimentales y numéricos para cada periodo de oleaje ensayado son prácticamente iguales.

Conviene hacer notar como en este caso, al aumentar la altura del talud sobre la cimentación Ft , la energía incidente comienza a transformarse una parte en **energía disipada** por la rotura del oleaje y otra parte en **energía reflejada**; lo que se traduce en baja capacidad de propagación del oleaje a sotamar del dique.

6.4.1.3. Geometría de dique con Ft=0.4m

Para exponer una representación gráfica de cada geometría de dique ensayada y reflejar las variaciones que se producen al ir aumentando la altura del talud sobre la cimentación del dique Ft , se presenta a continuación la comparación de los resultados para la geometría de dique $Ft=0.4m$.

Se observa en las Figuras 6.14-6.16 que los resultados experimentales y numéricos del caso $Ft = 0.4 m$, tanto para la altura de ola en la pared del dique H_{pared} , como para los coeficientes de reflexión K_R y transmisión K_T , son similares a las geometrías de dique anteriormente expuestas. Además, siguiendo el mismo comportamiento, los valores del modelo numérico para cada periodo de oleaje ensayado son similares a los experimentales.

– *Altura de ola en la pared del dique H_{pared} .*

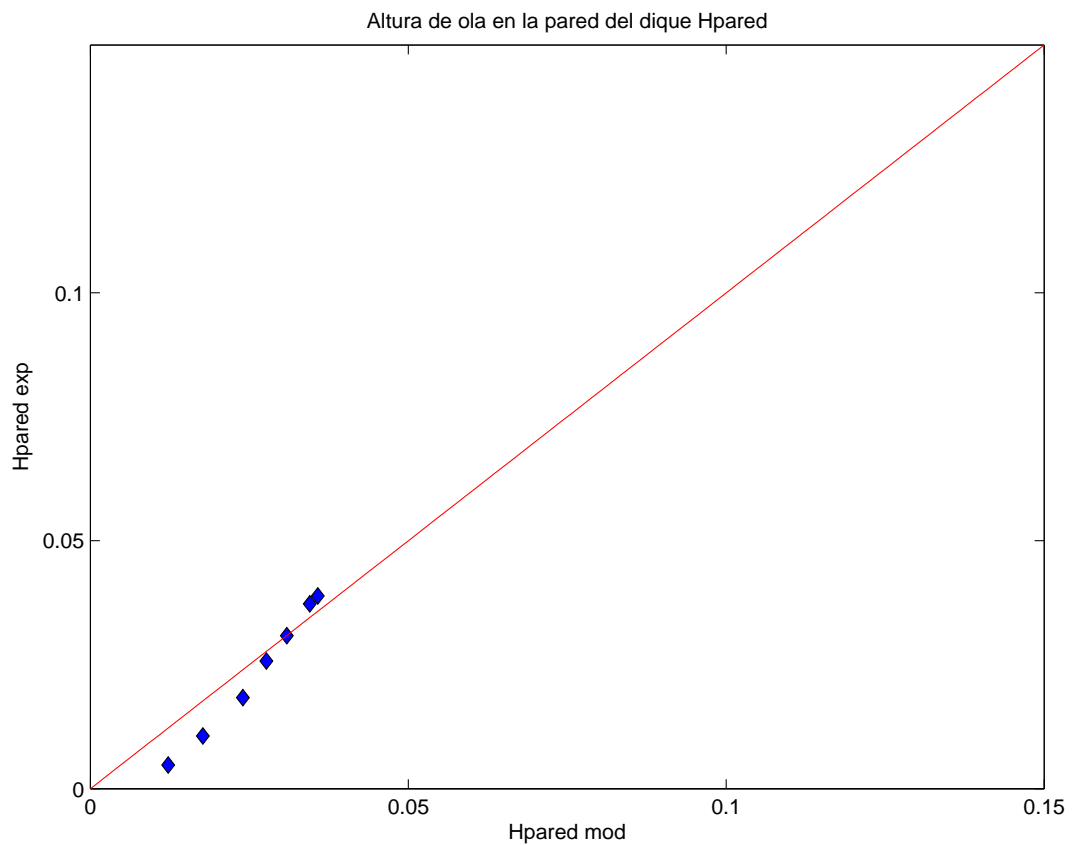


Figura 6.14: Caso $D=12mm$ y $Ft=0.4m$: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

– Coeficiente de reflexión K_R .

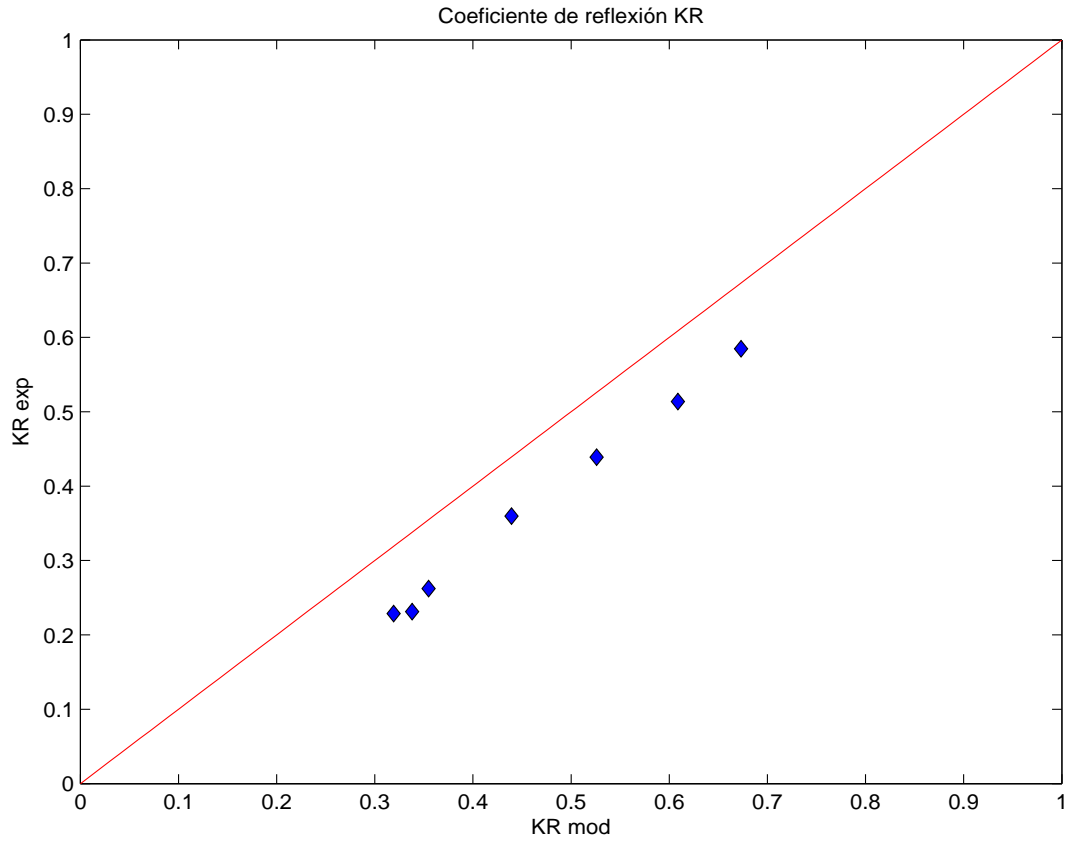


Figura 6.15: Caso $D=12\text{mm}$ y $Ft=0.4\text{m}$: Comparación $K_{T\text{ mod}}$ vs $K_{T\text{ exp}}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

Cabe señalar que, como se refleja en la Figura 6.15, la diferencia fundamental respecto a las otras geometrías de dique ensayadas se encuentra en que, al aumentar la altura del talud $Ft = 0.4\text{ m}$, el oleaje incidente rompe siempre sobre el talud del dique, transformándose gran parte de la energía incidente en **energía disipada** y una menor parte en **energía reflejada** con coeficientes de reflexión menores que la geometría $Ft = 0.2\text{ m}$.

– Coeficiente de transmisión K_T .

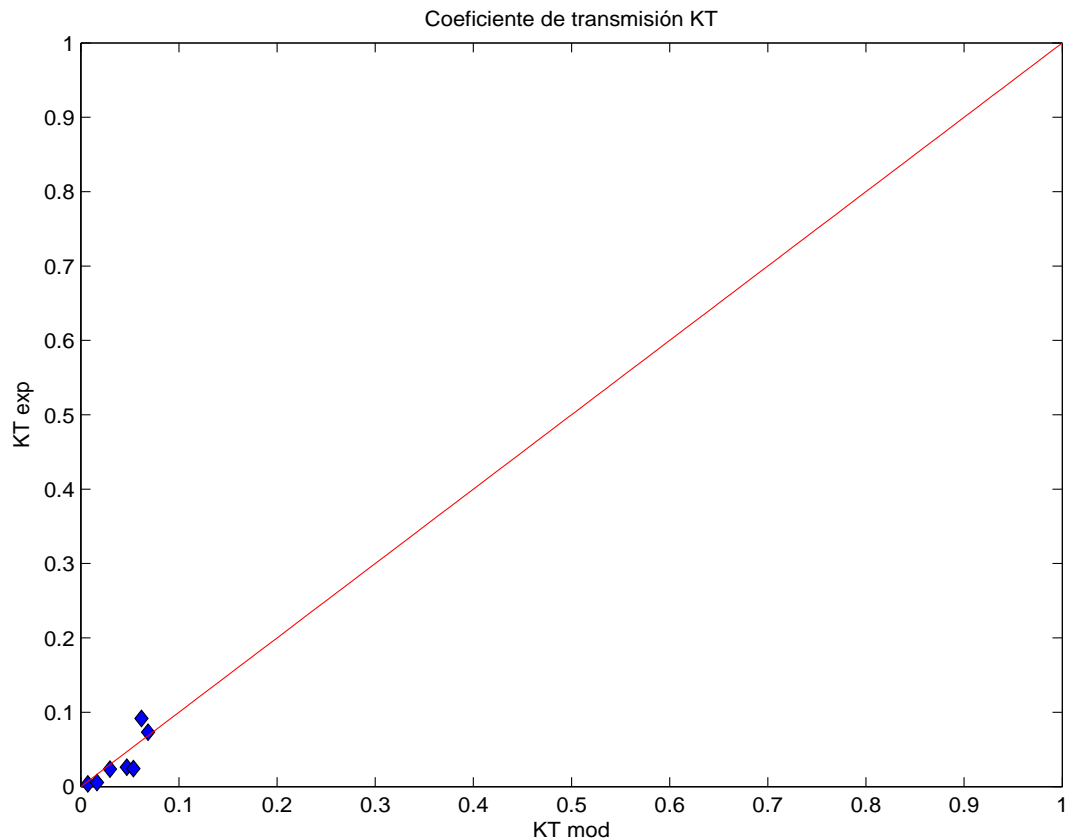


Figura 6.16: Caso $D=12\text{mm}$ y $Ft=0.4\text{m}$: Comparación $K_{T \text{ mod}}$ vs $K_{T \text{ exp}}$ para todos los periodos T : [1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos

Resumen

El análisis comparado de los resultados para las 84 configuraciones ensayadas según la geometría del dique Ft , diámetro del material granular D y periodo de oleaje T , concluye que los datos proporcionados por el modelo numérico se aproximan a los datos obtenidos en los ensayos experimentales, siendo para algunos casos el mismo valor. Esto prueba la validez de los resultados y el correcto diseño de los casos ensayados e hipótesis establecidas.

Además, se observa que para los tres tipos de geometría de dique, la mayor parte de la energía incidente se distribuye en energía reflejada debido a la presencia de la obra marítima, y en energía disipada por la rotura del oleaje incidente. A medida que aumenta la altura del talud sobre la cimentación Ft , disminuye la reflexión del oleaje y aumenta la disipación por rotura de las olas sobre el talud del dique y por fricción a través del medio poroso.

Por otro parte, apenas existe propagación del oleaje a sotamar del dique, obteniéndose coeficientes de transmisión próximos a cero. Tales coeficientes son mayores para las ondas largas que para las que tienen un periodo corto debido a su mayor relación respecto a la anchura del dique, y por lo tanto con más capacidad de propagarse a sotamar.

En el **Apéndice B: Comparación de resultados numéricos y experimentales**, se presentan las gráficas del resto de casos ensayados, observándose el mismo comportamiento de propagación del oleaje y distribución de la energía incidente que para el caso presentado anteriormente. Nótese en los datos aportados en el citado Apéndice que, a medida que aumenta la porosidad del medio, disminuyen los coeficientes de reflexión y aumentan los de transmisión, esto es debido a la presencia del medio poroso que ayuda a la propagación del oleaje a través del dique.

6.4.2. Ajuste de resultados

Una vez comprobada la validez de los resultados proporcionados por el modelo numérico, se procede a obtener el mejor ajuste para los coeficientes de reflexión K_{Rmod} y de transmisión K_{Tmod} , que permita, comparando con el coeficiente experimental que corresponda en cada caso, minimizar el error conjunto de estos coeficientes. Con ello, se consigue el coeficiente de fricción característico para cada configuración ensayada con el objetivo de obtener el diagrama de fricción para dique en talud.

Para las 84 configuraciones ensayadas según la geometría del dique Ft , diámetro del material granular D y periodo de oleaje T , se ha realizado el ajuste de los coeficientes de reflexión y transmisión proporcionados por el modelo numérico.

Con el fin de realizar un ajuste correcto, se han ensayado nuevos casos numéricos implementando coeficientes de fricción superiores e inferiores al coeficiente inicial ensayado con los mismos parámetros de Ft y D . De este modo, se consigue un rango de coeficientes de fricción f que permitan obtener funciones de aproximación a los valores de los coeficientes de reflexión K_{Rmod} y transmisión K_{Tmod} .

Ajuste del coeficiente de reflexión K_R

Analizando los valores de los coeficientes de reflexión K_{Rmod} para cada caso numérico ensayado, se observa que estos siguen una tendencia creciente con el coeficiente de fricción f correspondiente en su caso. Parece lógico que el comportamiento de estos valores sea creciente ya que a mayor coeficiente de fricción, mayor es la resistencia del flujo a través del medio poroso y, por tanto, el oleaje incidente es reflejado y devuelto hacia el mar.

Para conseguir un ajuste adecuado, se ha utilizado una función polinómica de segundo grado creciente en todo el dominio definido para el rango de valores de los coeficientes de fricción f , dada por la ecuación:

$$K_{Rmod}(f) = a_1 \cdot f^2 + a_2 \cdot f + a_3 \quad (6.6)$$

Entonces, determinando los coeficientes a_i de la función polinómica se obtiene el mejor ajuste para estos valores.

6. Modelo Numérico

Para ilustrar el ajuste que se ha realizado con los coeficientes de reflexión del modelo numérico, se muestra a continuación un ejemplo de un caso ensayado, Figura 6.17.

- Para $Ft=0m$, $D=12mm$ y $T=1.5$ segundos.

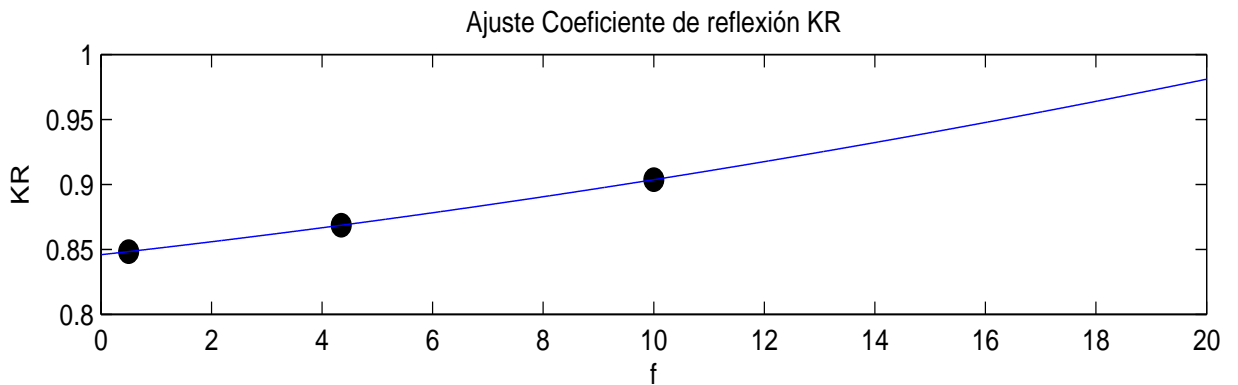


Figura 6.17: Caso $Ft=0m$, $D=12mm$ y $T=1.5$ segundos: Ajuste del coeficiente de reflexión K_R .

