



**UNIVERSIDAD DE GRANADA
E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
ÁREA DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

**ANÁLISIS DE LA REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS
PROCEDENTES DE LA INDUSTRIA DE SILESTONE® EN LA
FABRICACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS**

**Granada
Octubre de 2009**

TESIS DOCTORAL

**Antonio Francisco
Belmonte Sánchez**

Editor: Editorial de la Universidad de Granada
Autor: Antonio Francisco Belmonte Sánchez
D.L.: Gr. 159-2010
ISBN: 978-84-692-8377-6

TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS DE LA REUTILIZACIÓN DE RESIUDOS PROCEDENTES DE LA
INDUSTRIA DE SILESTONE® EN LA FABRICACIÓN DE MEZCLAS
BITUMINOSAS**

Por

Antonio Francisco Belmonte Sánchez

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

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

Directores de Tesis:

Dña. M^a Carmen Rubio Gámez

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

D. Antonio Menéndez Ondina

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Granada, octubre de 2009

AGRADECIMIENTOS

Una vez recorrido gran parte del camino que ha supuesto la redacción de esta Tesis Doctoral, es necesario hacer una parada y repasar los hechos más importantes que han acaecido en este tiempo. Inevitablemente estos recuerdos y estos hechos, aunque a veces han sido difíciles, siempre han estado asociados a personas que han sido un apoyo fundamental para alguien que como yo retoma el contacto con el mundo universitario transcurrido un periodo de tiempo relativamente largo.

Agradecer en primer lugar el apoyo de mis Directores de Tesis, Antonio Menéndez y M^a Carmen Rubio, los cuales además de dirigirme magistralmente han tenido la suficiente paciencia para recorrer conmigo este camino tan largo sin desesperarse. Igualmente agradecer a Fernando Moreno su inestimable ayuda en la recopilación y análisis de información así como en la elaboración de la Tesis. A pesar de haber finalizado la carrera este año ha demostrado una personalidad, una madurez propios de una gran persona y unos conocimientos dignos de un gran ingeniero. Mil gracias también a los profesionales del Laboratorio de Ingeniería de la Construcción (LABIC) de la Escuela de Caminos de Granada.

Agradezco a la empresa Cosentino S.A. las facilidades dadas para disponer de su producto SILESTONE y sobre todo mi felicitación por los éxitos empresariales y tecnológicos conseguidos.

Mi agradecimiento, como no podía ser menos, a SACYR, mi empresa de toda la vida cuya estrategia empresarial apostando por tecnologías de vanguardia y sostenibles me ha facilitado bastante la realización de la Tesis. Igualmente agradezco a Antonio Ramírez, responsable del Departamento de I+D+i de SACYR y a Sergio Vega su colaboración de cara a organizar con eficacia los trabajos a pie de obra e interpretar los ensayos que han sustentado este trabajo.

Finalmente, doy las gracias a mi familia que ha tenido la paciencia suficiente para aguantar el tiempo que les he quitado durante la elaboración de la tesis y que con su comprensión y ánimos me han ayudado a terminar este trabajo, que les dedico.

RESUMEN

El nivel de desarrollo alcanzado en la sociedad actual ha traído consigo, además de una mejora sustancial en la calidad de vida y la implantación de un estado de bienestar próspero, la aparición de una serie de problemas que suponen una amenaza para garantizar la satisfacción de las necesidades futuras. El consumo desmedido de los recursos naturales, así como el aumento y diversificación de los residuos generados en la mayor parte de las actividades causantes de este desarrollo, han obligado a establecer sistemas de gestión y producción más eficientes, que permitan conseguir un proceso de evolución sostenible.

Una de las principales responsables de este progreso ha sido la proliferación de las infraestructuras, y en especial, de las carreteras. Como consecuencia de ello, éstas también se han convertido en una de las responsables de la actual situación de escasez de materias primas y acumulación de residuos, y por tanto, las técnicas de construcción utilizadas en ellas, están siendo encaminadas a minimizar el impacto generado sobre el medio ambiente.

En los últimos años, el desarrollo de técnicas basadas en la reutilización de residuos, ha permitido concebir a las carreteras como una posible solución a esta problemática. Concretamente, el empleo de residuos como sustitutivos de los áridos utilizados en su construcción, suponen, no solo la disminución de éstos en vertederos, sino también la reducción del impacto generado por la explotación de canteras y el transporte de áridos.

En este contexto, surge la investigación desarrollada por la presente tesis doctoral, cuyo objetivo es analizar la reutilización de residuos procedentes de la industria de Silestone® como sustitutivo de los áridos naturales, en la fabricación de mezclas bituminosas para su empleo en la construcción de firmes de carreteras.

El presente documento, recoge los trabajos llevados a cabo durante el desarrollo del estudio realizado, los cuales contemplan la caracterización de los residuos de Silestone® para su empleo en la fabricación de las mezclas asfálticas, el diseño en laboratorio de mezclas bituminosas con la incorporación de dichos residuos, y el análisis de la viabilidad de aplicación de éstas en obra mediante la ejecución de un tramo de prueba experimental.

Los resultados obtenidos tanto a nivel de laboratorio, como en obra, ponen de manifiesto la posibilidad de reutilizar los residuos de Silestone® como sustitutivos totales o parciales de los áridos naturales en la fabricación de mezclas bituminosas para capas de rodadura de carreteras.

Palabras Clave: Reutilización de residuos, mezclas bituminosas, Silestone®, áridos reciclados

ABSTRACT

The current level of economic development in the world today has brought with it a vast improvement in quality of life as well as a state of prosperity, which is enjoyed by much of the population. However, it has also generated a series of problems that jeopardize the possibility of satisfying future needs. The excessive consumption of natural resources as well as the increase and diversification of the waste generated by most industrial activities have obliged society to establish more efficient management and production systems that are conducive to a process of sustainable evolution.

One of the main activities responsible for economic progress is reflected in the proliferation of infrastructures, especially, roads and highways. However, at the same time, road and highway construction has also contributed to the current scarcity of raw materials and the accumulation of waste. As a result, new construction techniques are now being used with a view to minimizing environmental impact.

In recent years, the development of road construction techniques based on the reuse of waste material offers a possible solution to certain environmental problems. More specifically, the use of waste as a substitute for aggregate in road construction not only signifies a reduction in the volume of waste material in landfills, but also the reduction of the environmental impact generated by quarry exploitation as well as by the transport of aggregate to construction sites.

Within this context, the research presented in this PhD thesis analyzed the viability of using waste material from the Silestone® industry instead of natural aggregate in the manufacture of hot bituminous mixes for road surfacing.

This document describes the experiments and analyses performed during the course of the research study. These include the characterization of Silestone® for its use in the manufacture of hot bituminous mixes, the laboratory design of different types of bituminous mix made from Silestone® waste, and the testing and validation of the mixes on an actual road section.

The results obtained in the laboratory as well as at the construction site clearly show the viability of using Silestone® waste as a total or partial substitute for natural aggregate in the manufacture of bituminous mixes for surface courses.

Key Words: waste recycling, bituminous mixes, Silestone®, recycled aggregates

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	7
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
ÍNDICE DE GRÁFICOS	15
ÍNDICE DE FOTOS	17
ÍNDICE DE TABLAS	19
1. INTRODUCCIÓN	23
1.1. Justificación de la Tesis Doctoral.....	23
1.2. Contenido y Alcance de la Investigación.....	25
2. ESTADO DEL ARTE	27
2.1. Introducción	27
2.2. El Ser Humano y los Residuos	27
2.2.1. La Gestión de Residuos	30
2.3. Marco Normativo y Planes.....	35
2.3.1. Normativa Internacional	36
2.3.2. Normativa Europea	37
2.3.3. Normativa Estatal.....	52
2.3.4. Normativa Autonómica (Andalucía).....	60
2.3.5. Planes Nacionales y Autonómicos	62
2.4. Reutilización de Residuos en Carreteras.....	65
2.4.1. Incorporación de Residuos en Mezclas Bituminosas	67
2.4.2. Aplicaciones	93
2.5. Material Silestone®	104
2.5.1. Descripción del Material Silestone®	104
2.5.2. Descripción de los residuos Silestone®	111
2.6. Conclusiones (motivo de la tesis).....	113
3. OBJETIVOS	115

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

3.1. Introducción	115
3.2. Objetivo General	116
3.3. Objetivos Principales	117
3.4. Objetivos Secundarios	117
4. METODOLOGÍA.....	119
4.1. Introducción	119
4.2. Caracterización de los residuos de Silestone® para su reutilización en la fabricación de mezclas bituminosas	120
4.2.1. Tratamiento Previo de los Residuos	121
4.2.2. Plan de Ensayos General	124
4.2.3. Plan de Ensayos Específico	125
4.2.4. Plan de Ensayos Áridos Naturales	126
4.3. Diseño en laboratorio de mezclas bituminosas con la incorporación de residuos de Silestone®	127
4.3.1. Elección del tipo de mezcla y fórmulas de trabajo.....	129
4.3.2. Diseño de las fórmulas de trabajo.....	130
4.3.3. Fabricación y análisis del comportamiento de las mezclas en laboratorio.....	131
4.4. Análisis de la viabilidad de fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas con residuos de Silestone®	133
4.4.1. Descripción del tramo de prueba.....	135
4.4.2. Fabricación de las Mezclas	136
4.4.3. Extendido y Compactación del tramo de prueba.....	139
4.4.4. Análisis económico	140
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	141
5.1. Introducción	141
5.2. Caracterización de los residuos de Silestone® para su reutilización en la fabricación de mezclas bituminosas	142
5.2.1. Plan de Ensayos General	142
5.2.2. Plan de Ensayos Específico	147

Índice General

5.2.3. Plan de Ensayos Áridos Naturales.....	149
5.3. Diseño en laboratorio de mezclas bituminosas con la incorporación de residuos de Silestone®	153
5.3.1. Diseño de las fórmulas de trabajo	153
5.3.2. Análisis del comportamiento de las mezclas en laboratorio	175
5.4. Análisis de la viabilidad de fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas con residuos de Silestone®	190
5.4.1. Fabricación de las Mezclas.....	191
5.4.2. Extendido y Compactación del tramo de prueba	193
5.4.3. Análisis económico.....	199
6. CONCLUSIONES	203
6.1. Introducción	203
6.2. Caracterización de los residuos de Silestone® para su reutilización en la fabricación de mezclas bituminosas	204
6.3. Diseño en laboratorio de mezclas bituminosas con la incorporación de residuos de Silestone®	205
6.4. Análisis de la viabilidad de fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas con residuos de Silestone®	207
6.5. Conclusiones Finales	209
7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	211
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	213