Ajuste del coeficiente de transmisión K_T

Al contrario que en el coeficiente de reflexión, los datos de los coeficientes de transmisión proporcionados por el modelo $K_{T\ mod}$ disminuyen conforme aumenta el coeficiente de fricción f . La explicación de este comportamiento es la misma que la expuesta para el coeficiente de reflexión: a menor coeficiente de fricción existe menos resistencia del flujo a través del medio poroso, por lo que el oleaje incidente tiene mayor capacidad de propagarse a sotamar del dique.

La función que mejor aproxima el comportamiento de los coeficientes de transmisión es una función exponencial decreciente para todo el rango de coeficientes de fricción f correspondientes, esta es:

$$K_{T\ mod}(f) = b_1 \cdot \exp(f)^{b_2} \quad (6.7)$$

De nuevo, determinando los coeficientes b_i se consigue el mejor ajuste para los valores que toman los coeficientes de transmisión correspondientes a cada caso ensayado.

A continuación se muestra un ejemplo de la función exponencial que ajusta el coeficiente de transmisión del modelo numérico, Figura 6.18.

- Para $Ft=0m$, $D=12mm$ y $T=1.5$ segundos.

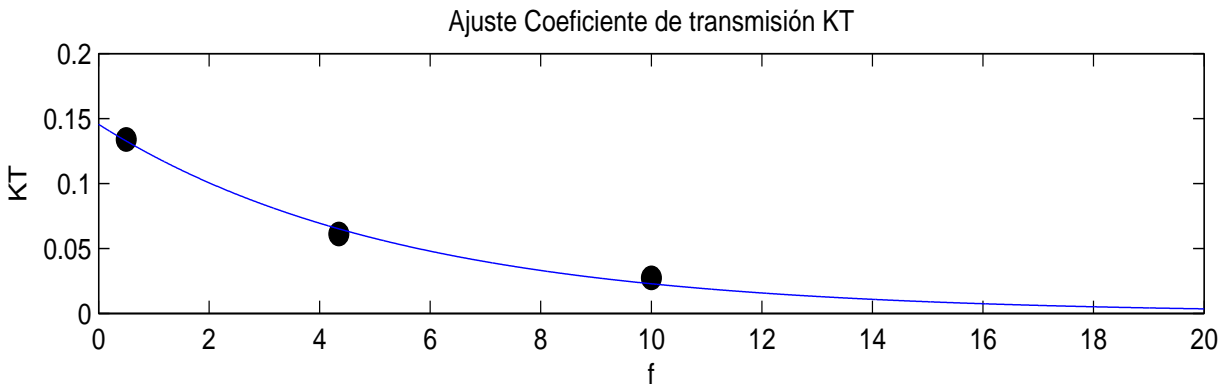


Figura 6.18: Caso $Ft=0m$, $D=12mm$ y $T=1.5$ segundos: Ajuste del coeficiente de transmisión K_T .

6.4.3. Minimización de errores

Una vez realizado el ajuste de los coeficientes de reflexión y transmisión, para un rango de valores del coeficiente de fricción $f : [0 - 20]$, se comparan los coeficientes numéricos con los experimentales correspondientes al caso ensayado, y se minimiza el **error conjunto** dado por: 1) el error entre el coeficiente de transmisión experimental y numérico; y 2) el error entre el coeficiente de reflexión experimental y numérico:

$$\epsilon^2 = \epsilon_{K_T}^2 + \epsilon_{K_R}^2 \quad (6.8)$$

Siendo los valores del:

- Error del coeficiente de transmisión:

$$\epsilon_{K_T}^2 = \frac{(K_{T\ exp} - K_{T\ mod})^2}{K_{T\ exp}^2} \quad (6.9)$$

- Error del coeficiente de reflexión:

$$\epsilon_{K_R}^2 = \frac{(K_{R\ exp} - K_{R\ mod})^2}{K_{R\ exp}^2} \quad (6.10)$$

De nuevo, para poder apreciar el orden de magnitud de los errores obtenidos para cada caso ensayado según la geometría del dique Ft , diámetro del material granular D y periodo de oleaje T , se muestra un ejemplo de la minimización del error conjunto de los coeficientes de reflexión y transmisión.

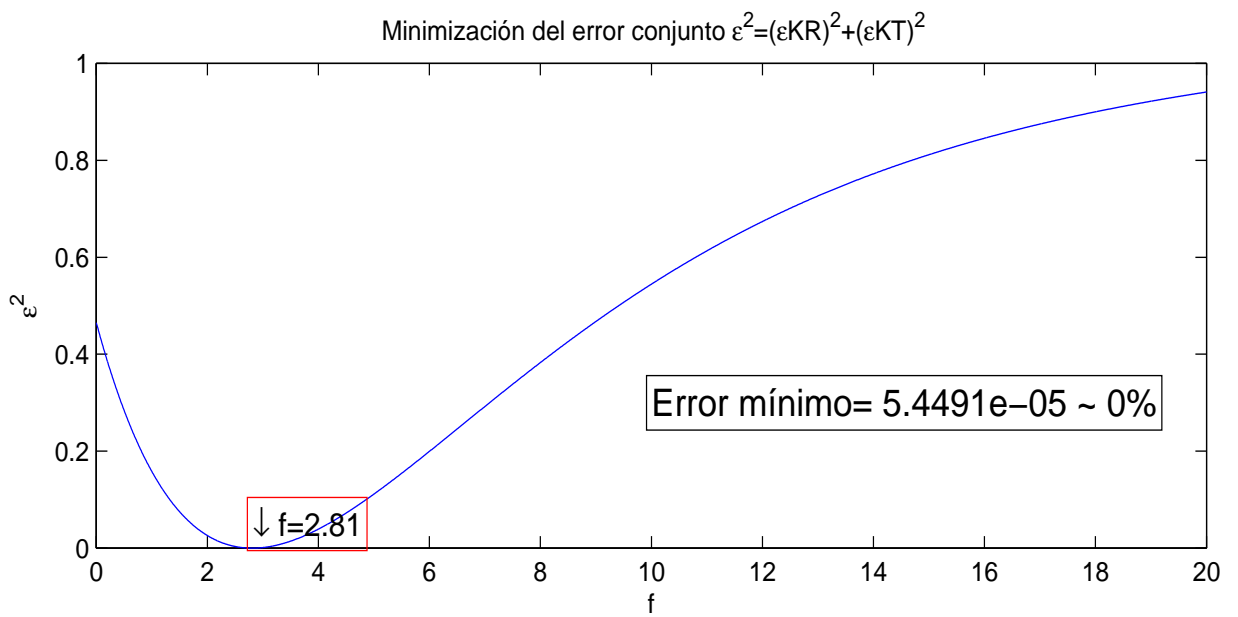


Figura 6.19: Caso $Ft=0m$, $D=12mm$ y $T=1.5$ segundos: Minimización del error conjunto ϵ^2 de los coeficientes de reflexión y transmisión.

- Para $Ft=0m$, $D=12mm$ y $T=1.5$ segundos.

El coeficiente de fricción correspondiente al error mínimo de $\epsilon^2 = \epsilon_{K_T}^2 + \epsilon_{K_R}^2$ será el **coeficiente de fricción característico f_c** para el caso ensayado y permitirá reducir los problemas relativos al *efecto escala* a la hora de definir el diseño de los diques en talud.

Capítulo 7

Diagrama de fricción para dique en talud

En este capítulo se presenta el resultado final de uno de los objetivos principales del proyecto: El diagrama de fricción característico para dique en talud. Como se ha mencionado al inicio del proyecto, a la hora de diseñar un dique se deben conocer las interacciones producidas entre el oleaje y la estructura. Mediante modelos realizados en los ensayos de laboratorio a escala reducida se puede analizar esta interacción. Sin embargo, el escalado del modelo en términos de porosidad no se conserva lo que modifica la distribución de energía del oleaje al incidir sobre el dique. Este hecho se conoce como *efecto escala* y modifica el comportamiento global del dique.

7.1. Resultados

Al estudiar el flujo a través del medio poroso y al analizar los resultados proporcionados por los ensayos experimentales y los modelos numéricos, se determina que el coeficiente de fricción característico depende de las siguientes variables geométricas:

$$fc = \Psi(Dk, \frac{Ft}{h}) \quad (7.1)$$

Donde D es el diámetro del material granular, k es el número de onda, Ft la altura del talud sobre la cimentación y h la profundidad del agua constante e igual a $h = 0.4$ m.

Los resultados obtenidos por [Pérez et al. \(2009\)](#) para dique poroso y [Vílchez \(2014\)](#) para dique mixto, y a partir de los resultados obtenidos en este proyecto, han demostrado que el coeficiente de fricción para dique en talud depende principalmente del monomio adimensional Dk .

La Figura 7.1 muestra el **coeficiente de fricción característico** fc obtenido mediante la aplicación del proceso explicado en el capítulo anterior. Los resultados se han separado en función de la altura del talud sobre la cimentación relativa Ft/h con su correspondiente ajuste.

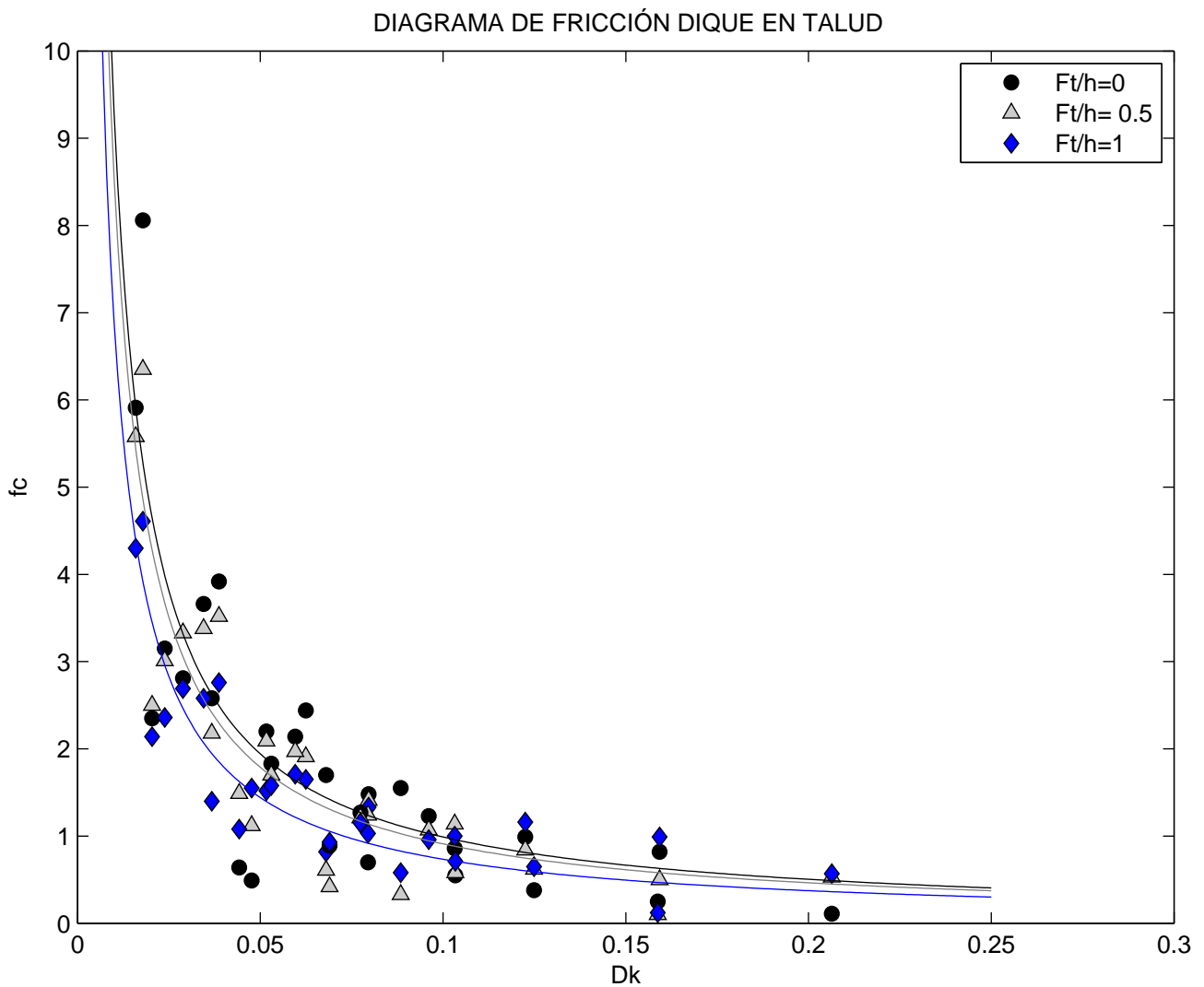


Figura 7.1: Diagrama de fricción característico para dique en talud en función de las tres alturas del talud sobre la cimentación relativas ensayadas: $0 \leq Ft/h \leq 1$

Los principales resultados observados son:

- El coeficiente de fricción f_c muestra un comportamiento similar al obtenido en el dique poroso y en el dique mixto, decreciendo exponencialmente con el aumento del valor Dk . Éste es el parámetro más influyente en el valor de f_c .
- Para todas las alturas del talud relativas ensayadas, los datos se agrupan en función de Ft/h aunque existe cierta dispersión de algunos de los valores obtenidos a pesar de que el coeficiente de correlación en todos los casos supera el 71 %. Se observa que el coeficiente de fricción en general se reduce a medida que aumenta la altura relativa.

7. Diagrama de fricción para dique en talud

La ecuación propuesta para obtener fc es la siguiente:

$$fc = a(Dk)^b \quad (7.2)$$

Siendo los valores de a y b los coeficientes que mejor se ajustan a los datos correspondientes a cada altura del talud sobre la cimentación. El proceso para obtener el valor de estos coeficientes es:

– 1º Se realiza un ajuste potencial del tipo ecuación 7.2 para cada altura del talud sobre la cimentación relativa y se obtiene un primer valor de a_i y de b_i con $i = 1, 2, 3$ para cada Ft/h .

– 2º Para conseguir unas ecuaciones que representen mejor el comportamiento de los datos del diagrama se ha mantenido un valor de b constante definido como la media de los b_i , $i = 1, 2, 3$.

– 3º Finalmente, se realiza un nuevo ajuste manteniendo el coeficiente b constante y se determinan los nuevos valores de a_i , $i = 1, 2, 3$, resultando las ecuaciones finales para obtener fc de cada altura del talud sobre la cimentación relativa ensayada Ft/h .

En la Figura 7.2 se muestra los valores del coeficiente a , tomando como $b = -0.9729$ constante para todas las alturas del talud sobre la cimentación relativas.

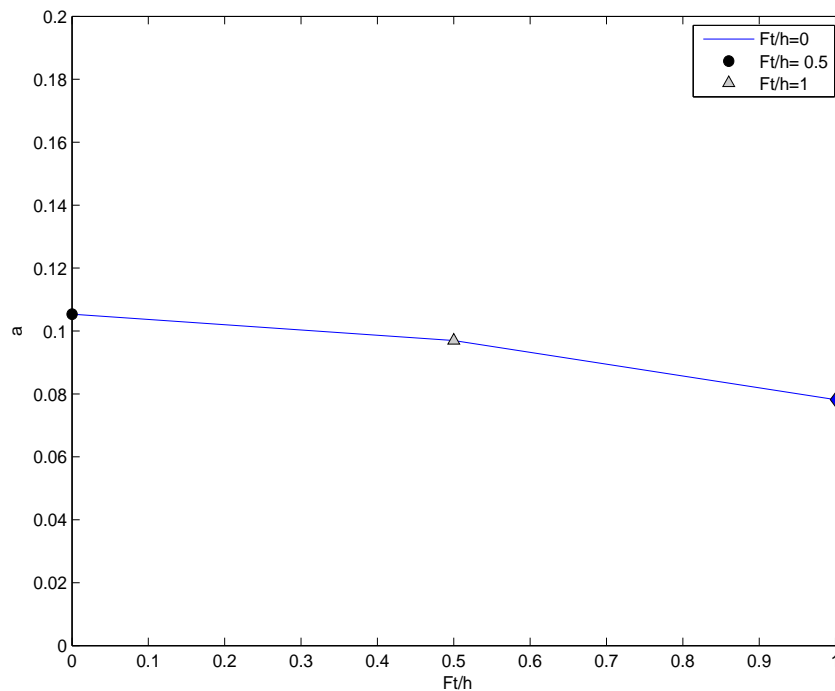


Figura 7.2: Valores del coeficiente a según la altura del talud sobre la cimentación relativa ensayada: $0 \leq Ft/h \leq 1$

7. Diagrama de fricción para dique en talud

A continuación se presentan las ecuaciones para obtener el coeficiente de fricción característico de cada altura del talud sobre la cimentación relativa Ft/h .

- Para $Ft/h = 0$

$$fc_1 = 0.1053(Dk)^{-0.9729} \quad (7.3)$$

En la Figura 7.3 se muestra el ajuste con un coeficiente de **correlación del 71 %** y unas bandas de ajuste de confianza del 95 % superior e inferior.

- Para $Ft/h = 0.5$

$$fc_2 = 0.0970(Dk)^{-0.9729} \quad (7.4)$$

En la Figura 7.4 se muestra el ajuste con un coeficiente de **correlación del 81 %** y unas bandas de ajuste de confianza del 95 % superior e inferior.

- Para $Ft/h = 1$

$$fc_2 = 0.0782(Dk)^{-0.9729} \quad (7.5)$$

En la Figura 7.5 se muestra el ajuste con un coeficiente de **correlación del 80 %** y unas bandas de ajuste de confianza del 95 % superior e inferior.

7. Diagrama de fricción para dique en talud

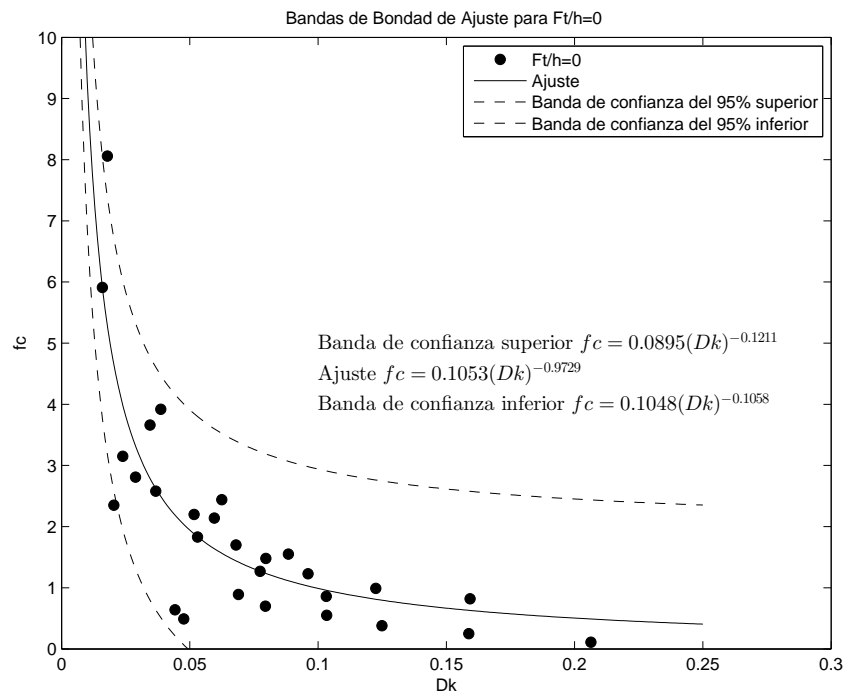


Figura 7.3: Ajuste de los coeficientes de fricción característicos para la altura del talud sobre la cimentación relativa de $Ft/h = 0$ y las bandas de confianza del 95 % superior e inferior del ajuste.

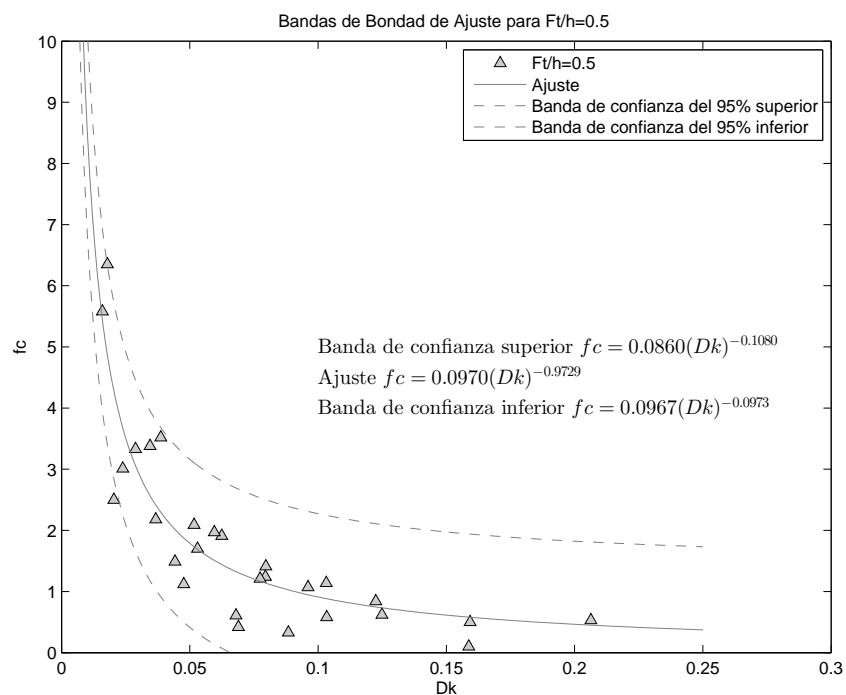


Figura 7.4: Ajuste de los coeficientes de fricción característicos para la altura del talud sobre la cimentación relativa de $Ft/h = 0.5$ y las bandas de confianza del 95 % superior e inferior del ajuste.

7. Diagrama de fricción para dique en talud

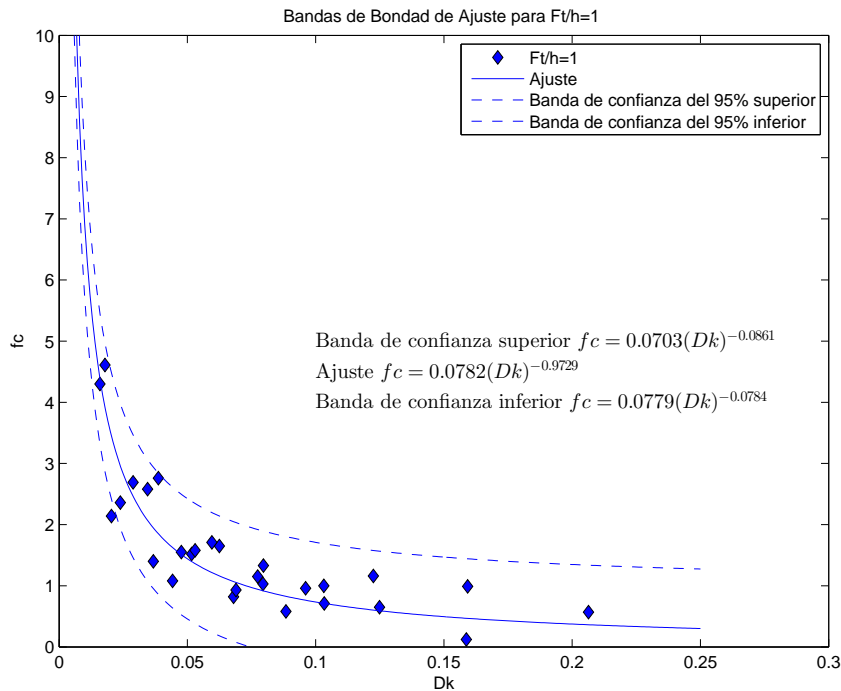


Figura 7.5: Ajuste de los coeficientes de fricción característicos para la altura del talud sobre la cimentación relativa de $Ft/h = 1$ y las bandas de confianza del 95 % superior e inferior del ajuste.

Finalmente, destacar que el **diagrama de fricción característico para dique en talud** tiene una práctica en ingeniería permitiendo evaluar el flujo a través del medio poroso y, con ello, minimizar el problema del efecto escala en los ensayos de laboratorio a escala reducida para el diseño de los diques.

7.2. Ejemplo de aplicación

Para entender mejor todo el proceso y el análisis llevado a cabo en el proyecto, y con el objetivo de ver la aplicación práctica del diagrama de fricción característico obtenido, se expone a continuación un ejemplo teórico de aplicación para el diseño de un dique en talud.

Ejemplo teórico

El prototipo de un dique en talud es diseñado con las siguientes características: diámetro del material granular D_{protop} , altura del talud sobre la cimentación Ft_{protop} y profundidad del agua h_{protop} . Además se conocen las condiciones del oleaje predominante en la zona con un periodo T y una altura de ola incidente H_I . Se desea saber qué diámetro del material necesitamos al escalar el modelo para evitar el efecto escala.

7. Diagrama de fricción para dique en talud

Para llevar a cabo un estudio correcto del diseño del prototipo del dique se realizan los siguientes pasos:

1º Las variables del dique se escalan y obtenemos: D_{mod} , Ft_{mod} y h_{mod} .

2º Con D_{mod} y las condiciones del oleaje ($D_{mod}k$) se entra en el diagrama de fricción para dique en talud y, según la altura del talud relativa (Ft_{mod}/h_{mod}), se obtiene el coeficiente de fricción característico del modelo fc_{mod}

3º Con el coeficiente de fricción fc_{mod} calculamos las variables fundamentales para conocer la interacción del oleaje con la estructura, como son los coeficientes de reflexión y transmisión. A través del modelo numérico se determinan K_{Rmod} y K_{Tmod} .

4º Para verificar el diámetro se deben comparar los valores del modelo y del prototipo; por lo tanto, se hace el mismo proceso explicado en los puntos 2º y 3º para las variables del prototipo consiguiendo los coeficientes K_{Rprot} y K_{Tprot} .

5º Comparando los coeficientes de reflexión y transmisión del modelo y del prototipo se observa que estos no coinciden: $K_{Rmod} \neq K_{Rprot}$ y $K_{Tmod} \neq K_{Tprot}$. Esto se debe a los problemas relativos a la existencia del *efecto escala* al no conservarse el escalado del modelo en términos de porosidad.

6º Para corregir el efecto escala se realiza un proceso iterativo: Se calculan en el modelo numérico, con un nuevo coeficiente de fricción fc_{mod} , los coeficientes de reflexión K_{Rmod} y transmisión K_{Tmod} hasta conseguir que los datos del modelo se aproximen a los del prototipo con un error mínimo de diferencia.

7º Por ultimo, con el coeficiente de fricción fc que da un error mínimo entre los valores del modelo y del prototipo, se entra de nuevo en el diagrama de fricción para dique en talud y se obtiene el diámetro característico correspondiente del modelo D_{mod} con el que se consigue reducir el efecto escala.

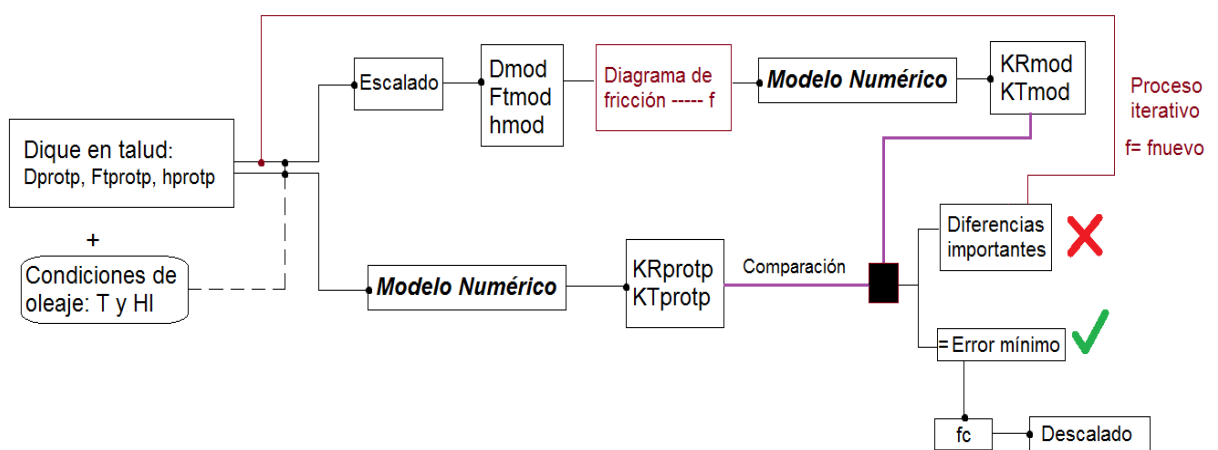


Figura 7.6: Ejemplo de aplicación del diagrama de fricción para el diseño de un dique en talud.

Capítulo 8

Conclusiones

En la primera parte de este proyecto se ha llevado a cabo un estudio de los diques de abrigo existentes en el sistema portuario español, sus distintos modos de fallo y las reparaciones realizadas en ellos. Con dicha información se ha elaborado una base de datos pionera en España, que ha permitido conocer la tipología de dique más construida e identificar cuáles han sido las principales causas de averías. Aparte del interés intrínseco de este estudio sistematizado, las conclusiones que del mismo se derivan relativas a los modos de fallo han servido de base, en las siguientes partes del proyecto, para abordar problemas concretos de mejora en el diseño de diques que permiten reducir los problemas asociados a algunos modos de fallo.

Nuestro estudio se ha centrado en uno de los principales problemas en el diseño de los diques: *el efecto escala*. Apoyándose tanto en ensayos experimentales como en el modelado numérico, se ha conseguido corregir el efecto escala elaborando un nuevo método para calcular el coeficiente de fricción para dique en talud, reduciendo así las diferencias de escala en los ensayos de laboratorio entre el modelo y el prototipo y, con ello, se contribuye al conocimiento del diseño de los diques en talud.

Se presentan a continuación las conclusiones obtenidas para cada objetivo específico definido en el proyecto.

8.1. Análisis de los diques de abrigo de Puertos del Estado

En relación a este primer objetivo, se ha recopilado toda la información existente sobre los diques de abrigo del sistema portuario español. Con ello, se ha elaborado una tabla que permite, de manera rápida y concisa, conocer qué tipologías de diques existen en España, los datos de su vida útil, años de inicio y fin de la construcción, así como las reparaciones y/o ampliaciones realizadas en los mismos. Las conclusiones que se extraen de toda la información analizada son:

- La tipología de dique que más se ha construido en España es el dique en talud. De los 83 diques de abrigo de interés general de Puertos del Estado, aproximadamente el 50 % son diques en talud con un menor porcentaje en las Fachadas Marítimas de Canarias, Levante y Baleares.