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Funcionamiento de la planta discontinua utilizada para la fabricación de las mezclas en obra.	137
Gráfico 2. Ensayo de pérdida de peso por temperatura.	148
Gráfico 3. Curva Granulométrica F10-Convencional.	155
Gráfico 4. Curva de densidad Marshall F10-Convencional.	156
Gráfico 5. Curva de Huecos/Mezcla F10-Convencional.	157
Gráfico 6. Curva de estabilidad Marshall F10-Convencional.	157
Gráfico 7. Curva Granulométrica F10-1.	159
Gráfico 8. Curva de densidad Marshall F10-1.	160
Gráfico 9. Curva de Huecos/Mezcla F10-1.	160
Gráfico 10. Curva de estabilidad Marshall F10-1.	161
Gráfico 11. Curva Granulométrica F10-2.	162
Gráfico 12. Curva de densidad Marshall F10-2.	163
Gráfico 13. Curva de Huecos/Mezcla F10-2.	164
Gráfico 14. Curva de estabilidad Marshall F10-2.	164
Gráfico 15. Curva Granulométrica F10-3.	165
Gráfico 16. Curva de densidad Marshall F10-3.	166
Gráfico 17. Curva de Huecos/Mezcla F10-3.	167
Gráfico 18. Curva de estabilidad Marshall F10-3.	167
Gráfico 19. Curva Granulométrica F10-4.	168
Gráfico 20. Curva de densidad Marshall F10-4.	169
Gráfico 21. Curva de Huecos/Mezcla F10-4.	170
Gráfico 22. Curva de estabilidad Marshall F10-4.	170
Gráfico 23. Curvas Granulométricas de las mezclas estudiadas.	171
Gráfico 24. Curvas de densidades Marshall de las mezclas estudiadas.	172
Gráfico 25. Curvas de Huecos/Mezcla de las mezclas estudiadas.	173
Gráfico 26. Curvas de estabilidad Marshall de las mezclas estudiadas.	174

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

Gráfico 27. Gráfica de deformación del ensayo en pista mezcla F10-Convencional....	177
Gráfico 28. Gráfica de deformación del ensayo en pista mezcla F10-1.....	179
Gráfico 29. Densidades medias de las probetas de inmersión-compresión.....	186
Gráfico 30. Resistencias medias de las probetas de inmersión-compresión.....	187
Gráfico 31. Resistencias conservadas de las mezclas estudiadas ante el ensayo de inmersión-compresión.	187
Gráfico 32. Velocidades de deformación de las mezclas estudiadas en los ensayos de pista.	188
Gráfico 33. Deformaciones en el ensayo de pista de las mezclas estudiadas.	189
Gráfico 34. Comparativa de las resistencias conservadas de las mezclas diseñadas en laboratorio y extendidas en obra.....	196
Gráfico 35. Comparativa de las velocidades de deformación de las mezclas diseñadas en laboratorio y extendidas en obra.....	196
Gráfico 36. Análisis comparativos de los costes de las mezclas estudiadas.....	201
Gráfico 37. Proceso de la Investigación.	203

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1. Polvo de neumático.....	78
Foto 2. Material fresado de capas de firme.	79
Foto 3. Escorias de Acero.....	80
Foto 4. Residuos de Plástico.	81
Foto 5. Residuos de Vidrio.	82
Foto 6. RCD como áridos reciclados.	84
Foto 7. Cenizas Volantes.....	85
Foto 8. Residuos de bloques de mármol.	86
Foto 9. Residuos Sólidos Urbanos.....	87
Foto 10. Residuos de techos de asfalto.	88
Foto 11. Residuos de fibras.....	89
Foto 12. Residuos de Cobre.	89
Foto 13. Subproductos de Taconita.....	90
Foto 14. Lodos de depuradora.....	91
Foto 15. Residuos de hospital.....	92
Foto 16. Tramos Construidos en el estado de Arizona con mezclas que incorporan PNFU.	94
Foto 17. Tramo de prueba con residuo de vidrio (Reflexión nocturna).....	96
Foto 18. Tramo de prueba mezcla con residuos de cuero (carril de la izq.).	98
Foto 19. Puesta en obra de mezcla con escorias de acero (Tramo Necedal- Balparda).	103
Foto 20. Material Silestone®	106
Foto 21. Residuos lodos procedentes del lavado de Silestone®	112
Foto 22. Residuos procedentes del recorte de las tablas de Silestone®	112
Foto 23. Fracción 12/25 Silestone®.	121
Foto 24. Fracción 6/12 Silestone®	122
Foto 25. Fracción 0/6 Silestone®	122
Foto 26. Fracción 0/200 Silestone®.	123

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

Foto 27. Fracción 6/12 Silestone® definitiva.....	123
Foto 28. Fracción 0/3 Silestone® definitiva.....	124
Foto 29. Máquina Wheel Tracking utilizada en el ensayo de pista.....	133
Foto 30. Vista general del tramo de prueba.	136
Foto 31. Vista General de la planta y los acopios de áridos.	138
Foto 32. Temperatura de salida de la mezcla de la extendedora.....	194
Foto 33. Temperatura de compactación de las mezclas.....	194
Foto 34. Recogida de muestras a la salida de la extendedora.....	195
Foto 35. Ensayo de círculo de arena para la medida de la macrotextura.	197

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Planes Nacionales de Gestión de Residuos.....	63
Tabla 2. Planes Autonómicos Andaluces de Gestión de Residuos.	65
Tabla 3. Tramos ejecutados con mezclas que incorporan PNFU por la vía húmeda....	100
Tabla 4. Tramos ejecutados con mezclas que incorporan PNFU por la vía seca.....	101
Tabla 5. Plan de ensayos general de caracterización del residuo Silestone®.....	125
Tabla 6. Plan de ensayos específico de caracterización del residuo Silestone®.....	126
Tabla 7. Plan de ensayos general de caracterización de los áridos naturales.....	127
Tabla 8. Composición de las fórmulas de trabajo de las mezclas con Silestone® estudiadas.....	130
Tabla 9. Composición de la fórmula de trabajo de la mezcla convencional de referencia.	130
Tabla 10. Plan de ensayos para el control de fabricación de las mezclas.	139
Tabla 11. Resultados de Lixiviación del residuos Silestone®.....	143
Tabla 12. Análisis granulométrico de la fracción 6/12 de los residuos Silestone®.....	143
Tabla 13. Resultados de densidad y absorción de la fracción 6/12 de los residuos Silestone®.....	144
Tabla 14. Análisis granulométrico de la fracción 0/3 de los residuos Silestone®.....	145
Tabla 15. Resultados de densidad y absorción de la fracción 0/3 de los residuos Silestone®.....	146
Tabla 16. Resumen de Resultados de Plan General de Caracterización.	147
Tabla 17. Análisis Granulométrico árido ofítico.	149
Tabla 18. Resultados de densidad y absorción del árido ofítico.	150
Tabla 19. Análisis Granulométrico árido calizo.....	151
Tabla 20. Resultados de densidad y absorción del árido calizo.	151
Tabla 21. Análisis Granuométrico del filler cemento.	151
Tabla 22. Resumen de los resultados de caracterización de los áridos naturales.	152
Tabla 23. Propiedades de las mezclas tipo F10 para capas de rodadura.	154
Tabla 24. Encaje Granulométrico de la mezcla F10-Convencional.....	155

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

Tabla 25. Resultados del ensayo Marshall F10-Convencional.	156
Tabla 26. Composición F10-1.	158
Tabla 27. Encaje Granulométrico de la mezcla F10-1.	158
Tabla 28. Resultados del ensayo Marshall F10-1.	160
Tabla 29. Composición F10-2.	161
Tabla 30. Encaje Granulométrico de la mezcla F10-2.	162
Tabla 31. Resultados del ensayo Marshall F10-2.	163
Tabla 32. Composición F10-3.	165
Tabla 33. Encaje Granulométrico de la mezcla F10-3.	165
Tabla 34. Resultados del ensayo Marshall F10-3.	166
Tabla 35. Composición F10-4.	168
Tabla 36. Encaje Granulométrico de la mezcla F10-4.	168
Tabla 37. Resultados del ensayo Marshall F10-4.	169
Tabla 38. Resumen de las Granulometrías de las mezclas estudiadas.	171
Tabla 39. Contenidos Óptimos de Betún.	174
Tabla 40. Resistencias y densidades en seco F10-Convencional.	175
Tabla 41. Resistencias y densidades en húmedo F10-Convencional.	176
Tabla 42. Resultados Ensayos Pista F10-Convencional.	176
Tabla 43. Resistencias y densidades en seco F10-1.	177
Tabla 44. Resistencias y densidades en húmedo F10-1.	178
Tabla 45. Resultados Ensayos Pista F10-1.	178
Tabla 46. Resistencias y densidades en seco F10-2.	179
Tabla 47. Resistencias y densidades en húmedo F10-2.	180
Tabla 48. Resultados Ensayos Pista F10-2.	180
Tabla 49. Gráfica de deformación del ensayo en pista mezcla F10-2.	181
Tabla 50. Resistencias y densidades en seco F10-3.	181
Tabla 51. Resistencias y densidades en húmedo F10-3.	182
Tabla 52. Resultados Ensayos Pista F10-3.	182
Tabla 53. Gráfica de deformación del ensayo en pista mezcla F10-3.	183

Índice de Tablas

Tabla 54. Resistencias y densidades en seco F10-4.....	183
Tabla 55. Resistencias y densidades en húmedo F10-4.	184
Tabla 56. Resultados Ensayos Pista F10-4.	184
Tabla 57. Gráfica de deformación del ensayo en pista mezcla F10-4.	185
Tabla 58. Resumen de resultados ensayos de inmersión-compresión.	186
Tabla 59. Resumen de resultados ensayos de pista.	188
Tabla 60. Granulometría de los residuos de Silestone® tras la amasada en blanco. ...	191
Tabla 61. Resultado del ensayo de resistencia a la fragmentación de los residuos de Silestone® tras la amasada en blanco.....	191
Tabla 62. Ensayos de control de fabricación de las mezclas tras la amasada de prueba.	192
Tabla 63. Resultados de los ensayos de control de fabricación de las mezclas tras la amasada de prueba.	192
Tabla 64. Resultados del ensayo IRI previo al extendido de las mezclas.	193
Tabla 65. Resultados de los ensayos de control de las muestras recogidas en el extendido.	195
Tabla 66. Resultados de los ensayos de Macrotextura.	197
Tabla 67. Resultados del ensayo IRI tras el extendido de las mezclas.	198
Tabla 68. Resultados del ensayo IRI tras a los seis meses del extendido de las mezclas.	198
Tabla 69. Comparativa de los resultados de los ensayos IRI de las mezclas estudiadas.	199
Tabla 70. Costes de las materias primas de fabricación de la mezcla.....	200
Tabla 71. Costes de fabricación y gestión de acopio.....	200
Tabla 72. Costes de transporte.....	200
Tabla 73. Costes de extendido.....	201
Tabla 74. Costes totales de la puesta en obra de las mezclas.....	201
Tabla 75. Tendencia del aumento del residuo en mezcla ante el ensayo Marshall.....	206
Tabla 76. Tendencia del aumento del residuo en mezcla ante el ensayo de inmersión-compresión.	206

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación de la Tesis Doctoral

Desde los comienzos de la era industrial a finales del siglo XVIII, la constante evolución tecnológica ha permitido alcanzar unos niveles de desarrollo que han tenido como consecuencia una mejora en la calidad de vida y la instauración de un nuevo tipo de sociedad caracterizada por un aumento en el consumo de bienes y servicios. Este hecho, además de producir un notable incremento demográfico, también ha propiciado la proliferación del número de industrias y la diversificación de las actividades desarrolladas por el ser humano. A pesar de ello, el nivel de progreso alcanzado no solo ha tenido asociadas consecuencias positivas, también ha propiciado una serie de inconvenientes que suponen una amenaza seria para el medio ambiente y el desarrollo futuro.