- Los últimos diques construidos con reparaciones y/o ampliaciones realizadas tienen una vida útil entre 25 y 50 años. En algunos de ellos, sus tramos tienen vidas útiles diferentes entre sí, debido a las condiciones de oleaje y medioambientales a las que están sometidos. Además, podemos señalar que, aproximadamente, un 15 % de los diques en España no han cumplido su vida útil y se han tenido que realizar reparaciones para su conservación.

Por otro lado, se han estudiado los principales modos de fallo y reparaciones realizadas en los diques de abrigo, recogiendo una tabla resumen de las averías más notables en algunos de los diques de los puertos españoles. Sobre la base de este estudio se obtienen las siguientes conclusiones:

- Las principales causas de fallo y averías en los diques de abrigo se deben a temporales intensos y a errores en el diseño de los mismos.
- Los diques en talud son los que presentan mayor número de fallos, no sólo porque representan la tipología de dique más construida en España, sino porque en su diseño se dan mayores errores a la hora de analizar la interacción del oleaje con la estructura.

A partir de las conclusiones obtenidas del análisis de las tipologías de diques y sus principales modos de fallo, se observa que existen diversos problemas relativos a los criterios de diseño de los mismos. Específicamente, el proyecto se desarrolla a continuación sobre uno de los principales problemas de diseño que puede provocar importantes averías en los diques: *el efecto escala* que se produce al no conservarse simultáneamente el escalado del modelo y la porosidad del medio en los ensayos de laboratorio a escala reducida.

8.2. Ensayos experimentales

Con el objetivo de poder analizar la interacción del oleaje con la estructura y estudiar el flujo a través del medio poroso para corregir el efecto escala, se han llevado a cabo una serie de ensayos experimentales. En concreto, basándose en diferentes diámetros del material granular D y geometrías de dique según la altura del talud sobre la cimentación Ft , se han obtenido los principales parámetros que describen la distribución de la energía incidente, como son el coeficiente de reflexión K_{Rexp} y el coeficiente de transmisión K_{Texp} . Los resultados obtenidos son comparados posteriormente con los del modelo numérico, a fin de corregir el problema citado del efecto escala.

8.3. Modelo numérico

Se ha utilizando el modelo numérico IH-2VOF para el estudio del flujo a través del medio poroso a partir de un único coeficiente de fricción f , estableciéndose las mismas condiciones, características y geometrías de dique que en los ensayos experimentales. De los casos numéricos del modelo se obtienen, de nuevo, los coeficientes de reflexión K_{Rmod} y los coeficientes de transmisión K_{Tmod} para compararlos con los experimentales.

8. Conclusiones

A continuación se realiza un análisis de los resultados, comparando los parámetros proporcionados por el modelo con los experimentales con el fin de establecer una metodología para obtener el coeficiente de fricción característico. Del análisis de los resultados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Para los tres tipos de geometría de dique, la mayor parte de la energía incidente se distribuye en energía reflejada debido a la presencia de la obra marítima, y en energía disipada por la rotura del oleaje incidente. A medida que aumenta la altura del talud sobre la cimentación Ft , disminuye la reflexión del oleaje y aumenta la disipación por rotura de las olas sobre el talud del dique y por fricción a través del medio poroso.
- Los datos proporcionados por el modelo numérico se aproximan a los datos obtenidos en los ensayos experimentales, siendo para algunos casos el mismo valor. Esto prueba el correcto diseño de los casos ensayados y la validez del estudio del flujo en el medio poroso a través de un único coeficiente de fricción f .

A raíz de las conclusiones obtenidas del análisis de los resultados se establece una metodología para obtener el coeficiente de fricción característico para dique en talud, consistiendo en: 1) ajuste de los coeficientes de reflexión y de transmisión para cada caso numérico ensayado y 2) minimización del error conjunto entre dichos coeficientes.

8.4. Diagrama de fricción para dique en talud

Finalmente, realizando un ajuste adecuado y minimizando el error conjunto entre los coeficientes numéricos y experimentales de reflexión y transmisión, se ha obtenido el diagrama de fricción característico para dique en talud. Se ha observado la dependencia de fc de la altura del talud sobre la cimentación relativa Ft/h , disminuyendo ligeramente con el aumento de la misma, de manera que el coeficiente de fricción en este caso sigue la siguiente relación funcional:

$$fc = \Psi(Dk, \frac{Ft}{h}) \quad (8.1)$$

Cabe señalar que el coeficiente de fricción decrece al aumentar el diámetro del material granular.

La aplicación práctica del diagrama consiste en obtener el diámetro del material granular D del modelo escalado, a partir de un coeficiente de fricción característico fc que reduce la diferencia de porosidad entre el modelo escalado y el prototipo, al escalar el diámetro del material en los ensayos de laboratorio. Por tanto, el diagrama elaborado resulta ser una herramienta simple para obtener el coeficiente de fricción, que permite evaluar el flujo a través del medio poroso y, con ello, minimizar el problema del efecto escala en los ensayos de laboratorio a escala reducida para el diseño de los diques en talud. Con ello, se consigue reducir los problemas de diseño de diques que pueden dar lugar a importantes averías y colapso de la estructura.

8.5. Futuras líneas de investigación

Los estudios llevados a cabo en este proyecto y las conclusiones obtenidas ponen de manifiesto la necesidad de seguir investigando sobre los problemas relativos a los criterios de diseño de las diferentes tipologías de diques, que permitan conseguir una modelización adecuada, maximizando la seguridad y minimizando los costes. Por ello, se proponen las siguientes futuras líneas de investigación:

- La realización de nuevos ensayos para conseguir mayor precisión en los ajustes y, con ello, verificar y mejorar los resultados obtenidos.
- Desarrollar la metodología seguida con algún otro modelo numérico que permita comparar con los resultados proporcionados por el modelo IH-2VOF.
- Plantear el mismo proceso de trabajo para alguna tipología nueva de dique con el objetivo de conseguir un método unificado de verificación y comparación funcional y constructiva para todas las tipologías de diques existentes.

Apéndice

Apéndice A

Formulación matemática del IH-2VOF

El presente anexo está dedicado a la descripción de la formulación matemática del modelo numérico IH-2VOF. La descripción se basa [Losada et al. \(2008\)](#) y [Lara et al. \(2011\)](#).

El modelo numérico resuelve el flujo en el dominio hidráulico con las ecuaciones de Navier - Stokes en una región (fuera del medio poroso) y dentro del medio poroso.

El flujo en el medio poroso es modelizado por la resolución de las ecuaciones de VARANS (Volume - Average Reynolds Average Navier - Stokes equations). Las ecuaciones de VARANS se derivan de la integración de las ecuaciones de RANS (Reynolds Average Navier - Stokes equations) dentro de un volumen de control.

Primero se describe, brevemente, las ecuaciones que gobiernan el flujo fuera del medio poroso (RANS) para así poder entender mejor las ecuaciones del flujo en el interior del medio poroso (VARANS); siendo éstas últimas la formulación matemática del IH-2VOF. Se debe mencionar que para el caso de las ecuaciones de VARANS con porosidad $n = 1$ se obtiene como resultado las ecuaciones de RANS.

A.1. Flujo fuera del medio poroso: “The Reynolds Averaged Navier -Stokes (RANS) equations”

El modelo IH-2VOF resuelve en dos dimensiones las ecuaciones Reynolds Averaged Navier -Stokes basadas en los supuestos que se describen a continuación. En un flujo turbulento, el campo de velocidad instantánea u_i y el campo de presiones p pueden ser expresados en dos partes:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad p = \bar{p} + p', \quad (\text{A.1})$$

donde $i = 1, 2$ para un flujo bidimensional, \bar{u}_i es el promedio de la velocidad (velocidad significativa), \bar{p} es el promedio de las presiones, u'_i es la velocidad debido a la turbulencia, y p' representa las fluctuaciones de la presión.

Aplicando Navier - Stokes y asumiendo un fluido incomprensible, las ecuaciones RANS se derivan:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} \quad (\text{A.3})$$

Donde ρ es la densidad del fluido, g_i es la componente i de la aceleración de la gravedad y $\bar{\tau}_{ij}$ es el tensor de carga viscosa. Para un fluido Newtoniano,

$$\bar{\tau}_{ij} = 2\mu \bar{\sigma}_{ij} \quad (\text{A.4})$$

donde μ es la viscosidad molecular y

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{A.5})$$

el tensor de velocidad de deformación.

Por último, falta por definir el término, de la ecuación A.3, que representa la influencia de la turbulencia en el flujo:

$$R_{ij} = \rho \overline{(u'_i u'_j)} \quad (\text{A.6})$$

La descripción de este último término es compleja. Por ello, se implementa en el IH-2VOF un modelo de turbulencia relacionado con la tasa de esfuerzo del flujo a través de un modelo algebraico no lineal $k - \varepsilon$ (Shih et al., 1996); (Liu, 1998). Este modelo de turbulencia no se ha incluido en la formulación del proyecto.

Las ecuaciones de RANS permitirán desarrollar las ecuaciones de gobierno del flujo en el medio poroso VARANS. Estas ecuaciones son la base de la formulación matemática de cálculo del IH-2VOF.

A.2. Ecuaciones de gobierno del flujo en el medio poroso: “The Volume - Averaged Reynolds Averaged Navier - Stokes (VARANS) equations”

La principal hipótesis del modelo IH-2VOF consiste en considerar que las ecuaciones de RANS, con un apropiado modelo de turbulencia ($k - \varepsilon$), pueden describir adecuadamente el flujo en el medio poroso. Dado la compleja estructura de los materiales porosos, la directa resolución del campo de flujo dentro de los poros no es todavía práctica.

El flujo a través del medio poroso es obtenido en el modelo IH-2VOF a través de la resolución de las ecuaciones de VARANS: Volume - Averaged Reynolds Averaged Navier - Stokes equations. Estas ecuaciones se derivan de integrar las ecuaciones RANS dentro de un volumen de control.

El tamaño del volumen de control es más ancho que las dimensiones del poro característico (escala microscópica), pero mucho mas pequeño que la longitud característica del flujo, es decir, la escala de la variación espacial de las variables físicas en el dominio del fluido (escala macroscópica). Ver Fijura A.1

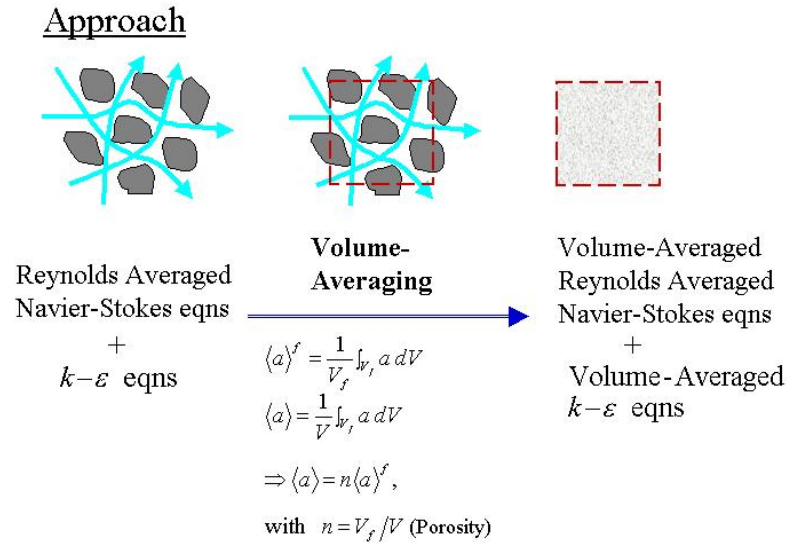


Figura A.1: Representación de la aproximación matemática del modelo IH-2VOF

El proceso matemático del volumen promedio de una cierta cantidad “a” es definida por la siguiente expresión:

$$\langle a \rangle = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} a dV \quad (\text{A.7})$$

Donde “ $\langle \rangle$ ” denota el volumen promediado, V es el volumen promedio total, V_f es el volumen que es ocupado por la fase del fluido dentro de V y $\langle a \rangle$ es la magnitud promediada. El operador definido en la ecuación A.7 puede relacionarse con el promedio del volumen de Darcy:

$$\langle a \rangle_D = \frac{1}{V} \int_{V_f} a dV \quad (\text{A.8})$$

a través de la sencilla relación:

$$\langle a \rangle_D = n \langle a \rangle \quad (\text{A.9})$$

Donde $n = \frac{V_f}{V}$ es la porosidad, asumida como contante en el modelo. En términos de velocidad, $\langle a \rangle_D$ podría ser la velocidad de descarga y $\langle a \rangle$ la velocidad de filtración .

Para cuantificar el flujo en el medio poroso, se define el número de Reynolds del poro como:

$$Re_p = \frac{D_{50}|U|}{\nu} \quad (\text{A.10})$$

Donde D_{50} es el diámetro equivalente del material poroso, ν es la viscosidad cinemática del fluido y $|U|$ la velocidad típica alrededor del poro.

Las ecuaciones de VARANS se obtiene aplicando el promedio del volumen de las ecuaciones de RANS. El conjunto de la velocidad promediada de RANS es asumido como:

$$\bar{u}_i = \langle \bar{u}_i \rangle + \bar{u}_i'' \quad (\text{A.11})$$

Donde $\langle \bar{u}_i \rangle$ es le promedio de la velocidad en el volumen de conjunto y \bar{u}_i'' es la fluctuación con respecto al volumen promediado.

Aplicando esta descomposición a las ecuaciones de continuidad A.2 y de conservación de la cantidad de movimiento A.3, se obtiene:

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{A.12})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{P} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \langle \bar{u}_i' u_j' \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{\tau}_{ij} \rangle}{\partial x_j} + g_i \\ & - \frac{\partial \langle \bar{u}_i'' \bar{u}_j'' \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{V_f} \int_{A_{int}} \left[-\bar{u}_i' u_j' - \frac{\bar{P}}{\rho} \delta_{i,j} + \frac{\bar{\tau}_{ij}}{\rho} \right] n_j dA \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

A. Formulación matemática del IH-2VOF

A_{int} es la interface entre sólido y fluido y n_j es la componente j del vector normal unitario del fluido en la fase sólida. El último término explica el salto de la interfaz y representa la relación de transferencia de movimiento entre la fase líquida y el esqueleto sólido. Este término es fundamental para modelizar el flujo en el medio poroso.

El término anterior es la carga residual debida al volumen promediado: este resulta del volumen promedio del término convectivo $\overline{u_i u_j}$ como:

$$\langle \overline{u_i u_j} \rangle = \langle \overline{u_i} \rangle \langle \overline{u_j} \rangle + \langle \overline{u_i'' u_j''} \rangle \quad (\text{A.14})$$

Dentro del medio poroso, estos dos últimos términos se modelizan utilizando las ecuaciones descriptoras del flujo en el medio poroso desarrolladas por Forchheimer; incluyendo los efectos fluctuantes:

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial \langle \overline{u_i'' u_j''} \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{V_f} \int_{A_{int}} \left[-\overline{u_i' u_j'} - \frac{\overline{P}}{\rho} \delta_{ij} + \frac{\overline{\tau_{ij}}}{\rho} \right] n_j dA = \\ & - \left[\frac{\alpha \nu (1-n)^2}{n^2 D_{50}^2} \langle \overline{u_i} \rangle + \frac{\beta (1-n)}{n D_{50}} \sqrt{\langle \overline{u_1} \rangle^2 + \langle \overline{u_2} \rangle^2} \langle \overline{u_i} \rangle + c_A \frac{\partial \langle \overline{u_i} \rangle}{\partial t} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

Donde α y β son los coeficientes experimentales basados en [Van Gent \(1995\)](#), asociados a la linealidad y no linealidad de las fuerzas resistivas. El tercer término representa los efectos inerciales, siendo c_A el coeficiente de masa añadida.