Por una parte, el aumento en la cantidad y variedad de los residuos generados por las diferentes industrias, ha provocado la aparición de problemas en su gestión, dando lugar a un crecimiento de la acumulación de éstos en vertederos, con los impactos que ello conlleva. Por otra, la tendencia marcada por la sociedad de consumo ha incurrido en un incremento obligado de la producción, que se ha visto traducido en un aumento del consumo de los recursos naturales, generándose problemas de escasez cada vez mayores en el abastecimiento de las materias primas utilizadas en las actividades causantes de este desarrollo.

Debido a esta problemática, a partir de la segunda mitad del siglo XX la sociedad empieza a tomar conciencia social de la necesidad de minimizar el impacto causado por el proceso evolutivo y aparece una nueva forma de concebir el desarrollo, basada en promover un consumo y un sistema de producción apropiados en la perspectiva de proporcionarnos las necesidades de hoy sin comprometer las de mañana. Así, hoy en día, parece ya bastante instaurado el concepto de sostenibilidad en la mayor parte de

las actividades desarrolladas por el ser humano. Esta política también ha irrumpido con fuerza en la industria de la construcción, inculcando en ella la necesidad de una gestión eficiente de los escasos recursos naturales que el medio aporta y fomentando el desarrollo de técnicas que permitan reutilizar los residuos que en ella se generan. En este orden, desde los gobiernos e instituciones de los diferentes países se están desarrollando grandes esfuerzos que permitan dar uso a dichos materiales, reduciendo de esta forma las repercusiones ambientales y económicas que éstos suscitan [1,2].

Una de las actuaciones de mayor importancia dentro de la construcción, y que ha tenido mayor influencia en el nivel de desarrollo alcanzado, es la construcción de carreteras. En general, esta actividad supone un consumo importante de recursos naturales, donde concretamente, la fabricación de las mezclas bituminosas utilizadas en las capas del firme, lleva asociado el empleo de grandes cantidades de áridos. La mayoría de estos áridos proceden de la explotación de canteras, provocando graves efectos medioambientales, así como importantes pérdidas energéticas y económicas. Además, los problemas de escasez motivados por los excesos en el consumo de estos materiales, unidos a las cada vez mayores restricciones ambientales en torno a la explotación de las canteras, han repercutido en el aumento de los costes y la dificultad para encontrar áridos de buena calidad para la construcción de firmes.

Como consecuencia de este hecho, y siguiendo la política de sostenibilidad anteriormente comentada, empiezan a aparecer en el sector técnicas de nueva aplicación en las que ciertos residuos son utilizados como sustitutivos de los materiales convencionales [3-13]. El beneficio obtenido con esta operación es doble, puesto que las carreteras además de convertirse en un área potencial para la reutilización de residuos (disminuyendo la cantidad de éstos en los vertederos), también contribuyen con la reducción de los impactos medioambientales asociados a la explotación de canteras y el transporte de áridos.

En este contexto se desarrolla la investigación presentada en la siguiente tesis doctoral, la cual tiene por objeto analizar la posibilidad de sustitución de los áridos

naturales que se emplean tradicionalmente en la fabricación de mezclas bituminosas por residuos procedentes de otra actividad industrial, concretamente de la industria de Silestone®, que hasta la fecha son acumulados en vertederos.

1.2. Contenido y Alcance de la Investigación

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

En el capítulo 2 se realiza un estudio del estado del arte de todo lo que ha sido a lo largo de la historia la relación entre el ser humano y los residuos, y la evolución sufrida por los sistemas de gestión de residuos. Además, se recoge el marco normativo vigente (nacional e internacional) concerniente a este tema. Como antecedentes a nuestro estudio, se lleva a cabo un análisis de las diferentes aplicaciones de residuos en carreteras, y en especial a mezclas bituminosas. En éste se describe el procedimiento a seguir para la incorporación del residuo, las normativas específicas sobre el tema de especial aplicación en carreteras, y se resumen las principales aplicaciones en la fabricación de mezclas bituminosas llevadas a cabo hasta la fecha. Finalmente, como conclusión a esta parte de antecedentes se realiza una breve descripción del producto Silestone® y de los residuos generados en su industria.

Una vez finalizada la revisión de conocimientos, en el capítulo 3 se analiza la problemática existente en torno al tema de la generación de residuos y la cada vez mayor escasez de materiales para la construcción, exponiéndose de forma clara y concisa los objetivos del presente estudio, jerarquizándolos en objetivo general, principales y secundarios.

En el capítulo 4 se explica la metodología seguida en toda la investigación, especificando cada uno de las etapas a seguir y ensayos a realizar para la consecución

de los objetivos propuestos. En primer lugar se detallarán los pasos para la caracterización de los residuos para su incorporación en mezclas bituminosas para carreteras. Posteriormente, se describirá el proceso de diseño de las mezclas bituminosas con la incorporación de residuos procedentes de Silestone®. Finalmente, se analizarán los trabajos para la validación de la utilización de las mezclas diseñadas en obra y la viabilidad de su empleo.

Explicada la metodología a seguir, en el capítulo 5 se desarrollan y analizan los resultados de la totalidad de los ensayos realizados durante la investigación. Para ello se sigue el mismo orden que en la metodología. En base a estos resultados, podrá valorarse si es posible o no el cumplimiento de los objetivos propuestos en la tesis.

Las conclusiones más interesantes obtenidas en la investigación se recogen en el capítulo 6, y a continuación, en el capítulo 7, se plantean las posibles futuras líneas de investigación.

El último apartado expone las referencias bibliográficas que se han utilizado a lo largo de la investigación.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

Durante el desarrollo de este capítulo, se llevará a cabo un estudio del estado del arte de la problemática concerniente al tema de los residuos. Se analizará la evolución sufrida desde la aparición de éstos, hasta nuestros días, y se profundizará en las diferentes políticas de gestión llevadas a cabo a lo largo de la historia.

Como parte manifiesta de esta evolución, se analizarán las diferentes normativas y legislaciones vigentes (nacionales e internacionales), referidas a la gestión de residuos que tienen incidencia en nuestro país.

Centrándonos en el objeto de la tesis, se profundizará en la reutilización de residuos en carreteras, y más concretamente, en la fabricación de mezclas bituminosas. Para ello se llevará a cabo la descripción de la técnica seguida, se analizará la normativa específica existente al respecto, y se recapitularán los diferentes residuos que hasta la fecha, han sido reutilizados en la fabricación de mezclas asfálticas. Además, en este capítulo se recogen también algunas de las experiencias realizadas tanto a nivel mundial, como estatal, donde han sido aplicadas este tipo de mezclas.

Finalmente, se procederá a la descripción del material objeto de estudio en esta investigación. Se examinará la composición y modo de fabricación de Silestone[®], así como de los residuos producidos durante su manufactura.

2.2. El Ser Humano y los Residuos

Desde los tiempos más remotos, el ser humano se ha esforzado por desarrollar actividades que le han permitido subsistir y evolucionar. En un principio, dichas actividades se limitaban a consumir directamente los recursos que el medio ofrecía, sin producir alteración alguna en la naturaleza ya que los residuos generados eran

básicamente orgánicos, perfectamente asumibles por el medio ambiente. Con el perfeccionamiento de actividades como la ganadería o la agricultura aparecieron los primeros asentamientos, aumentando por tanto la generación de esos residuos, los cuales se depositaban en el entorno más inmediato en basureros fuera de los núcleos de población o se empleaban como abono, alimento para el ganado o como materiales para la construcción de viviendas.

Los avances tecnológicos desarrollados en la edad antigua dieron lugar a la aparición de las primeras grandes civilizaciones e imperios (Egipto, Grecia y Roma), pero también de nuevos tipos y mayores cantidades de residuos (metales como el acero o el cobre, aunque en su mayoría seguían siendo de tipo orgánico). La acumulación de basuras en las ciudades se convierte en un problema serio, provocando focos de epidemias y por tanto surge la nueva necesidad de establecer medidas innovadoras en la gestión de residuos. Puede destacarse la labor de los romanos en este campo puesto que fueron los primeros en encontrar soluciones como la construcción de redes de alcantarillado urbano o de vertederos a las afueras de las ciudades.

La evolución sufrida en el tratamiento de los residuos, entra en retroceso con la irrupción de las civilizaciones germánicas. Durante toda la edad media y hasta el S. XVIII, la importancia dada a la administración de los desechos producidos fue prácticamente nula (lo más que se realizaban eran tratamientos básicos como la reutilización de parte de la basura doméstica como estiércol, alimento para el ganado...), motivo por el cual aparecieron las grandes epidemias que durante todo este periodo asolaron los principales núcleos de población.

Con la llegada de la revolución industrial a finales del siglo XVIII y principios del XIX, los problemas con los residuos se multiplicaron, debido principalmente al importante incremento de la población (y por tanto de los residuos) y a la diversificación de las actividades realizadas (aparecen un gran número de nuevas industrias y con ellas de nuevos residuos). Este hecho trajo consigo la necesidad de establecer mejoras en la gestión de los residuos y el empleo de nuevas tecnologías para optimizar su

tratamiento. En la segunda mitad del S.XIX aparecen las primeras incineradoras, planes de gestión de residuos y tratamiento de aguas, pero a pesar de ello, las epidemias siguieron haciendo estragos debido a las precarias condiciones de la salud pública.

Con la aparición de la sociedad de consumo, la cantidad y variedad de residuos generados creció exponencialmente, alcanzándose las mayores cotas en la segunda mitad del S.XX. Debido a las mejoras producidas en la sanidad y alimentación de la población, el tamaño de las ciudades se multiplicó. Además, la tendencia al consumo motivó que se pasara del concepto de producir “para toda la vida”, a la costumbre de que los objetos y aparatos utilizados se quedaran obsoletos en poco tiempo, incrementando así la producción de residuos. Aparecen nuevos tipos de residuos y surgen nuevas necesidades, tratamientos especiales, nuevos modelos de gestión, empieza a tomarse conciencia de la necesidad de minimizar su impacto. La mejora en la gestión y el empleo de nuevas tecnologías para optimizar su tratamiento, supusieron el inicio de un movimiento social e institucional cada vez más amplio. Este movimiento generó la creación de textos legislativos más serios y la aparición de nuevos conceptos y principios como “sostenibilidad”, “quien contamina paga” o el principio de las “3 erres” (Reducir, Reciclar y Reutilizar), los cuales han contribuido a dar el giro definitivo para reducir la producción y acumulación de residuos.

En efecto, desde la aparición de esta nueva conciencia social, las políticas desarrolladas por los gobiernos e instituciones de los diferentes países han ido encaminadas hacia la inculcación de una gestión eficiente de los recursos naturales que el medio aporta, fomentando el desarrollo de técnicas que permitan reutilizar los residuos generados en nuestra sociedad. El objetivo actual es la búsqueda del “residuo cero”, es decir, intentar en la medida de lo posible que las actividades llevadas a cabo por el ser humano no produzcan ningún tipo de residuo, convirtiendo a éstos en subproductos reutilizables.

2.2.1. La Gestión de Residuos

Actualmente, la gran mayoría de los países se encuentran muy lejos de este objetivo “residuo cero”. Según datos estimados por la OECD (Organisation for Economic Co-operational and Development) [14], en el mundo se generan más de 10000 millones de toneladas de residuos cada año. Solo en la Unión Europea, se generan casi 2000 millones de toneladas [15], colaborando España con más de 60 millones de toneladas de residuos al año [16]. La producción de tal cantidad de desechos hace que la gestión de residuos juegue un papel fundamental en el esfuerzo por conseguir este objetivo. Las directrices seguidas por dicha gestión han ido evolucionando a lo largo de los años, pasando del empleo de acciones paliativas, cuya finalidad es tratar de disminuir los efectos provocados por los residuos, al de preventivas, las cuales se esfuerzan por evitar que dichos residuos aparezcan. En base a esto, actuaciones como el almacenamiento o la destrucción (tradicionalmente utilizadas como actuaciones de gestión de residuos), han dejado de ser eficientes desde el punto de vista medio ambiental, viéndose sustituidas por nuevas actuaciones cuyo objetivo principal es la reinserción del residuo en el ciclo de producción mediante el reciclado de sus componentes. El producto no solo ha de servir para satisfacer las necesidades para las que ha sido creado, sino que además en su concepción se deben integrar los aspectos necesarios que faciliten su destino después de su vida útil.

La política de gestión basada en los principios de acción preventiva, consiste básicamente en evitar la producción de residuos y reducir el contenido de materiales peligrosos de los mismos. Esta estrategia supone la integración de los problemas relacionados con los residuos desde la fase de diseño y concepción del producto. El objeto de estos principios es abarcar todo el ciclo del producto, desde la producción hasta la transformación en residuo, pasando por toda su vida útil. Por regla general, los costes y responsabilidades debidos a la eliminación de residuos siempre han repercutido en el medio ambiente o en el contribuyente, pero con la aparición de esta nueva forma de gestión donde “quien contamina paga”, los daños al medio ambiente

han de corregirse en la fuente misma. De manera que, la responsabilidad principal de una buena gestión de los residuos corresponde a los fabricantes de los productos. Al ser ellos los que toman las decisiones de diseño, concepción, composición del producto o materiales utilizados, son también los que condicionan que la reutilización o recuperación de los residuos generados por sus productos sea más o menos viable.

A pesar de ello, estos principios de prevención aún no son del todo aplicables en la gestión de residuos. Ésta ha de conservar un carácter flexible y aplicarse no solo teniendo en cuenta la solución menos perjudicial para el medio ambiente, sino también la más favorable económica y socialmente. Para que dichos factores no primen siempre sobre los ambientales, desde los distintos organismos gubernamentales se está llevando a cabo el establecimiento de medidas que permitan asegurar la gestión adecuada de los residuos. Además de fomentar y favorecer la reutilización y el reciclado (reduciendo así la necesidad de producir nuevos productos y, por tanto, nuevos residuos), se incrementan los costes de eliminación de residuos y explotación de recursos naturales, obligando a los productores a llevar a cabo la reutilización de los residuos disponibles. Recurrir a instrumentos económicos, como los impuestos sobre productos que no pueden ser objeto de reutilización o reciclado, es una de las opciones más comunes en las políticas de gestión de residuos actuales. Otra de las opciones contempladas es animar a los consumidores a que adquirieran productos menos contaminantes, procedentes de materiales valorizados o que puedan, a su vez, ser objeto de reutilización o reciclado. Para ello, se está intentando impulsar la información y formación de los consumidores de manera que se consiga modificar los modelos de consumo establecidos actualmente. Como puede verse, la necesidad de un esfuerzo conjunto entre todos los ámbitos (locales, regionales, nacionales y comunitarios) es fundamental para conseguir una gestión de residuos eficiente.

Actividades desarrolladas en la Gestión de Residuos

Las principales actividades que engloba la gestión de residuos son: la **identificación y caracterización** en el lugar de producción (el productor deberá averiguar el grado de peligrosidad que implica su manipulación, tanto para el manejo dentro de su propia industria como para poder acondicionarlo y etiquetarlo convenientemente para su envío a la recuperación o eliminación), el **almacenamiento en el lugar de origen** antes de su recogida, la **recogida** (la cual engloba además la clasificación, agrupación y preparación para el transporte), el **transporte** a su destino final (cada residuo tiene sus propias normas al respecto), el **almacenamiento** en el destino final (el cual no será, superior a un año si su fin es la eliminación, superior a dos años si su destino final es la valorización y en ningún caso superior a seis meses si se trata de un residuo catalogado como peligroso), por último los residuos pueden ser **valorizados** (si se aprovechan los recursos contenidos en dichos residuos sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar perjuicios al medio ambiente) o bien **eliminados** (si su fin es su vertido o su destrucción, total o parcial, llevados a cabo sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar daños al medio ambiente). De entre todas estas actividades relacionadas con la gestión de residuos, las dos últimas son las que poseen una mayor importancia, puesto que son las encargadas de dar fin al ciclo del residuo (el conjunto de procesos concebidos como procesos de valorización y eliminación de residuos vienen recogidos en la Orden MAM/304/2002).

Valorización

La reutilización de un producto contribuye directamente a evitar la producción de residuos, siempre y cuando sea aceptable desde un punto de vista ambiental. Aplicando la máxima de la sostenibilidad, si es imposible evitar la producción de un residuo, al menos, éste debe ser reutilizado o han de recuperarse sus materiales y/o energía. Por tanto, en toda política sostenible de gestión de residuos la *valorización* se convierte en un factor clave. Dentro de la valorización existen dos opciones

diferenciadas, la *valorización de materiales*, consistente en la transformación, total o parcial, del material contenido en los residuos para elaborar nuevos productos, y la *valorización energética*, cuyo fundamento se basa en la reutilización de los residuos a modo de combustible para la producción de energía.

- **Valorización de materiales:**

Se trata de la opción de mayor efectividad ante la problemática de los residuos. Siempre que sea posible ha de hacerse el esfuerzo por realizar ésta antes que la valorización energética o la eliminación. La principal dificultad en su aplicación es el aumento constante de la complejidad de los productos (su composición, estructura,...), y la falta de inversiones en la industria del reciclado, que impiden que el desarrollo de esta operación no sea del todo efectiva. A medida que la gestión de residuos evolucione, será preciso llevar a cabo un esfuerzo en favor del desarrollo de esta industria, incorporando tecnologías más sofisticadas y nuevos métodos que permitan un tratamiento rentable de todo tipo de residuos. La coordinación entre todas las partes de la cadena productiva es básica para que pueda fomentarse la valorización de materiales pero, el hecho de que sólo puedan tratarse productos sencillos, hace que el papel de los consumidores sea fundamental (ellos son los que deben realizar el primer esfuerzo de separación de materiales para que sea más fácil llevar a cabo su revalorización).

Para combatir esta posible falta de conciencia de los consumidores y de tecnología, desde los diferentes organismos de gestión tratan de crearse instrumentos económicos, jurídicos y administrativos que permitan incentivar y promocionar el empleo de materiales reciclados.

- **Valorización energética:**

La valorización energética no puede considerarse como una operación de reciclado, puesto que realmente no existe recuperación del residuo utilizado. A

pesar de ello se trata de una de las actividades más importantes en la gestión de residuos. Los esfuerzos actuales en torno a esta técnica van encaminados a la consecución de la mayor eficacia posible en la energía producida, así, se está intentando que esta opción solo sea aplicable a residuos que sean capaces de proporcionar un beneficio energético neto.

Las emisiones de las instalaciones de valorización energética deben reducirse al mínimo y cumplir la normativa. En la Unión Europea, con la creación de la nueva Directiva Marco (sobre la que hablaremos en el siguiente punto referente al marco normativo) se separa el límite entre valorización energética y eliminación por incineración en función a si se alcanza, o no, un valor de eficiencia energética mínimo establecido.

Eliminación

Las dos principales actuaciones empleadas para la eliminación final de residuos son la incineración sin recuperación de energía y el vertido de residuos en lugares seguros. A pesar de que aún hoy en día existen algunos casos, las actuaciones que atentaban seriamente contra el medio ambiente, como el vertido de residuos en el mar o su depósito en cualquier lugar sin necesidad de estar habilitado para ello, se han reducido de forma muy considerable.

La principal ventaja de este tipo de tratamiento frente a la valorización de residuos es la dificultad de sumar los costes ambientales en los precios fijados para esta actividad (la cual resulta excesivamente barata en comparación con la valorización). De esta forma, al ser más rentable económicamente hablando, la mayoría de los gestores de residuos se decantan por este procedimiento, estableciendo un desequilibrio entre el coste de eliminación y el beneficio propiciado al medio ambiente. Hoy en día, la política seguida trata de restablecer dicho equilibrio, intentado que el precio fijado para dichas actividades refleje exactamente los costes reales de la operación, teniendo en cuenta los precios de cierre y el posterior control de las instalaciones.

A pesar de que en ciertas ocasiones es la única forma posible de eliminación de residuos, el vertido es la acción que mayor impacto tiene sobre el medio ambiente. En cualquier estrategia de gestión de residuos ha de evitarse el vertido o, como mínimo, reducir al máximo la presencia de éstos en vertederos. Como armas fundamentales para luchar contra esta opción se tienen la clasificación, tratamiento previo, valorización, o eliminación por incineración. A pesar de ello, resulta complicado ya que se trata de la opción más fácil, y de menor coste económico.

2.3. Marco Normativo y Planes

La traducción más inmediata del cambio de conciencia social producido en torno a la problemática de los residuos, ha sido la proliferación en los últimos años del marco normativo relacionado con este tema. A pesar de la amplitud y carácter fluctuante de este tipo de normas, en este apartado se llevará a cabo una recopilación de los principales textos normativos vigentes que afectan a la gestión de residuos en nuestro país [17]. Para mayor claridad, este estudio se realizará a diferentes niveles, pasando desde un primer ámbito internacional y europeo, al ámbito nacional y autonómico, para centrarnos finalmente en la comunidad autónoma andaluza, lugar donde se ha desarrollado la investigación aquí presentada.

Como análisis general de este conjunto de textos normativos, podemos decir que en ellos se evidencia claramente la relación entre la evolución sufrida por la gestión de residuos (explicada en el apartado anterior) y las políticas adoptadas por los diferentes gobiernos. Así, de la legislación de los primeros años basada en políticas de **tratamiento sobre los propios residuos** (tratamientos al final de línea de producción basados en la eliminación), tras la irrupción del concepto “desarrollo sostenible”, se pasa a la creación de normas económicamente más eficaces en las que se trata integrar los costes ambientales y exigir mayor eficacia a los procesos industriales, y posteriormente, a normas que establecen la responsabilidad principal sobre el

productor, creando la política integrada del producto (las citadas **preventivas** o de cabeceara de línea).