Las ecuaciones de Forchheimer y todas sus relaciones han sido explicadas en el **Capítulo 2: Conceptos teóricos: Formulación del flujo en el medio poroso**.

Como se ha mencionado a lo largo del proyecto, en el modelo se implementará un único coeficiente de fricción f para describir la resistencia al flujo en el interior del medio poroso. Por tanto, teniendo en cuenta esta hipótesis e introduciendo en las ecuaciones de VARANS las expresiones debidas al término de carga residual y la transferencia de movimiento en la interfaz, las ecuaciones completas de cálculo del modelo pueden reinscribirse como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \overline{u_i} \rangle}{\partial t} + \frac{\langle \overline{u_j} \rangle}{1+c_A} \frac{\partial \langle \overline{u_i} \rangle}{\partial x_j} = & \frac{1}{\rho(1+c_A)} \left[-\frac{\partial \langle \overline{P} \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \rho \langle \overline{u_i' u_j'} \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} + \rho g_i \right] \\ & - \frac{1}{1+c_A} - [f \cdot \sigma \cdot n \cdot \langle \overline{u_i} \rangle] \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

Apéndice B

Comparación de resultados numéricos y experimentales

El Apéndice B presenta las gráficas y conclusiones de las comparaciones de los resultados proporcionados por el modelo numérico y los ensayos experimentales. En el **Capítulo 6. Modelo Numérico** se han expuesto las representaciones de tres casos ensayados para $D = 12$ mm y $Ft = 0$ m, 0.2 m y 0.4m; por tanto, para conocer el comportamiento del resto de casos se desarrolla en el presente anexo sus representaciones y explicaciones.

Como se ha mencionado anteriormente, para cada caso, según la geometría de dique Ft y diámetro del material granular D , se representan los resultados numéricos de todos los periodos T ensayados frente los experimentales. En concreto, de todos los parámetros que propocionan el modelo y los ensayos experimentales, se han comparado los resultados correspondientes a:

- Altura de ola en la pared del dique: $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$.
- Coeficiente de reflexión: $K_{R\ mod}$ vs $K_{R\ exp}$.
- Coeficiente de transmisión: $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$.

A continuación se muestran las comparaciones de los resultados numéricos y experimentales para el resto de casos ensayados, agrupados según el diámetro de material granular **D** y la altura del talud sobre la cimentación **Ft**, para todos los periodos de oleaje ensayados **T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos**. Los resultados siguen el mismo comportamiento de propagación del oleaje y distribución de energía incidente que los casos presentados en el Capítulo 6, con algunas diferencias que se reflejan a lo largo del presente apéndice.

B.1. Diámetro del material granular $D=26$ mm

B.1.1. Geometría de dique con $Ft=0$ m

– Altura de ola en la pared del dique H_{pared} .

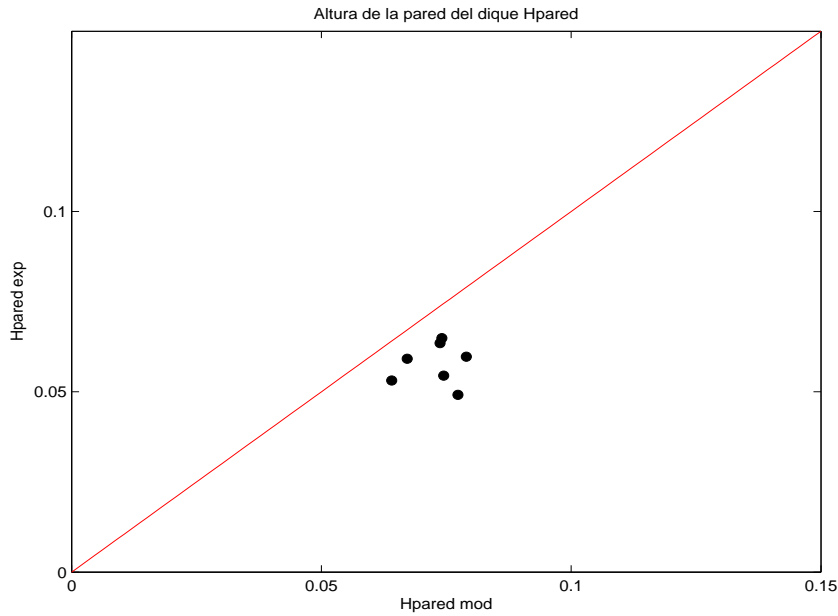


Figura B.1: Caso $D=26$ mm y $Ft=0$ m: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

– Coeficiente de reflexión K_R .

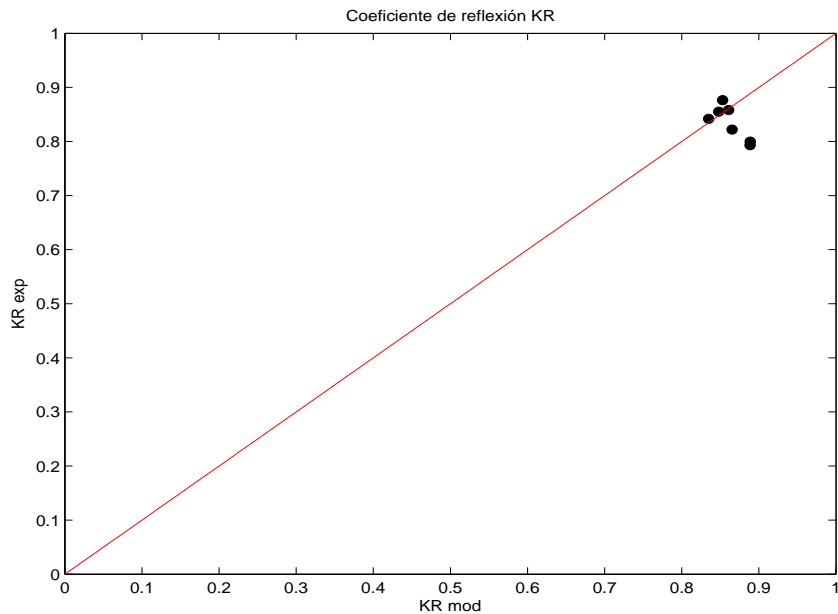


Figura B.2: Caso $D=26$ mm y $Ft=0$ m: Comparación $K_T\ mod$ vs $K_T\ exp$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

B. Comparación de resultados numéricos y experimentales

– Coeficiente de transmisión K_T .

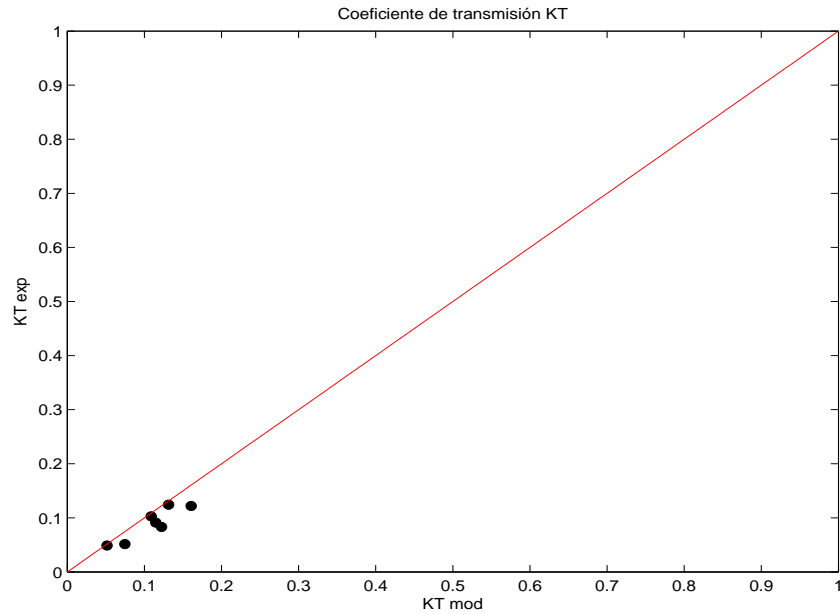


Figura B.3: Caso $D=26\text{mm}$ y $F_t=0\text{m}$: Comparación $K_{T \text{ mod}}$ vs $K_{T \text{ exp}}$ para todos los periodos T : [1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos

En las Figuras B.1-B.3 se observan que los resultados del modelo se aproximan a los resultados experimentales siendo para algunos periodos T ensayados incluso coincidentes. Respecto a la altura de ola en la pared del dique H_{pared} , los datos toman valores razonables entre [0.05-0.07]m ya que la altura de ola incidente ensayada se encuentra entorno a $H_I = 0.04\text{m}$ y la reflexión es casi total como se observa en la Figura B.2.

Los coeficientes de reflexión toman valores altos, próximos a 1; sin embargo, si comparamos con los ensayos realizados para $D = 12\text{mm}$, los valores del K_R son menores ya que al aumentar el diámetro del material granular aumenta la porosidad y, por tanto, se facilita la propagación del oleaje a través del dique por lo que los coeficientes de transmisión también serán mayores. Esta tendencia se observa a medida que se aumenta el diámetro del material granular. No obstante, no se debe de olvidar que al haber un obstáculo como es el dique, la reflexión del oleaje siempre será superior a su transmisión, es decir, los coeficientes de transmisión seguirán tomando valores bajos.

B.1.2. Geometría de dique con $Ft=0.2$ m

– *Altura de ola en la pared del dique H_{pared} .*

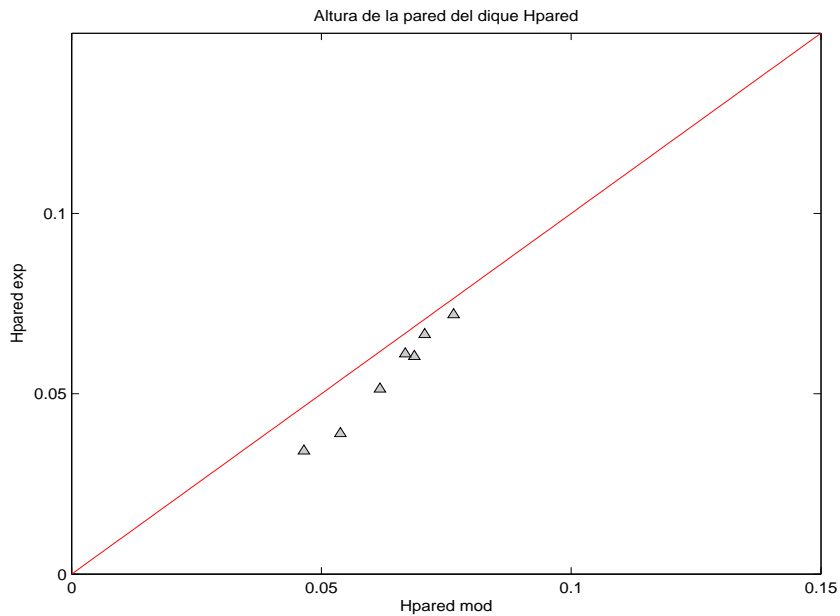


Figura B.4: Caso $D=26\text{mm}$ y $Ft=0.2\text{m}$: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

– *Coefficiente de reflexión K_R .*

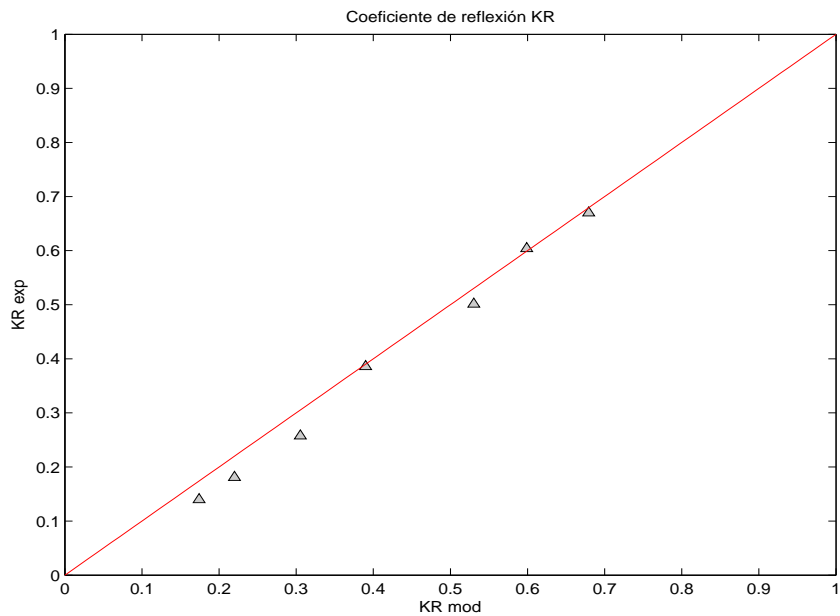


Figura B.5: Caso $D=26\text{mm}$ y $Ft=0.2\text{m}$: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

B. Comparación de resultados numéricos y experimentales

– Coeficiente de transmisión K_T .

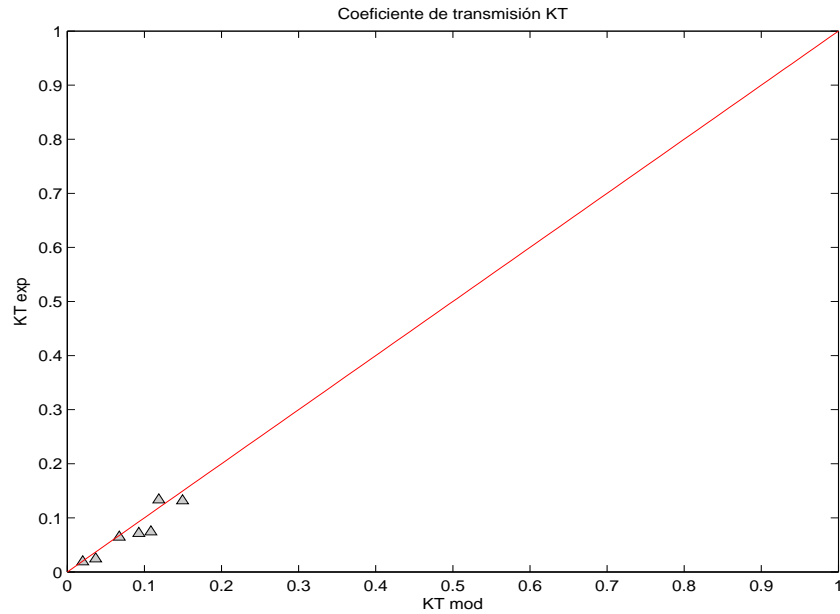


Figura B.6: Caso $D=26\text{mm}$ y $Ft=0.2\text{m}$: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos T : [1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos

Al igual que en el caso anterior, los resultados experimentales y numéricos se ajustan bastante bien a la recta de 45° con diferencias pequeñas entre sus valores.

Como se observa en la Figura B.5, para un dique con una altura del talud sobre la cimentación intermedia $Ft = 0.2\text{ m}$, la reflexión del oleaje incidente disminuye, tomando valores altos para las ondas cortas, es decir con periodos de oleaje T bajos. La razón por la que se dan estos coeficientes de reflexión es que, al aumentar la berma del dique, comienza a producirse la rotura del oleaje incidente al colisionar con la estructura por lo que la energía incidente se distribuye en energía reflejada y disipada por la rotura del oleaje sobre la berma del dique y por fricción a través del medio poroso.

Los valores de los coeficientes de transmisión experimentales y numéricos son, al igual que en el caso anterior, bajos, tomando valores próximos a cero. El motivo de estos resultados es el mismo que para una berma baja de material granular $Ft = 0\text{ m}$; es decir, a pesar de aumente la porosidad del medio, la energía incidente se transforma principalmente en energía reflejada y disipada ya que la presencia de la estructura dificulta la propagación del oleaje a través de la misma.