2.3.1. Normativa Internacional

Dada la amplitud de la información concerniente a temas legislativos internacionales en materia de residuos, a continuación se recoge la legislación internacional (junto con su transcripción al BOE) que ha tenido una incidencia más directa en nuestro país:

- **Convenio de Basilea de 22 de Marzo de 1989**, sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. *BOE 227, de 22-09-94.*
- **Instrumento de Ratificación del Convenio de Basilea** sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, hecho en Basilea el 22 de Marzo de 1989. *BOE de 22-09-94.*
- **Enmienda al anejo I y de la adopción de los anejos VIII y IX del Convenio de Basilea** sobre control de movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, hecho en Basilea el 22 de marzo de 1989, adoptados en Kuching (Malasia) el 27 de febrero de 1998. *BOE 120, de 20-05-99.*
- **Instrumento de Ratificación del Convenio de Estocolmo**, sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes el 22 de mayo de 2001. *BOE 151, de 23-06-2004.*
- **Adopción del Anejo G del Convenio de Estocolmo** sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes, adoptado en Punta del Este (Uruguay) el 6 de Mayo de 2005. *BOE de 04-10-2007.*
- **Real Decreto 9/2005, de 14 de enero**, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. *BOE 15, de 18-1-2005.*

- **Corrección de errores del Convenio de Basilea**, sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. *BOE 71, de 22-03-2008.*

2.3.2. Normativa Europea

En la Comunicación de la Comisión de 21 de diciembre de 2005 se define la estrategia comunitaria sobre prevención y reciclado de residuos. Esta estrategia establece las orientaciones para la actuación de la Unión Europea y describe los medios que permiten mejorar el tratamiento de los residuos. Su objetivo se adapta a la tendencia seguida por la política general de gestión de residuos, es decir, reducir los impactos ambientales generados por los residuos, desde su producción hasta su eliminación, pasando por su reciclado. Además, prevé una simplificación de la legislación estableciendo fusiones entre diferentes directivas.

Los objetivos de la legislación comunitaria anteriores a la adopción de esta estrategia siguen siendo válidos: limitar los residuos, fomentar su reutilización, reciclado y recuperación. Pero además, se prevé animar al sector del reciclado para que reintroduzca los residuos en el ciclo económico, en forma de productos de calidad, y estableciendo unos objetivos cuantitativos de reciclado.

La necesidad de disminuir las cantidades de residuos enviadas a vertederos, recuperar más compost y energía a partir de éstos y mejorar el reciclado (cuantitativa y cualitativamente), pasan por las nuevas posibilidades de gestión que esta estrategia pretende crear. Los beneficios ofrecidos por ésta han de ser una mayor eficacia y una mejor relación calidad-precio, una disminución de los costes y de los obstáculos a las actividades de reciclado y una reducción de la contaminación provocada por los residuos.

Legislación Europea

Pasamos a continuación a recapitular algunas de las normas más importantes establecidas en la Unión Europea en relación con los residuos. Conviene recordar que las principales normas contenidas en ésta son: La *Directiva*, va dirigida a los Estados miembros, tiene carácter vinculante en cuanto al resultado, pero deja libertad a los países en su consecución, exigiendo únicamente su transposición al derecho interno de cada país; El *Reglamento*, que es de aplicación directa en cada Estado miembro, no necesita su trasposición al Derecho interno de cada país; La *Decisión*, aunque va dirigida a todos los países, constituye un acto individual que no obliga forzosamente a los Estados. Las tres conforman los actos típicos de la documentación legislativa europea y tienen un carácter obligatorio.

De entre todas las normas aquí presentadas, hemos de hacer hincapié en las principales directivas que han marcado la gestión de residuos:

- La **Directiva 2006/12/CE**, relativa a los residuos, ha sido la Directiva Marco sobre residuos, que estableció los requisitos básicos que deben cumplir los Estados miembros en el ámbito de la gestión de residuos y ha marcado la legislación española sobre residuos. Esta directiva queda derogada por la **Directiva Marco 2008/98/CE** a partir del 12 de diciembre de 2010. A pesar de ello, es interesante conocer los objetivos establecidos por ésta, ya que la nueva Directiva Marco revisa la anterior. Según la directiva 2006/12/CE, los Estados miembros deben:
 - prohibir el abandono, el vertido y la eliminación incontrolada de residuos.
 - fomentar la prevención, el reciclado y la transformación de los residuos para poder reutilizarlos.
 - Informar a la Comisión de los proyectos de normativa que puedan llevar aparejado el empleo de productos que puedan ser causa de dificultades

técnicas y costes excesivos de eliminación y que puedan fomentar la disminución de las cantidades de algunos residuos, el tratamiento de los mismos para reciclarlos o reutilizarlos, la producción de energía a partir de determinados residuos y el empleo de los recursos naturales que pueden ser sustituidos por materiales de recuperación.

- obligar a los poseedores de residuos a entregarlos a recolectores públicos o privados o a una empresa de gestión, o a ocuparse ellos mismos de su eliminación con arreglo a las disposiciones que figuran en estas medidas.

- La nueva **Directiva Marco (Directiva 2008/98/CE)** de residuos se marca unas pautas previas en base a la Directiva anterior: simplificar y modernizar el texto, reforzar la política de prevención y fomentar el reciclaje y la reutilización. Para ello establece una serie de medidas legislativas que los Estados miembros deberán poner en marcha de forma que ayuden a reforzar la siguiente jerarquía en el tratamiento de residuos:
 - Prevención
 - Preparación para la Reutilización
 - Reciclado
 - Valorización
 - Eliminación

- La **Directiva 91/689/CEE** del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a los residuos peligrosos establece un marco para la gestión de residuos peligrosos en la Unión Europea. Estas disposiciones complementan la Directiva 2006/12/CE, que (sustituyendo a la también Directiva 75/442/CEE), que sólo establece algunas normas generales para todos los tipos de residuos, ya sean peligrosos o no. Esta Directiva establece en varias listas los residuos peligrosos según sus categorías y los constituyentes y características o propiedades que

presentan (no viéndose afectados los residuos domésticos). Además, obliga a los Estados miembros a velar por que los residuos peligrosos sean identificados e inventariados y no se mezclen ni entre ellos ni con residuos no peligrosos. Esta directiva ha sido derogada por la nueva directiva marco Directiva 2008/98/CE que la integra en el nuevo texto, en un intento de simplificación legislativa.

- La **Directiva 1999/31/CE** del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al **vertido** de residuos establece detalladamente los requisitos que deben cumplirse en este ámbito. Tiene por objeto prevenir o reducir los efectos ambientales negativos del vertido de residuos, en particular sobre aguas de superficie, aguas subterráneas, el suelo, el aire y la salud humana. En ella se enumeran las distintas categorías de residuos y los vertederos se clasifican en tres categorías: vertederos para residuos peligrosos; vertederos para residuos no peligrosos; vertederos para residuos inertes.
- La **Directiva 75/439/CEE** del Consejo, de 16 de junio de 1975, relativa a la gestión de aceites usados, modificada posteriormente por la **Directiva 87/101/CEE**. En base a ella, los Estados miembros deben garantizar la recogida y eliminación de los aceites usados (tratamiento o destrucción, almacenamiento y depósito sobre o bajo tierra). La Directiva exige a los Estados miembros dar prioridad a la regeneración (refinado) de aceites usados sobre otros métodos de eliminación. Esta Directiva se encuentra derogada, puesto que ha sido integrada en la nueva Directiva Marco.
- La **Directiva 96/59/CE** del Consejo de 16 de septiembre de 1996 relativa a la **eliminación de los policlorobifenilos y de los policloroterfenilos (PCB/PCT)**, regula diversos productos químicos peligrosos que plantean una amenaza

especial al medio ambiente. Los estados miembros deben adoptar medidas para garantizar la eliminación de los PCB usados y la descontaminación o eliminación de los PCB y de los aparatos que contengan PCB. Además han de prohibir la separación de los PCB de otras sustancias para su reutilización y el relleno de transformadores con PCB.

- La **Directiva 94/62/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre de 1994, relativa a los **envases y residuos de envases**, modificada posteriormente por la **Directiva 2004/12/CE** y por la **Directiva 2005/20/CE** pretende reducir el impacto medioambiental de los envases y sus residuos sobre el entorno. Los Estados miembros deben adoptar medidas para evitar la formación de residuos de envases, medidas que podrán consistir fundamentalmente en programas nacionales, alentándoles a impulsar los sistemas de reutilización de envases. Además, obliga a establecer unos sistemas de devolución, recogida y recuperación de residuos envases, con objeto de alcanzar unos objetivos cuantitativos marcados en ella. En sus posteriores modificaciones incrementan considerablemente los objetivos de valorización y reciclado.

Para proceder a un mejor análisis del conjunto de normas, las agruparemos en diferentes grupos, distinguiendo entre aceites usados, residuos urbanos, residuos peligrosos, residuos industriales, residuos radiactivos y otros residuos.

Aceites Usados

- **Directiva del Consejo 75/439/CEE, de 16 de Junio de 1975**, relativa a la gestión de aceites usados. *DOCE 194/L, de 25-7-1975.*
- **Directiva del Consejo 87/101/CEE, de 22 de Diciembre de 1986**, por la que se modifica la Directiva 75/439/CEE, de 16 de Junio de 1975, relativa a la gestión de aceites usados. *DOCE 42, de 12-02-1987.*

Residuos Urbanos

- **Directiva 91/156/CEE , de 18 de marzo de 1991**, del Consejo, por la que se Modifica la Directiva 75/442/CEE Relativa a los Residuos. *DOCE 78/L, de 26-03-91*
- **Directiva 94/62/CE del Parlamento y del Consejo, de 20 de Diciembre de 1994**, relativa a los envases y residuos de envases. *DOCE 365, de 31-12-94.*
- **Decisión 97/129 de la Comisión de 28 de Enero de 1997**, por la que se establece el sistema de identificación de materiales de envases, de conformidad con la Directiva 94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a los envases y residuos de envases. *DOCE 50/L, de 20-2-97.*
- **Decisión 97/138 de la Comisión de 3 de Febrero de 1997**, por la que se establecen los modelos relativos al sistema de bases de datos, de conformidad con la Directiva 94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a los envases y residuos de envases. *DOCE 52/L, de 22-2-97.*
- **Decisión 1999/177/CE, de la Comisión, de 8 de Febrero de 1999**, por la que se establecen las condiciones para la no aplicación a las cajas de plástico y a las paletas de plástico de los niveles de concentración de metales pesados fijados en la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases. *DOCE 56/L, de 4-03-99.*
- **Decisión de la Comisión, de 19 de Febrero de 2001**, por la que se establecen las condiciones para la no aplicación a los envases de vidrio de los niveles de concentración de metales pesados establecidos en la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases. *DOCE 62/L, de 02-03-01.*
- **Directiva 2005/20/CE del Parlamento Europeo y del Consejo**, por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases. *DOUE de 16-03-2005.*

Residuos Peligrosos

- **Directiva del Consejo 76/769/CEE, de 27 de Julio de 1976**, relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros que limitan la comercialización y el uso de determinadas sustancias y preparados peligrosos. *DOCE 262/L, de 27-09-76.*
- **Directiva del Consejo, de 20 de Marzo de 1978**, relativa a los residuos tóxicos y peligrosos. *DOCE de 31-03-1978.*
- **Directiva de la Comisión, de 22 de Julio de 1985**, por la que se adopta al progreso técnico la Directiva 84/631/CEE de Consejo relativa al seguimiento y control en la Comunidad de los traslados transfronterizos de residuos peligrosos.
- **Directiva 86/280/CEE del Consejo de 12 de Junio de 1986**, relativa a los valores límite y los objetivos de calidad para los residuos de determinadas sustancias peligrosas comprendidas en la lista I del Anexo de la Directiva 76/464/CEE. *DOCE 181/L, de 04-07-86.*
- **Directiva del Consejo 91/157/CEE, de 18 de Marzo de 1991**, relativa a las pilas y a los acumuladores que contengan determinadas materias peligrosas. *DOCE 78/L, de 26-03-91.*
- **Directiva del Consejo 91/689/CE, de 12 de Diciembre de 1991**, relativa a residuos peligrosos. *DOCE 377/L, de 31-12-91.*
- **Directiva de la Comisión 93/86/CEE, de 4 de Octubre de 1993**, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 91/157/CEE del Consejo, relativa a las pilas y a los acumuladores que contengan determinadas materias peligrosas. *DOCE 264/L, de 23-10-93.*
- **Directiva 94/31/CE, del Consejo, de 27 de Junio de 1994**, por la que se modifica la Directiva 91/689/CEE relativa a Residuos Peligrosos. *DOCE 168/L, de 02-07-94.*

- **Directiva 94/67/CE del Consejo, de 16 de Diciembre de 1994**, relativa a la incineración de Residuos Peligrosos. *DOCE 365/L, de 31-12-94.*
- **Decisión de la Comisión de 17 de Abril de 1996**, por la que se establece un formulario para la presentación de información con arreglo al apartado 3 del artículo 8 de la Directiva 91/689/CEE del Consejo relativa a los residuos peligrosos. *DOCE 116/L de 11-5-96.*
- **Directiva 96/59/CE del Consejo de 16 de septiembre de 1996**, relativa a la eliminación de los policlorobifenilos y de los policloroterfenilos (PCB/PCT). *DOUE L 243 de 24-09-1996.*
- **Decisión de la Comisión de 21 de Abril de 1997**, sobre métodos de medición armonizados para determinar la concentración en masa de dioxinas y furanos en las emisiones atmosféricas conforme al apartado 2 del artículo 7 de la Directiva 94/67/CE relativa a la incineración de residuos peligrosos (97/283/CE). *DOCE 113/L, de 30-04-97.*
- **Directiva 1999/45/CE**, del Parlamento y el Consejo, de 31 de mayo, sobre aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros relativas a la clasificación, el envasado y el etiquetado de preparados peligrosos. *DOE 200, de 31-7-1999.*
- **Decisión de la Comisión, de 3 de Mayo de 2000**, que sustituye a la Decisión 94/3/CE por la que se establece una lista de residuos de conformidad con la letra a) del artículo 1 de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa a los residuos y a la Decisión 94/904/CE del Consejo por la que se establece una lista de residuos peligrosos en virtud del apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE del Consejo relativa a los residuos peligrosos. *DOCE 226/L, de 06-09-00.*
- **Decisión de la Comisión, de 22 de Enero de 2001**, que modifica la Decisión 2000/532/CE que sustituye a la Decisión 94/3/CE por la que se establece una lista de residuos de conformidad con la letra a) del artículo 1 de la Directiva

75/442/CEE del Consejo relativa a los residuos y a la Decisión 94/904/CE del Consejo por la que se establece una lista de residuos peligrosos en virtud del apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE del Consejo relativa a los residuos peligrosos. *DOCE 47/L, de 16-02-01.*

- **Reglamento (CE) No 777/2006 de la Comisión, de 23 de mayo de 2006**, por el que se modifica el anexo I del Reglamento (CE) no 304/2003 del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a la exportación e importación de productos químicos peligrosos. *DOUE L 136/9 de 24-05-2006.*
- **Decisión de la Comisión, de 6 de marzo de 2007**, por la que se modifican las Decisiones 94/741/CE y 97/622/CE en lo que atañe a cuestionarios de información sobre la aplicación de las Directivas 2006/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a los residuos, y 91/689/CEE del Consejo, relativa a los residuos peligrosos. *DOUE de 07-03-2007.*

Residuos Industriales

- **Directiva del Consejo, de 21 de Junio de 1989**, por la que se fijan las modalidades de armonización de los programas de reducción con vistas a la supresión de la contaminación producida por los residuos industriales procedentes del dióxido de titanio. *DOCE de 14-07-89.*
- **Decisión de la Comisión de 3 de mayo de 1994**, sobre la concesión de una ayuda del instrumento financiero de cohesión al proyecto de gestión de los residuos industriales en España. *DOCE de 11-11-1994.*
- **Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de Marzo de 2006**, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas y por la que se modifica la Directiva 2004/35/CE. *DOUE 11-04-2006.*
- **Decisión de la Comisión de 29 de abril de 2009**, por la que se completa la definición de residuos de interés en aplicación al artículo 22 de la Directiva

2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de Marzo de 2006, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas. *DOUE de 01-05-2009.*

Residuos Radioactivos

- **Decisión de la comisión de 1 de octubre de 1993**, para el establecimiento del documento uniforme de seguimiento de los traslados de residuos radiactivos especificados en la Directiva 92/3/Euratom del Consejo, de 3 de Febrero de 1992. *DOCE de 29-10-93.*
- **Recomendación de la Comisión, de 15 de septiembre de 1999**, sobre un sistema de clasificación de residuos radiactivos sólidos. *DOCE de 13-10-1999.*
- **Directiva 2006/117/Euratom del Consejo, de 20 de noviembre de 2006**, relativa a la vigilancia y al control de los traslados de residuos radiactivos y combustible nuclear gastado. *DOUE de 05-12-2006.*
- **Decisión de la Comisión, de 5 de marzo de 2008**, por la que se establece el documento uniforme para la vigilancia y el control de los traslados de los residuos radiactivos y combustible gastado a que se refiere la Directiva 2006/117/Euratom del Consejo. *DOUE de 17-04-2008.*
- **Recomendación de la Comisión, de 4 de diciembre de 2008**, relativa a los criterios aplicables a la exportación a terceros países de residuos radiactivos y combustible gastado. *DOUE de 17-12-2008.*

Otros (electrónicos, vehículos fuera de uso, neumáticos usados, lodos de E.D.A.R, E.T.A.P y otras instalaciones, vertidos en aguas, etc.....)

- **Decisión 76/431/CEE de la Comisión, de 21 de Abril de 1976**, relativa a la creación de un Comité en materia de gestión de residuos. *DOCE 115/L, de 01-05-76.*
- **Recomendación 81/972/CEE del Consejo, de 3 de Diciembre de 1981**, relativa a la reutilización del papel usado y a la utilización del papel reciclado. *DOCE 355/L, de 10-12-81.*
- **Directiva 82/242/CEE del Consejo, de 31 de Marzo de 1982**, referente a la aproximación de las legislaciones de los Estados Miembros relativas a los métodos de control de la biodegradabilidad de los tensoactivos no iónicos y por la que se modifica la Directiva 73/404/CEE. *DOCE 109/L, de 22-04-82.*
- **Directiva del Consejo 89/429/CEE, de 21 de Junio de 1989**, relativa a la reducción de la Contaminación Atmosférica procedente de instalaciones existentes de incineración de residuos municipales. *DOCE 203/L, de 15-07-89.*
- **Resolución del Consejo, de 7 de Mayo de 1990**, sobre la Política en Materia de Residuos. *DOCE 122/C, de 18-05-90.*
- **Reglamento 259/93/CEE del Consejo, de 1 de Febrero de 1993** relativo a la vigilancia y al control de los traslados de residuos en el interior, a la entrada y a la salida de la Comunidad Europea. *DOCE 30/L, de 6-2-93.*
- **Decisión de la Comisión de 20 de Diciembre de 1993**, por la que se establece una lista de residuos de conformidad con la letra a) del Artículo 1 de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa a los residuos (Catálogo Europeo de Residuos). *DOCE 5/L, de 7-1-94.*
- **Decisión de la Comisión de 24 de Mayo de 1996**, por la que se adaptan los Anexos II A y II B de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa los residuos. *DOCE 135/L, de 6-6-96.*

- **Decisión de la Comisión de 9 de Abril de 1996**, por la que se retiran las autorizaciones de los productos fitosanitarios que contengan Profam como sustancia activa. *DOCE 257/L, de 10-10-1996.*
- **Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de Septiembre de 1996**, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación (Directiva IPPC).
- **Decisión de la Comisión de 14 de Noviembre de 1996**, por la que se adapta el Anexo II del Reglamento (CEE) 259/93 del Consejo, relativo a la vigilancia y al control de los traslados de residuos en el interior, a la entrada y a la salida de la Comunidad Europea, en virtud del apartado 3 de su Artículo 42. *DOCE 304/L, de 27-11-96.*
- **Reglamento 120/97/CE del Consejo de 20 de Enero**, por el que se modifica el Reglamento CEE 259/93, relativo a la vigilancia y al control de los traslados de residuos en el interior, a la entrada y a la salida de la Comunidad Europea. (Modifica el citado Reglamento 259/93/CEE adaptándolo a la Decisión 11/12 del Convenio de Basilea). *DOCE 22/L, de 24-01-97.*
- **Decisión de la Comisión de 27 de Mayo de 1997**, sobre cuestionarios para informes de los Estados miembros relativos a la aplicación de determinadas directivas referentes al sector de los residuos (aplicación de la Directiva 91/692/CEE)(97/622/CE) *DOCE 256/L, de 19-09-97.*
- **Decisión de la Comisión de 18 de mayo de 1998**, por la que se adapta el Anexo II y III del Reglamento (CEE) 259/93 del Consejo, relativo a la vigilancia y al control de los traslados de residuos en el interior, a la entrada y a la salida de la Comunidad Europea, en virtud del apartado 3 de su Artículo 42. *DOCE de 10-06-98.*
- **Reglamento 2408/98/CE de la Comisión, de 6 de Noviembre de 1998**, por el que se modifica el anexo V del Reglamento (CEE) 259/93 del Consejo relativo a la vigilancia y al control de los traslados de residuos en el interior, a la entrada y a la salida de la Comunidad Europea. *DOCE 298/L, de 07-11-98.*

- **Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de Abril de 1999**, relativa al vertido de residuos. *DOCE 182/L, de 16-07-99.*
- **Decisión de la Comisión, de 17 de Noviembre de 2000**, sobre el cuestionario para los Estados miembros acerca de la aplicación de la Directiva 1999/31/CE sobre vertido de residuos (Notificada con el nº 3318/C del 2000) *DOCE 298/L, de 25-11-2000.*
- **Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de Diciembre de 2000**, sobre Incineración de Residuos. *DOCE 332/L, de 28-12-00.*
- **Decisión de la Comisión de 16 de Enero de 2001**, por la que modifica la Decisión 2000/532/CE en lo que se refiere a la Lista de Residuos. *DOCE 47/L, de 16-2-2001.*
- **Decisión del Consejo, de 23 de julio de 2001**, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE la Comisión en lo relativo a la lista de residuos. *DOCE de 19-07-01.*
- **Corrección de errores de la Decisión 2001/118/CE de la Comisión**, de 16 de Enero de 2001, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE en lo que se refiere a la Lista de Residuos. *DOCE de 27-04-02.*
- **Reglamento 2150/2002, de 25 de Noviembre de 2002**, del Parlamento Europeo y del Consejo , relativo a las Estadísticas sobre Residuos. *DOCE 332, de 09-12-02.*
- **Decisión del Consejo, de 19 de diciembre de 2002**, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en vertederos con arreglo del artículo 16 y al anexo II de la directiva 1999/31/CEE. *DOCE de 16-01-2003.*
- **Directiva 2002/95/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de Enero de 2003**, sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos. *DOCE 37/L, de 13-02-03.*
- **Directiva 2002/96/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de Enero de 2003**, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). *DOCE 37/L, de 13-2-2003.*