B.1.3. Geometría de dique con $Ft=0.4$ m

– *Altura de ola en la pared del dique H_{pared} .*

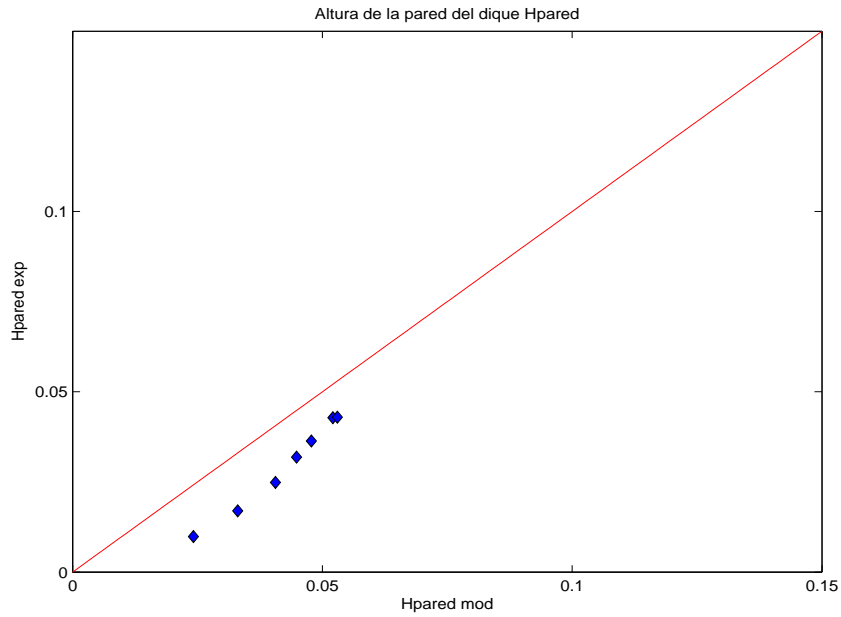


Figura B.7: Caso $D=26\text{mm}$ y $Ft=0.2\text{m}$: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

– *Coefficiente de reflexión K_R .*

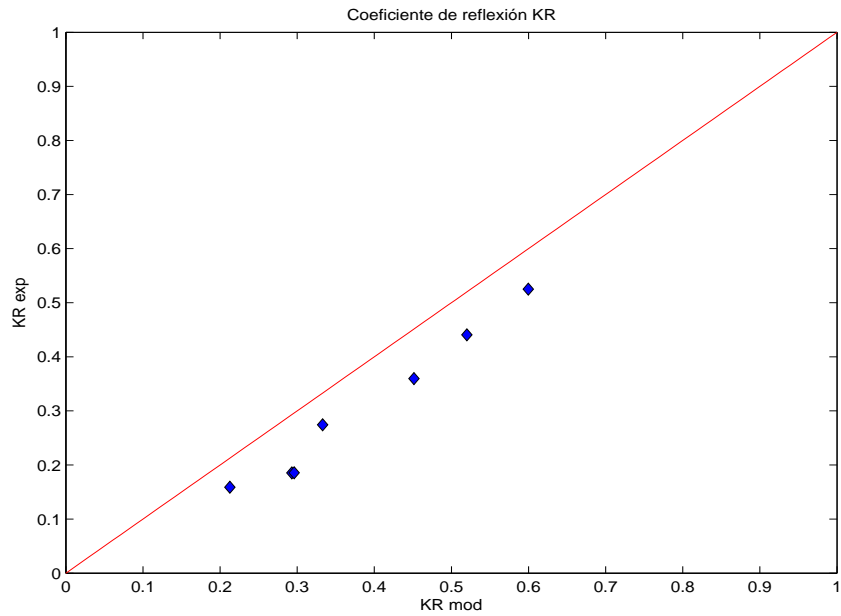


Figura B.8: Caso $D=26\text{mm}$ y $Ft=0.2\text{m}$: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

B. Comparación de resultados numéricos y experimentales

- Coeficiente de transmisión K_T .

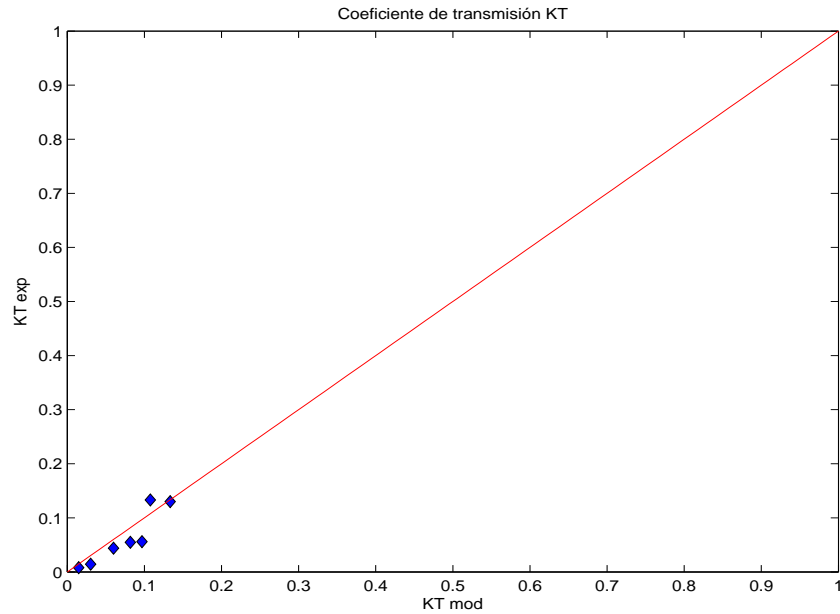


Figura B.9: Caso $D=26\text{mm}$ y $Ft=0.2\text{m}$: Comparación $K_{T \text{ mod}}$ vs $K_{T \text{ exp}}$ para todos los periodos T : [1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos

Se observa en las Figuras B.7-B.9 que los resultados experimentales y numéricos del caso $Ft = 0.4 \text{ m}$, tanto para la altura de ola en la pared del dique H_{pared} como para los coeficientes de reflexión K_R y transmisión K_T , son similares a las geometrías de dique anteriormente expuestas. Además, siguiendo el mismo comportamiento, los valores del modelo numérico para cada periodo de oleaje ensayado son parecidos a los experimentales.

Cabe señalar que, como se refleja en la Figura B.8, la diferencia fundamental respecto a las otras geometrías de dique ensayadas se encuentra en que, al aumentar la altura del talud $Ft = 0.4 \text{ m}$, el oleaje incidente rompe siempre sobre el talud del dique, transformándose gran parte de la energía incidente en **energía disipada** y una parte en **energía reflejada** con coeficientes de reflexión menores que la geometría $Ft = 0.2 \text{ m}$.

B.2. Diámetro del material granular $D=40$ mm

Para el resto de casos ensayados se van a señalar las **principales diferencias** con respecto a los otros casos ya comentados, ya que, como se muestran en las siguientes representaciones, los valores que toman los coeficientes de reflexión y transmisión y la altura de ola en la pared del dique siguen el mismo comportamiento de propagación del oleaje y distribución de la energía incidente ya explicada más arriba.

B.2.1. Geometría de dique con $Ft=0$ m

– *Altura de ola en la pared del dique H_{pared} .*

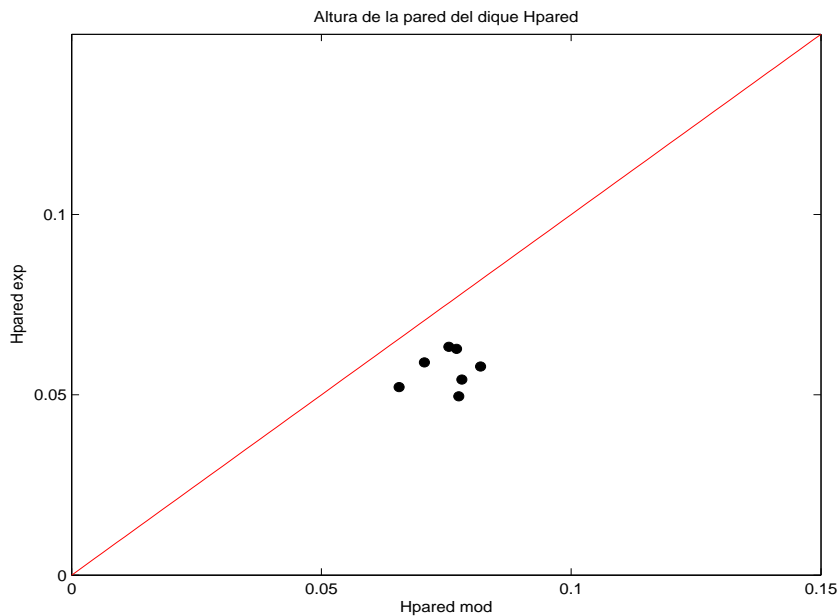


Figura B.10: Caso $D=40$ mm y $Ft=0$ m: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

B. Comparación de resultados numéricos y experimentales

– *Coefficiente de reflexión K_R .*

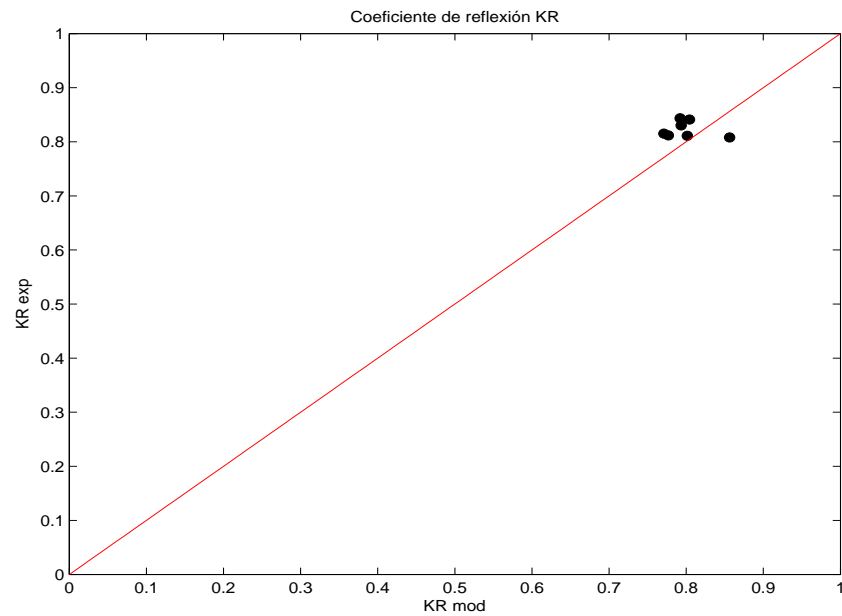


Figura B.11: Caso $D=40\text{mm}$ y $F_t=0\text{m}$: Comparación $K_{T\text{ mod}}$ vs $K_{T\text{ exp}}$ para todos los periodos T : [1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos

– *Coefficiente de transmisión K_T .*

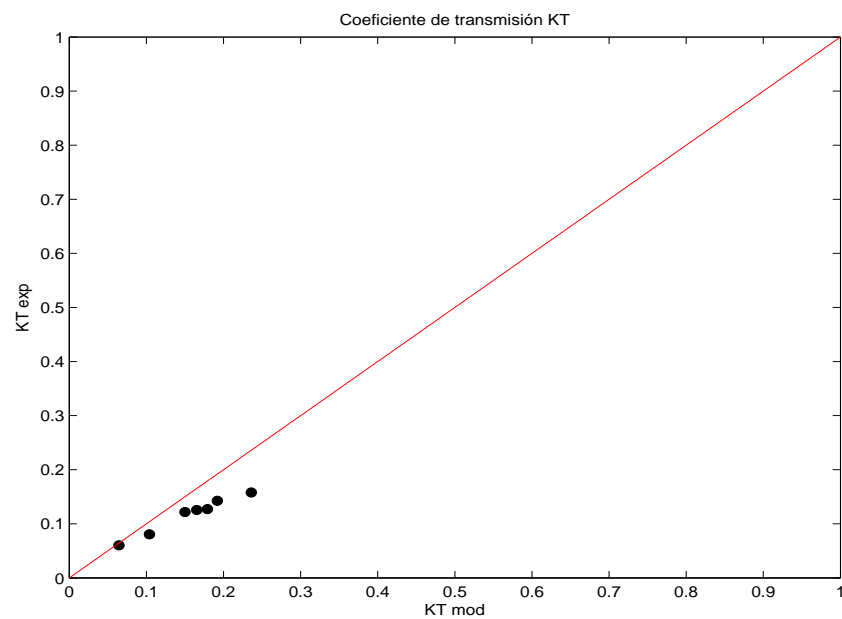


Figura B.12: Caso $D=40\text{mm}$ y $F_t=0\text{m}$: Comparación $K_{T\text{ mod}}$ vs $K_{T\text{ exp}}$ para todos los periodos T : [1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos

Para el caso ensayado con diámetro del material granular $D = 40\text{ mm}$, como se observa en la Figura B.12, la propagación del oleaje a través del dique aumenta debido al incremento de la porosidad del material del talud y de la cimentación del dique.

B.2.2. Geometría de dique con $Ft=0.2$ m

– *Altura de ola en la pared del dique H_{pared} .*

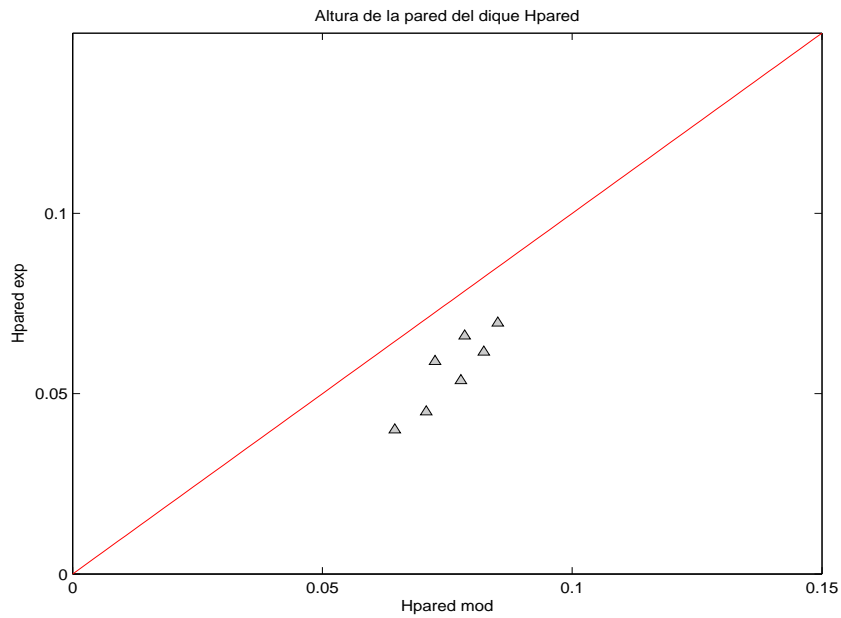


Figura B.13: Caso $D=40\text{mm}$ y $Ft=0.2\text{m}$: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

– *Coefficiente de reflexión K_R .*

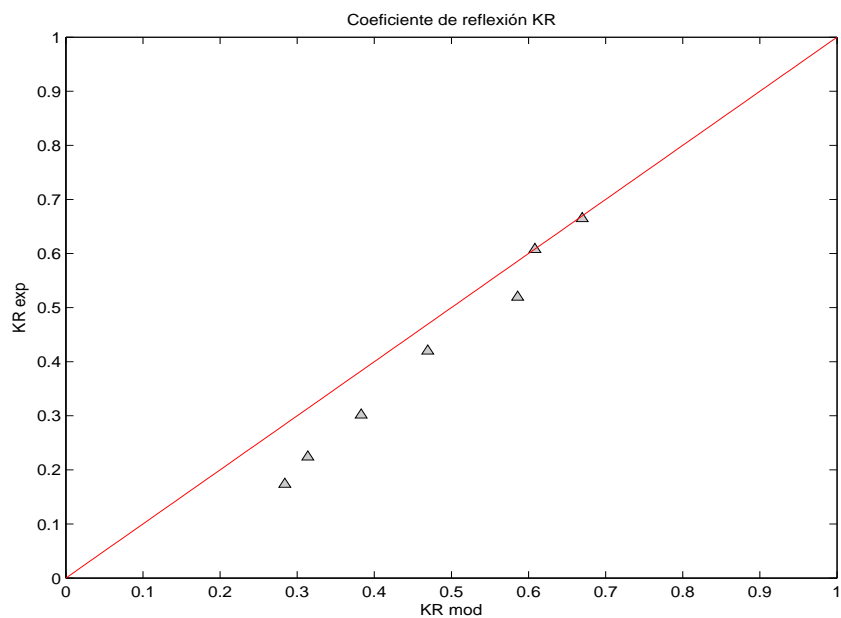


Figura B.14: Caso $D=40\text{mm}$ y $Ft=0.2\text{m}$: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

B. Comparación de resultados numéricos y experimentales

- Coeficiente de transmisión K_T .