- **Decisión 2003/33 del consejo**, por la que se modifica la Directiva 1999/31/CE.
- **Directiva 2003/108/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 8 de Diciembre de 2003**, por la que se modifica la Directiva 2002/96/CE sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). *DOCE 345/L, de 31-12-03*
- **Propuesta modificada de Reglamento** del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a los traslados de residuos (presentada por la Comisión con arreglo al apartado 2 del artículo 250 del Tratado CE). *COM/2004/0172 final - COD 2003/0139*
- **Reglamento 12/2005 de la Comisión, de 6 de enero de 2005**, por el que se modifican los Reglamentos 809/2003 y 810/2003 en lo relativo a la validez de las medidas transitorias para las instalaciones de compostaje y biogás contempladas en el Reglamento 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo. *DOCE L005, de 7-01-05*
- **Reglamento (CE) 208/2006 de la Comisión de 7 de febrero de 2006**, por el que se modifican los Anexos VI y VIII del Reglamento (CE) 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, en lo que se refiere a las normas de transformación para las plantas de biogás y compostaje y las condiciones aplicables al estiércol. *DOCE 36, de 8-2-2006*.
- **Directiva 2006/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006**, relativa a los residuos, compiladora de toda la normativa preexistente (en particular de la Directiva 75/442/CEE). *DOUE 114, de 27-4-2006*.
- **Reglamento (CE) 1013/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo de 14 de junio de 2006**, relativo a los traslados de los residuos. *DOUE de 12-07-2006*.
- **Directiva 2006/66/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 6 de septiembre de 2006**, relativa a las pilas y acumuladores y a los residuos de pilas y acumuladores y por la que se deroga la Directiva 91/157/CEE. *DOUE 266, de 26-9-2006*.

- **Corrección de la Directiva 2006/66/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 6 de septiembre de 2006**, relativa a las pilas y acumuladores y a los residuos de pilas y acumuladores y por la que se deroga la Directiva 91/157/CEE. *DOUE de 06-12-2006.*
- **Reglamento nº 185/2007 de la Comisión, de 20 de febrero de 2007**, por el que se modifican los Reglamentos (CE) nº 809/2003 y nº 810/2003 en lo relativo a la validez de las medidas transitorias para las plantas de compostaje y biogás contempladas en el Reglamento nº 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo. *DOUE de 1-03-2007.*
- **Directiva 2008/1/CE del Parlamento europeo y del Consejo, de 15 de enero de 2008**, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación. *DOUE de 29-01-2008.*
- **Directiva 2008/12/CE, del Parlamento Europeo y del consejo, de 11 de marzo de 2008**, por la que se modifica la Ley 2006/66/CE relativa a pilas y acumuladores y a los residuos de pilas y acumuladores. *DOCE 19-3-2008.*
- **Directiva 2008/33/CE del Parlamento europeo y del Consejo, de 11 de marzo de 2008**, que modifica la Directiva 2000/53/CE relativa a los vehículos al final de su vida útil, por lo que se refiere a las competencias de ejecución atribuidas a la Comisión. *DOUE de 20-03-2008.*
- **Directiva 2008/34/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de marzo de 2008**, por la que se modifica la Directiva 2002/96/CE sobre residuos y aparatos electrónicos (RAEE), por lo que se refiere a las competencias de ejecución atribuidas a la comisión. *DOUE 20-03-2008.*
- **Decisión de la Comisión de 2 de junio de 2008**, que modifica la Decisión 2004/432/CE, por la que se aprueban los planes de vigilancia presentados por terceros países relativos a los residuos, de conformidad con la Directiva 96/23/CE del Consejo. *DOUE L 143/49 de 03-062008.*
- **Reglamento (CE) 669/2008 de la Comisión, de 15 de julio de 2008**, por el que se completa el anexo IC del Reglamento (CE) 1013/2006 del Parlamento

Europeo y del Consejo de 14 de junio de 2006, relativo a los traslados de los residuos. *DOUE de 16-07-2008*.

- **Reglamento (CE) 740/2008 de la Comisión, de 29 de julio de 2008**, que modifica el Reglamento (CE) 1418/2007 por lo que se refiere a los procedimientos que han de seguirse para la exportación de residuos a determinados países. *DOUE de 30-07-2008*.
- **Directiva Marco 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008**, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas directivas. *DOUE 22-11-2008*.
- **Reglamento (CE) 308/2009 de la Comisión, de 15 de abril de 2009**, por el que se modifica el Reglamento (CE) 1013/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo de 14 de junio de 2006, relativo a los traslados de los residuos. *DOUE de 16-04-2009*.

2.3.3. Normativa Estatal

A partir de mediados de los años setenta es cuando empiezan a aparecer los primeros textos normativos importantes en relación a la gestión de residuos en nuestro país. Así, ven la luz la ley 42/1975 sobre residuos sólidos urbanos (RSU), la orden del 20 de febrero de 1979 sobre el control de los residuos de productos fitosanitarios en o sobre productos vegetales, convirtiéndose en los primeros instrumentos legales que impulsaron una mejora en relación a la gestión de residuos. Con la adhesión de España a la Unión Europea en 1985, se produjeron grandes avances respecto a este tema. Debido a ello, las diferentes figuras existentes hasta la fecha en nuestro país, tuvieron que adaptarse al derecho comunitario. Así ocurrió con la Ley 42/1975 que se adaptó mediante el Real Decreto Legislativo 1163/1986, o con la aparición de la Ley 20/1986 básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos que incorporaba a su ordenamiento interno la Directiva 78/319/CEE.

En base a estas exigencias establecidas por la política comunitaria, se promulgan leyes como la Ley 11/97 de Envases y Residuos de Envases, o la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, la cual se ha convertido en la normativa de residuos básica de la legislación española (actualmente con la modificación introducida por la Ley 16/2002, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación). En esta Ley se introducen todas las estrategias desarrolladas por la política de gestión de residuos, como la reducción de los residuos en el origen o la de dar prioridad a la reutilización, al reciclado y a la valorización. Además, en ella se prevé la elaboración de planes nacionales de residuos y la aplicación del principio “quien contamina paga” mediante el establecimiento de instrumentos de carácter económico y medidas administrativas. Hoy en día, desde la aprobación de la nueva Directiva Marco 2008/98/CE sobre los residuos, el Derecho español se encuentra a la espera de recibir los últimos cambios en torno a este tema mediante la transposición de ésta.

Pasamos ahora a recoger parte de la legislación más significativa perteneciente a los residuos en nuestro país. Al igual que en el apartado anterior los dividiremos en aceites usados, residuos urbanos, residuos peligrosos, residuos industriales, residuos radiactivos y nucleares, y otros residuos.

Aceites Usados

- **Orden de 28 de febrero de 1989** del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, por la que se regula la gestión de aceites usados. *BOE 57, de 8-3-1989*
- **Orden de 13 de junio de 1990** por la que se modifica la Orden de 28 de Febrero de 1989 del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, por la que se regula la gestión de aceites usados. *BOE 148, de 21-6-1990.*
- **Real Decreto 679/2006, de 2 de junio**, por el que se regula la gestión de los aceites industriales usados. *BOE 132, de 3-6-2006.*

Residuos Urbanos

- **Real Decreto Legislativo 1163/1986, de 13 de junio**, por el que se modifica la Ley 42/1975, de 19 de noviembre, sobre Residuos y Desechos Sólidos y Urbanos. *BOE 149, de 23-6-1986.*
- **Ley 11/1997, de 24 de abril**, de Envases y Residuos de Envases. *BOE 99, de 25-4-1997.*
- **Orden de 27 de abril de 1998** por la que se establecen las cantidades individualizadas a cobrar en concepto de depósito y el símbolo identificativo de los envases que se pongan en el mercado a través del sistema de depósito, devolución y retorno regulado en la ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases. *BOE 104, de 1-5-1998.* Corrección de errores: *BOE 120, de 20-5-98.*
- **Real Decreto 782/1998, de 30 de Abril** por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases. *BOE 104, de 01-05-98.*
- **Resolución de 30 de septiembre de 1998**, de la Dirección General de Tributos, relativa a la aplicación del Impuesto sobre el Valor Añadido a determinadas operaciones efectuadas en el marco de los sistemas integrados de gestión de envases usados y residuos de envases, regulados en la Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases, por las entidades de gestión de los referidos sistemas y por otros agentes económicos. *BOE 257, de 27-10-1998*
- **Resolución de 13 de enero de 2000**, de la Secretaría general de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo de Consejo de Ministros, de 7 de Enero de 2000, por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos Urbanos. *BOE 28, de 02-02-00.*
- **Orden de 22 de junio de 2001**, por la que se establecen las condiciones para la no aplicación a los envases de vidrio de los niveles de concentración de metales

pesados establecidos en el artículo 13 de la **Ley 11/1997, de 24 de abril**, de Envases y Residuos de Envases. *BOE de 19-06-01.*

- **Resolución de 3 de septiembre de 2003**, de la Dirección General de Trabajo, por la que se dispone la inscripción en el registro y publicación del Convenio Colectivo de Recuperación, Transformación y Venta de Residuos y Desperdicios Sólidos. *BOE 228, de 23-09-03.*
- **Real Decreto 252/2006, de 3 de marzo**, por el que se revisan los objetivos de reciclado y valorización establecidos en la Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases, y por el que se modifica el Reglamento para su ejecución, aprobado por el Real Decreto 782/1998, de 30 de abril. *BOE 04-03-2006.*
- **Ley 9/2006, de 28 de abril**, sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente. *BOE 29-04-2006.*
- **Orden MAM/3624/2006, de 17 de noviembre del Ministerio de Medio Ambiente**, por la que se modifican el Anexo 1 del Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 11/1997, de 24 de abril, de envases y residuos de envases, aprobado por el Real Decreto 782/1998, de 30 de abril y la Orden de 12 junio de 2001, por la que se establecen las condiciones para la no aplicación a los envases de vidrio de los niveles de concentración de metales pesados establecidos en el artículo 13 de la Ley 11/1997, de 24 de abril, de envases y residuos de envases. *BOE 285, de 29-11-2006.*
- **Real Decreto 105/2008**, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. *BOE 13-02-2008.*