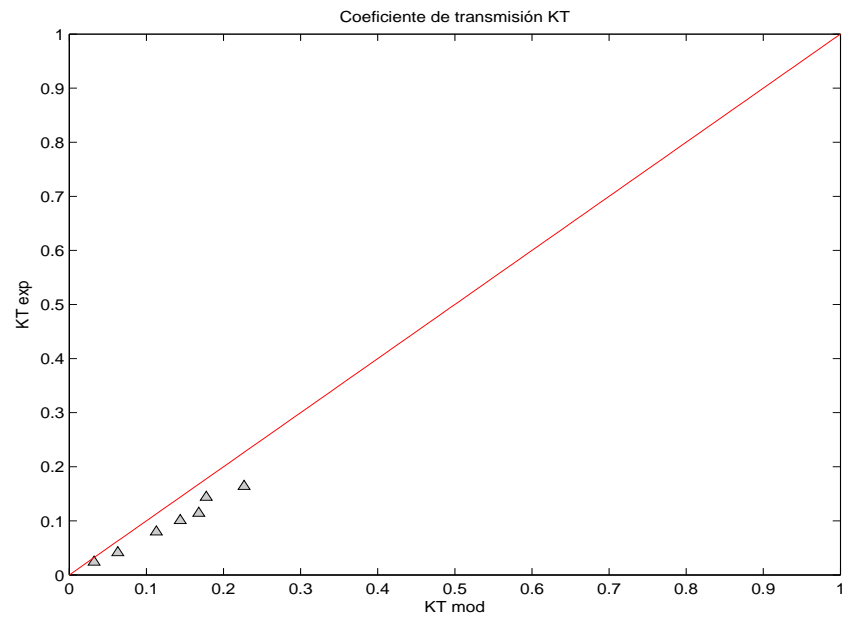


Figura B.15: Caso $D=40\text{mm}$ y $Ft=0.2\text{m}$: Comparación $K_{T \text{ mod}}$ vs $K_{T \text{ exp}}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

De nuevo, señalar que los coeficientes de transmisión aumentan ligeramente por el incremento de la porosidad del medio, pero siguen siendo valores bajos próximos a 0. La reflexión del oleaje no presenta grandes diferencias con respecto a los casos anteriores ya expuestos; y parte de la energía incidente se distribuye en energía disipada por la rotura del oleaje y por fricción y en energía reflejada por el cambio brusco del medio de propagación debido a la presencia de dique.

B.2.3. Geometría de dique con Ft=0.4 m

– *Altura de ola en la pared del dique H_{pared} .*

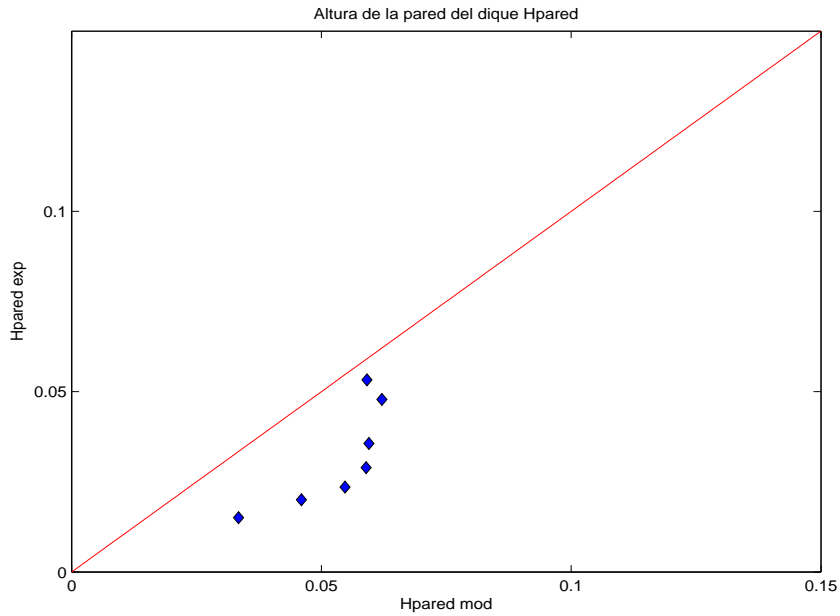


Figura B.16: Caso D=40mm y Ft=0.4m: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos

– *Coefficiente de reflexión K_R .*

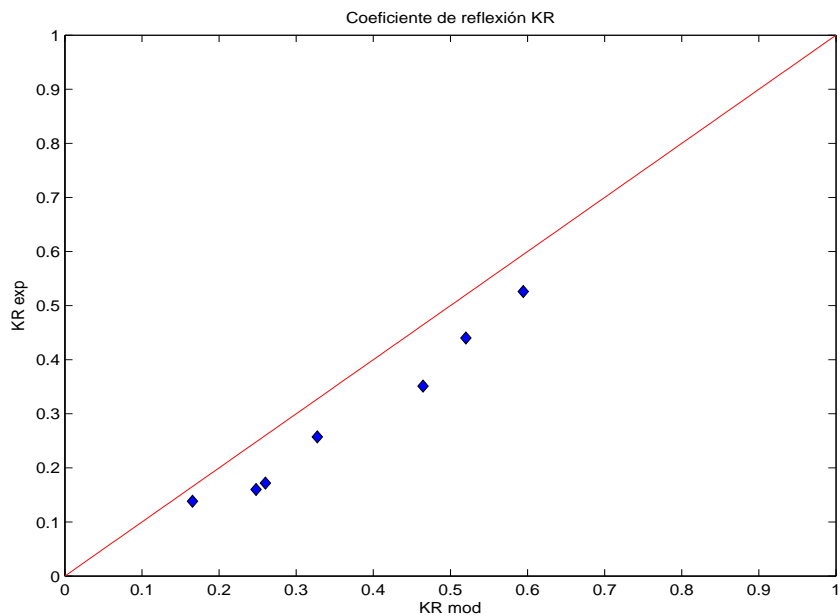


Figura B.17: Caso D=40mm y Ft=0.4m: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos

B. Comparación de resultados numéricos y experimentales

- Coeficiente de transmisión K_T .

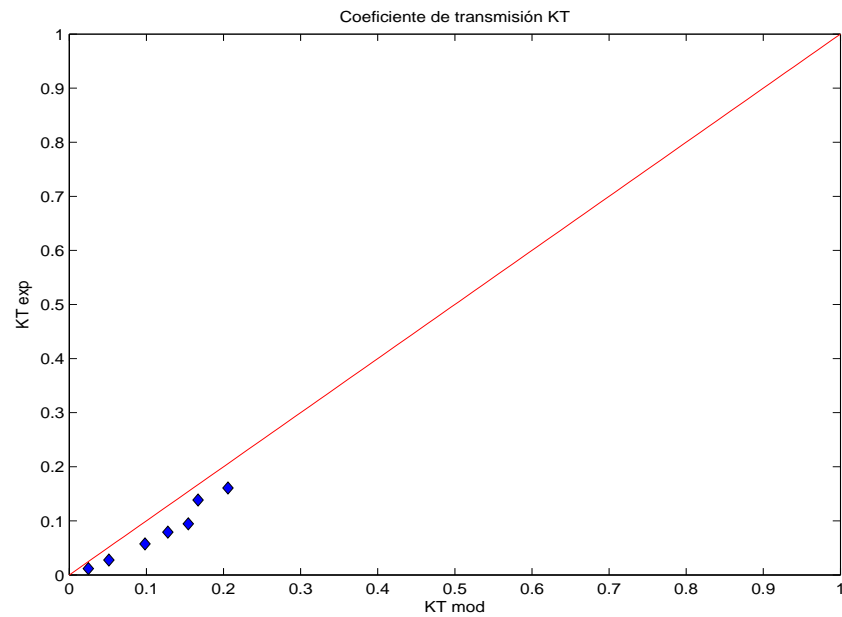


Figura B.18: Caso $D=40\text{mm}$ y $Ft=0.4\text{m}$: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

En la Figura B.17 se observan como los coeficientes de reflexión disminuyen ya que al aumentar la porosidad del medio, la capacidad de propagación del oleaje a través del dique es mayor. Además, al incrementar la altura del talud sobre la cimentación se produce una mayor disipación de la energía por rotura del oleaje y por fricción.

B.3. Diámetro del material granular $D=52$ mm

B.3.1. Geometría de dique con $Ft=0$ m

– Altura de ola en la pared del dique H_{pared} .

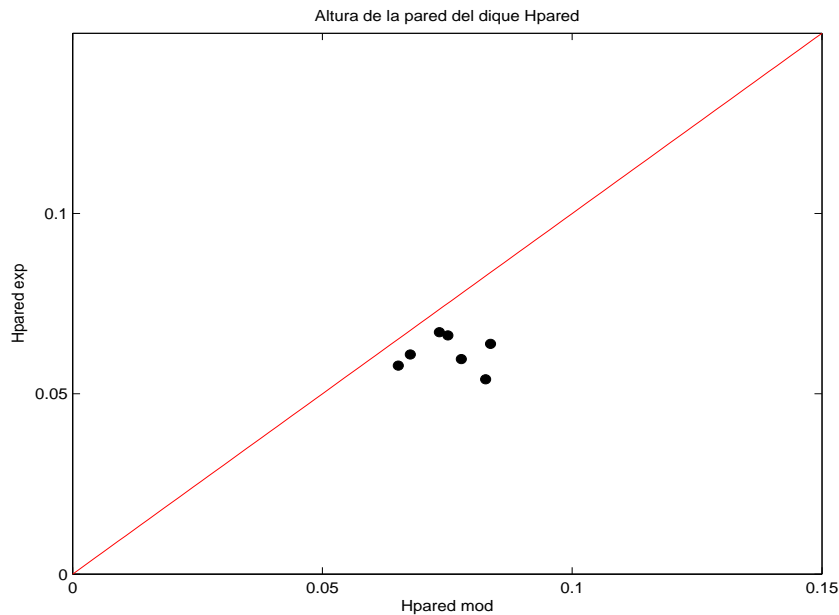


Figura B.19: Caso $D=52$ mm y $Ft=0$ m: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

– Coeficiente de reflexión K_R .

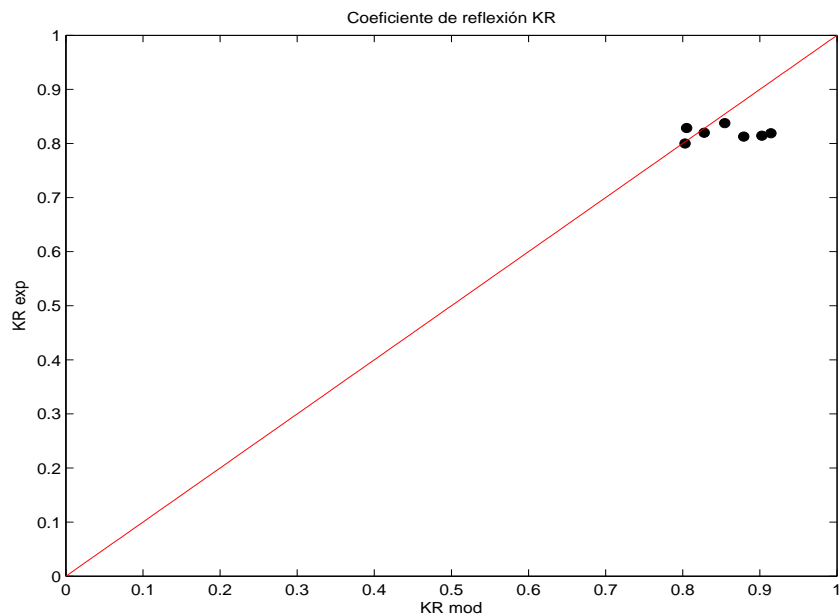


Figura B.20: Caso $D=52$ mm y $Ft=0$ m: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

B. Comparación de resultados numéricos y experimentales

– *Coefficiente de transmisión K_T .*

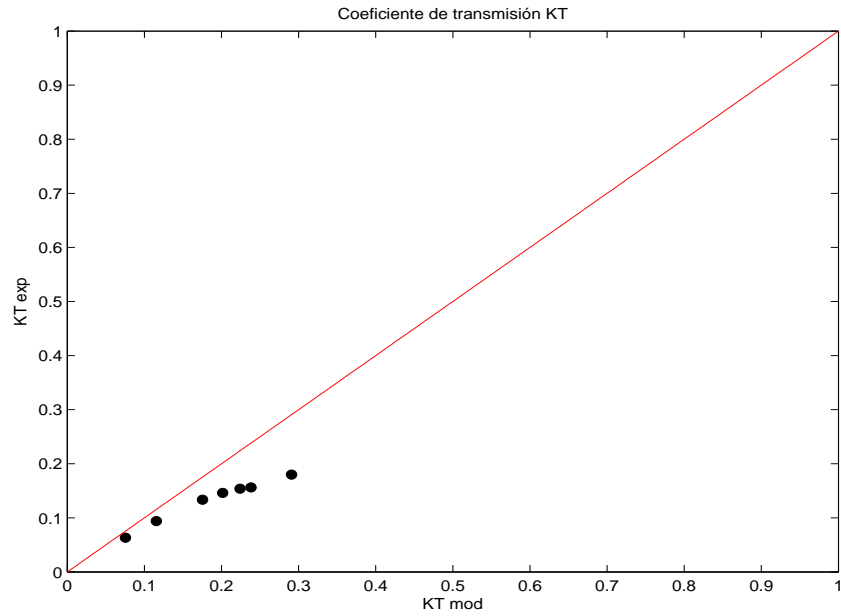


Figura B.21: Caso $D=52\text{mm}$ y $Ft=0\text{m}$: Comparación $K_{T\text{ mod}}$ vs $K_{T\text{ exp}}$ para todos los periodos T : [1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos

B.3.2. Geometría de dique con $Ft=0.2\text{ m}$

– *Altura de ola en la pared del dique H_{pared} .*

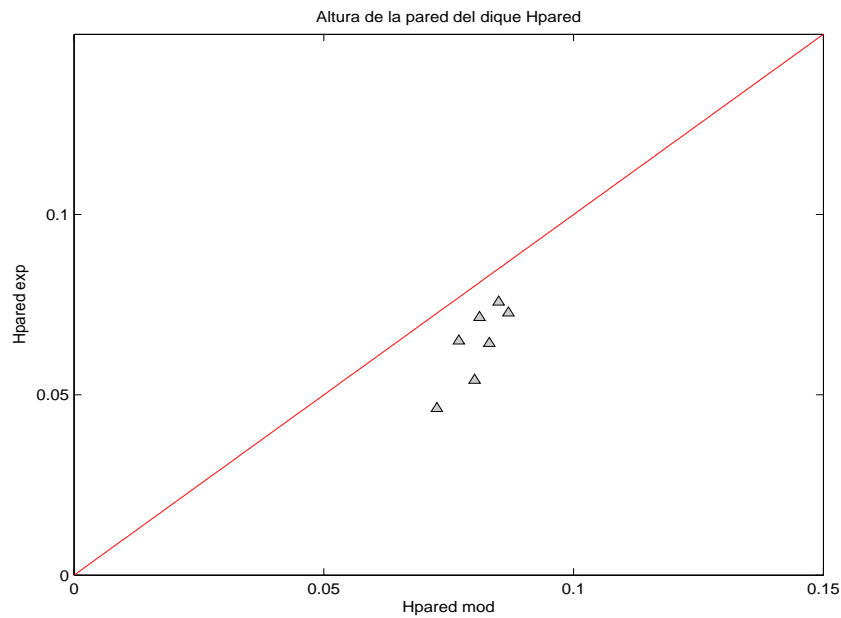


Figura B.22: Caso $D=52\text{mm}$ y $Ft=0.2\text{m}$: Comparación $H_{\text{pared mod}}$ vs $H_{\text{pared exp}}$ para todos los periodos T : [1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50] segundos

B. Comparación de resultados numéricos y experimentales

– Coeficiente de reflexión K_R .

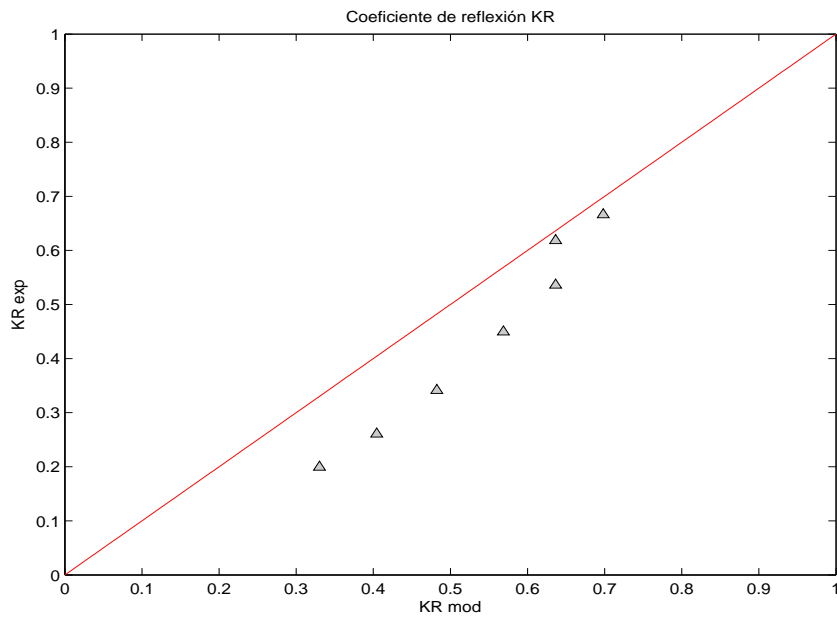


Figura B.23: Caso $D=52\text{mm}$ y $F_t=0.2\text{m}$: Comparación $K_{T\text{ mod}}$ vs $K_{T\text{ exp}}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

– Coeficiente de transmisión K_T .

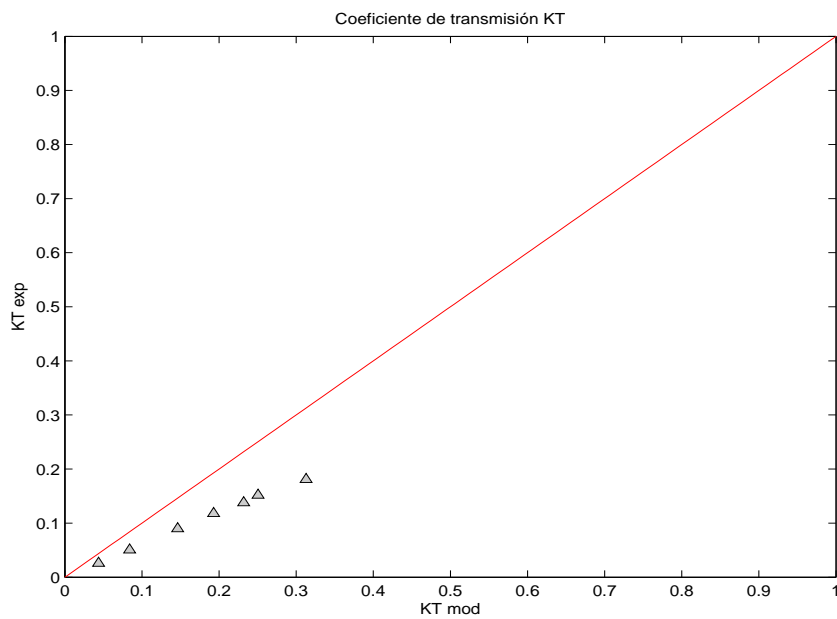


Figura B.24: Caso $D=52\text{mm}$ y $F_t=0.2\text{m}$: Comparación $K_{T\text{ mod}}$ vs $K_{T\text{ exp}}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

B.3.3. Geometría de dique con $Ft=0.4$ m

– *Altura de ola en la pared del dique H_{pared} .*

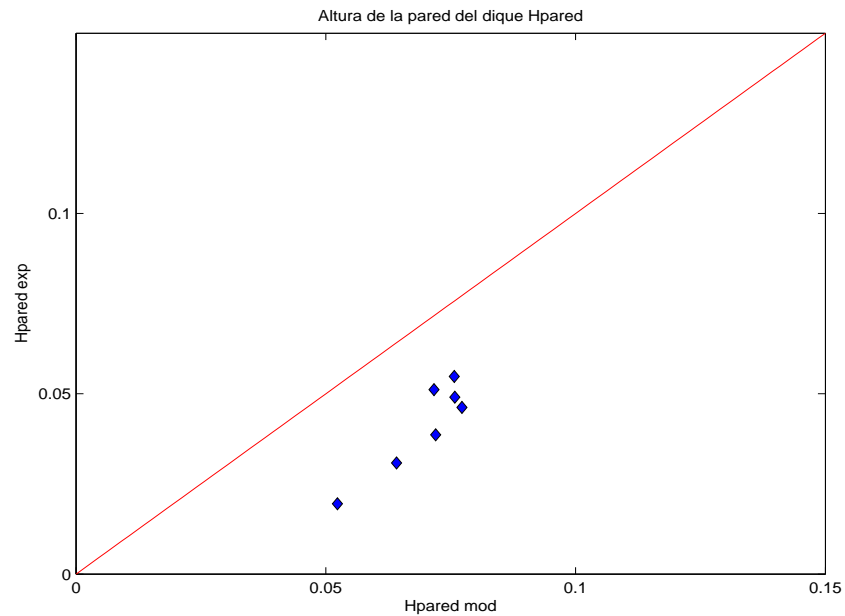


Figura B.25: Caso $D=52\text{mm}$ y $Ft=0.4\text{m}$: Comparación $H_{pared\ mod}$ vs $H_{pared\ exp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

– *Coefficiente de reflexión K_R .*

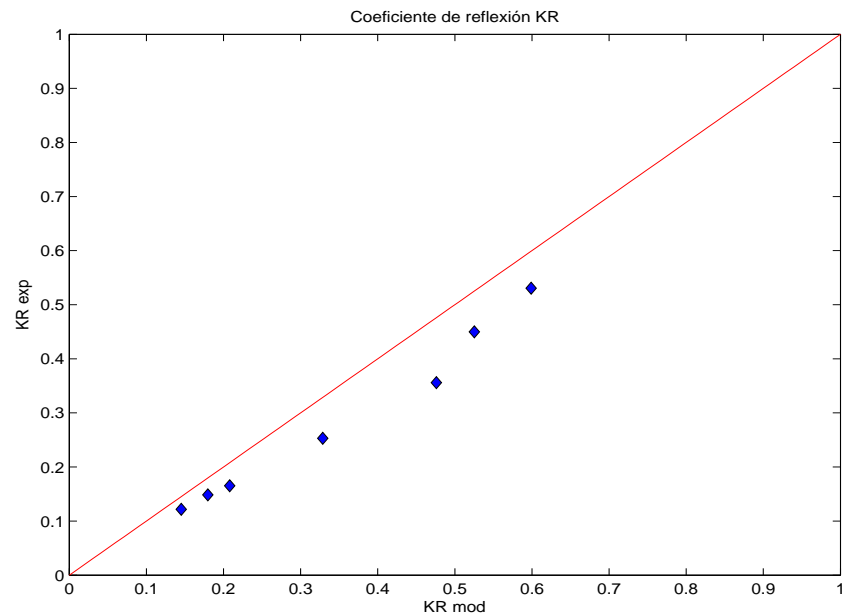


Figura B.26: Caso $D=52\text{mm}$ y $Ft=0.4\text{m}$: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

B. Comparación de resultados numéricos y experimentales

– Coeficiente de transmisión K_T .

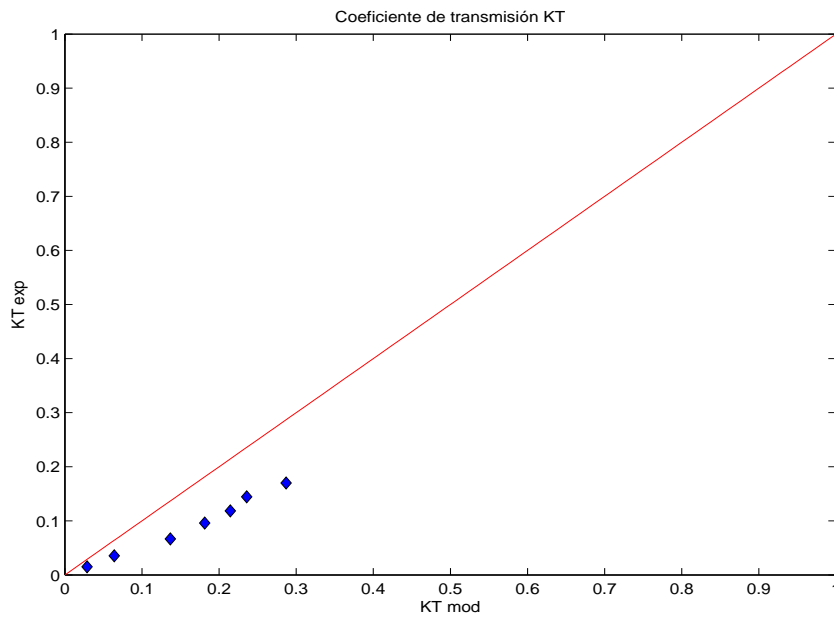


Figura B.27: Caso $D=52\text{mm}$ y $Ft=0.4\text{m}$: Comparación $K_{T\ mod}$ vs $K_{T\ exp}$ para todos los periodos $T:[1.05-1.25-1.50-1.75-2.00-2.25-2.50]$ segundos

Como se observan en las Figuras B.19-B.27 apenas existen variaciones en las comparaciones de los resultados del modelo numérico y experimentales con respecto al caso ensayado $D = 40\text{mm}$.

B.4. Resumen

A lo largo del Apéndice B se han comentado las principales diferencias y explicaciones del comportamiento de los valores que toman el coeficiente de reflexión, el coeficiente de transmisión y la altura de ola en la pared del dique. A modo de resumen y para recopilar toda la información desarrollada en este apartado, las conclusiones principales obtenidas del análisis de la comparación de los resultados numéricos y experimentales son:

- Los coeficientes de reflexión K_R son próximos a 1 y tanto mayores conforme disminuye el diámetro del material granular D y la altura del talud sobre la cimentación Ft . Existe gran reflexión del oleaje por el cambio brusco del medio de propagación debido a la presencia del dique.
- La capacidad de propagación del oleaje a través del dique es pequeña ya que la presencia de la estructura impide el paso del oleaje a su través, siendo algo mayor a medida que aumenta el diámetro del material D y la altura del talud sobre la cimentación Ft . Por tanto, los coeficientes de transmisión K_T son muy bajos en todos los casos ensayados.
- La energía incidente se distribuye principalmente en **energía reflejada** por la existencia de la obra marítima provocando un cambio en el medio de propagación, y en **energía disipada** por la rotura del oleaje y por fricción, aumentando a medida que aumenta su altura del talud sobre la cimentación Ft .

Bibliografía

- Baquerizo, A. (1995). *Reflexión del oleaje en playas. Métodos de evaluación y predicción*. PhD thesis, Universidad de Cantabria.
- Burchath, H. and Andersen, O. (1995). On the one dimensional steady and unsteady porous flow equations. *Coastal Engineering*, 24:233–257.
- Dalrymple, R., Losada, M., and Martín, P. (1991). Reflection and transmission from porous structures under oblique wave attack. *Journal of Fluid Mechanics*, 224:624–644.
- de Puertos y Costas, D. G., editor (1988). *Diques de Abrigo. Tres tomos*. Ministerio de Fomento.
- del Estado, P., editor (1986-2011). *Diques de Abrigo en los Puertos de Interés General del Estado*. Puertos del Estado. Ministerio de Fomento.
- Forchheimer, P. (1901). Wasserbewegung durch boden. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieur*, 45 edition.
- Goda, Y. (2000). Random seas and design of maritime structures. *Advanced Series on Ocean Engineering. World Scientific*, 15.
- Gu, Z. and Wang, H. (1991). Gravity waves over porous bottoms. *Coastal Engineering*, 15:497–524.
- Lara, J., Ruju, A., and Losada, I. (2011). Rans modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach. *Proc. of the Royal Society A-Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 467:1215–1242.
- Liu, P. (1998). *Numerical modeling of breaking waves*. PhD thesis, Cornell University.
- Losada, I., Dalrymple, R., and Losada, M. (1993). Water waves on crown breakwaters. *Journal of Waterway, Ports, Coastl and Ocean Engineering*, 119(4):111–119.
- Losada, I., Lara, J., Guanche, R., and González, J. (2008). Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 55:47–62.
- Losada, M. and Gimenez-Curto, L. (1979). The joint effect of the wave height and period on the stability of rubble mounds number. *Coastal Engineering*, pages 77–76.
- Negro, V. and Valera, O. (2008). *Diseño de Diques Rompeolas*. Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.
- Negro, V., Varela, O., García, J., and Santos, J. (2006). *Diseño de Diques Verticales*. Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.

- Pablo, L., Durango, C., and Samer, M. (2006). Optimization of Inspection and Maintenance Decisions for Infrastructure Facilities under Performance Model Uncertainty. A Quasi-Bayes Approach.
- Pérez, R., Ortega, S., and Moñino, L. (2009). Characteristics friction coefficients and scale effects in oscillatory porous flow. *Coastal Engineering*, pages 1827–1846.
- Polubarinova, K. (1952). Theory of groundwater movement. *Princeton University Press*.
- ROM1.0 (2009). Recomendaciones para Obras Marítimas. *Puertos del Estado*.
- ROM1.1 (2003). Recomendaciones para Obras Marítimas. *Puertos del Estado*.
- Shih, T., Zhu, J., and Lumley, J. (1996). Calculation of wall-bounded complex flows and free shear flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 23:1133–1144.
- Silva, L., Santos, J., Neves, M., Silvestre, C., Oliveira, P., and Pascoal, A. (2003). Tools for the Diagnosis and Automated Inspection of Semi-Submerged Structures.
- Sollit, C. and Cross, R. (1976). Wave reflection and transmission at permeable breakwater. *Technical paper U.S Army, Corps of Engineers*, pages 1827–1846.
- Takahashi, S. (1996). Desing of Vertical Breakwaters. *Institute. MT. Japan*.
- Tulsi, K. and Phelp, D. (2009). Monitoring and maintenance of breakwaters which protect port entrances.
- Van Gent, M. (1995). *Wave interaction with permeable coastal structures*. PhD thesis, Delft University of Technology.
- Vílchez, M. (2014). *Diseño unificado de diques de abrigo. En proceso*. PhD thesis, Universidad de Granada.