Residuos Peligrosos

- **Ley 20/1986, de 14 de Mayo**, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos. *BOE 120, de 20-05-86.*
- **Real Decreto 833/1988 de 20 de Julio**, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos. *BOE 182, de 30-7-1988.*
- **Orden de 13 de Octubre de 1989**, por la que se determinan los métodos de caracterización de los residuos tóxicos y peligrosos. *BOE 270, de 10-11-1989.*
- **Orden de 12 de marzo de 1990**, sobre traslados transfronterizos de residuos tóxicos y peligrosos. *BOE 65, de 16-03-90.*
- **Resolución de 23 de Octubre de 1991**, que determina los pasos fronterizos para el traslado de los Residuos Tóxicos y Peligrosos. *BOE de 04-11-91.*
- **Resolución de 28 de Abril de 1995**, de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Vivienda, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros de 17 de febrero de 1995, por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos Peligrosos. *BOE 114 de 13-05-95.*
- **Real Decreto 952/1997, de 20 de Junio**, por el que se modifica el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, de 14 de mayo, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos, aprobado mediante Real Decreto 833/1988, de 20 de julio. *BOE 160, de 5-7-1997.*
- **Real Decreto 1217/1997, de 18 de Julio**, sobre Incineración de Residuos Peligrosos. *BOE de 8-8-1997 C.e BOE de 17-1-1998.*
- **Resolución de 9 de Abril de 2001**, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo de Consejo de Ministros, de 6 de abril de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Descontaminación y

Eliminación de Policlorobifenilos (PCB), Policloroterfenilos (PCT) y Aparatos que los Contengan (2001-2010). *BOE 93, de 18-04-01.*

- **Real Decreto 228/2006, de 24 de febrero**, por el que se modifica el **Real Decreto 1378/1999**, de 27 de agosto, por el que se establecen medidas para la eliminación y gestión de los policlorobifenilos, policloroterfenilos y aparatos que los contengan. *BOE 48, de 25-2-2006.*

Residuos Industriales

- **Real Decreto 937/1989, de 21 de julio**, por la que se regula la concesión de ayudas del Plan Nacional de Residuos Industriales. *BOE 179, de 28-7-1989.*

Residuos Radiactivos y Nucleares

- **Orden de 20 de Diciembre de 1994**, sobre asignación de fondos a Ayuntamientos en cuyos términos se ubiquen instalaciones de almacenamiento o centrales que almacenan combustible irradiado. *BOE de 26-12-94.*
- **Orden ECO/1449/2003, de 21 de mayo**, sobre gestión de materiales residuales sólidos con contenido radiactivo generados en las instalaciones radiactivas de 2.a y 3.a categoría en las que se manipulen o almacenen isótopos radiactivos no Encapsulados. *BOE 134, de 05-06-2003.*
- **Real Decreto 1349/2003, de 31 de Octubre**, sobre ordenación de las actividades de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S. A. (ENRESA), y su financiación. *BOE 268, de 08-11-03.*
- **Real Decreto 1767/2007, de 28 de Diciembre**, por el que se determinan los valores a aplicar en el año 2008 para la financiación de los costes correspondientes a la gestión de los residuos radiactivos y del combustible gastado, y al desmantelamiento y clausura de las instalaciones. *BOE de 29-12-2007.*
- **Real Decreto 40/2009, de 23 de enero**, por el que se determinan los valores a aplicar para la financiación de los costes correspondientes a la gestión de los residuos radiactivos y del combustible gastado, y al desmantelamiento y clausura de las instalaciones. *BOE de 24-01-2009.*

Otros (electrónicos, vehículos fuera de uso, neumáticos usados, lodos de E.D.A.R, E.T.A.P, vertidos aguas, agrícolas, fitosanitarios, etc..)

- **Ley 10/1998, de 21 de Abril**, de residuos. *BOE 96, de 22-4-1998.*
- **Orden de 14 de Mayo de 1998** sobre límites máximos de residuos de productos fitosanitarios por la que se modifica el anexo II del Real Decreto 280/1994. *BOE 120, de 20-5-1998.*
- **Resolución de 17 de Noviembre de 1998**, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, por la que se dispone la publicación del Catálogo Europeo de Residuos (CER), aprobado mediante la Decisión 94/3/CE, de la Comisión, de 20 de diciembre de 1993. *BOE 7, de 08-01-99.*
- **Resolución de 25 de noviembre de 1999**, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, por la que se da conformidad al Programa Nacional de Pilas y Baterías Usadas. *BOE 284, de 27-11-99.*
- **Real Decreto-Ley 4/2001, de 16 de febrero**, sobre el régimen de intervención administrativa aplicable a la valorización energética de harinas de origen animal procedentes de la transformación de despojos y cadáveres de animales. *BOE 42, de -02-2001.*
- **Real Decreto 1416/2001, de 14 de diciembre**, sobre Envases de Productos Fitosanitario. *BOE 311, de 28-12-01*
- **Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre**, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. *BOE 25, de 29-01-02*
- **Orden PRE/145/2002, de 24 de enero**, por la que se modifican los anexos II de los Reales Decretos 280/1994, de 18 de febrero, y 569/1990, de 27 de abril por los que se establecen los límites máximos de residuos de plaguicidas y su control en determinados productos de origen vegetal y animal (19ª modificación). *BOE 27, de 31-1-2002.*

- **Orden MAM/304/2002, de 8 de Febrero**, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. *BOE 43, de 19-02-02.*
- **Corrección de errores de la Orden MAM/304/2002, de 8 de Febrero**, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y lista europea de residuos. *BOE 61, de 12-03-02*
- **Ley 16/2002, de 1 de Julio**, de prevención y control integrados de la contaminación. *BOE 157, de 02-07-02.*
- **Ley 6/2003, de 20 de marzo de 2003**, del impuesto sobre depósito de residuos. *BOE 128, de 29-05-2003.*

- **Real Decreto 653/2003, de 30 de Mayo de 2003**, sobre incineración de residuos. *BOE 142, de 14-06-03.*
- **Ley 15/2003, de 13 de junio**, de modificación de la Ley 6/1993, de 15 de julio, reguladora de los residuos. *BOE 174, de 22-07-2003.*
- **Ley 16/2003, de 13 de junio**, de financiación de las infraestructuras de tratamiento de residuos y del canon sobre la disposición de residuos. *BOE 174, de 22-07-2003.*
- **Corrección de errores del Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo**, sobre incineración de residuos. *BOE 224, de 18-09-2003.*

- **Real Decreto 208/2005, de 25 de febrero**, sobre aparatos eléctricos y electrónicos y la gestión de sus residuos. *BOE 49, de 26-2-2005.*
- **Corrección de errores del Real Decreto 208/2005, de 25 de febrero**, sobre aparatos eléctricos y electrónicos y la gestión de sus residuos. *BOE 76, de 30-03-2005.*
- **Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre**, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso. *BOE 3-1-2006.*

- **Real Decreto 509/2007, de 20 de abril**, por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 16/2002, de 1 de Julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación. *BOE 21-04-2007*.
- **Real Decreto 106/2008, de 1 de febrero**, sobre pilas y acumuladores y la gestión ambiental de sus residuos. *BOE 12-02-2008*.
- **Real Decreto 1304/2009, del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, de 31 de julio de 2009**, por el que se modifica el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante el depósito en vertedero. *BOE 185, de 01-08-2009*.

2.3.4. Normativa Autonómica (Andalucía)

Las primeras normas en gestión de residuos en la comunidad autónoma Andaluza surgen en los años noventa. Entre todas las normas aquí recogidas (y como en los casos anteriores agrupadas en diferentes grupos) podemos destacar el Decreto 283/1995 por el que se aprueba el Reglamento de Residuos de la Comunidad Autónoma Andaluza, los decretos 134/1998 y 99/2004, por los que se aprueban el primer y segundo Plan de Gestión de Residuos Tóxicos y Peligrosos, respectivamente, o el decreto 218/1999 por el que se aprueba el Plan Director Territorial de Residuos Urbanos de Andalucía.

Residuos Urbanos

- **Decreto 218 de 26 de Octubre de 1999**, por el que se aprueba el Plan Director Territorial de Residuos Urbanos de Andalucía. *BOJA de 18-11-99*.

Residuos Peligrosos

- **Decreto 134/1998, de 23 de Junio**, por el que se Aprueba el Plan de Gestión de Residuos Tóxicos y Peligrosos. *BOJA 91, de 13-08-98*.

- **Orden de 12 de marzo, conjunta de las Consejerías de Economía y Hacienda y de Medio Ambiente**, por la que se regula la declaración de comienzo, modificación y cese de las actividades que determinen la sujeción a los impuestos sobre vertidos a las aguas litorales, sobre depósito de residuos radiactivos y sobre depósito de residuos peligrosos. *BOJA 56, de 22-03-2004.*
- **Decreto 99/2004, de 9 de marzo de la Consejería de Medio Ambiente**, por el que se aprueba la revisión del Plan de Gestión de Residuos Peligrosos de Andalucía. *BOJA 64, de 01-04-2004.*

Residuos Sanitarios

- **Resolución de 29 de junio de 1999**, del Servicio Andaluz de Salud, por el que se crea la Comisión Consultiva de Gestión de Residuos Sanitarios. *BOJA 80, de 13-07-99.*

Otros

- **Decreto 283/1995, de 21 de Noviembre**, por el que se aprueba el **Reglamento de Residuos** de la Comunidad Autónoma Andaluza. *BOJA 161, de 19-12-95.*
- **Orden de 7 Febrero de 2000**, por la que se establecen sistemas de gestión para los envases usados y residuos de envases de productos fitosanitarios. *BOJA 34, de 21-03-00.*
- **Decreto 104/2000, de 21 de Marzo**, por el que se regulan las Autorizaciones Administrativas de las Actividades de Valorización y Eliminación de Residuos y la Gestión de Residuos Plásticos Agrícolas. *BOJA 47, de 22-04-00.*
- **Decreto 257/2003, de 16 de septiembre**, por el que se regulan las autorizaciones de grupos de gestión o sistemas lineales de gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, así como de pilas y baterías usadas. *BOJA 188, de 30-09-2003.*
- **Orden de 14 de marzo de 2006**, por la que se aprueba la Carta de Servicios del Servicio de Residuos. *BOJA 88, de 19-04-2006.*

- **Ley 7/2007, de 9 de julio**, de Gestión integrada de la Calidad Ambiental. *BOJA de 20-07-2007.*

2.3.5. Planes Nacionales y Autonómicos

El devenir de la política de gestión de residuos marcada por la Unión Europea ha establecido la obligación de implantar ciertos instrumentos que permitan realizar un tratamiento más eficiente de éstos. Desde el gobierno central europeo, se induce a que los Estados miembros han de fomentar el desarrollo de tecnologías sostenibles, así como la valorización de los residuos mediante la reutilización y el reciclaje. Para conseguir estos objetivos, las administraciones competentes de cada país han de establecer planes de actuación capaces de permitir una gestión integrada de sus residuos.

La Ley 10/1998 de residuos, cumpliendo con este mandato, ya establece que la administración general del Estado elaborará diferentes planes nacionales de residuos, que serán el resultado de la integración de los respectivos planes autonómicos de gestión, admitiendo la posibilidad de que las entidades locales puedan elaborar sus propios planes de gestión para los residuos sólidos urbanos.

En este sentido se han elaborado varios planes nacionales de residuos, que por una parte trataban de implantar la nueva política, en la que se fijarán los objetivos específicos de reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización y eliminación, y por otra de corregir los errores de los planes existentes hasta la fecha (como, por ejemplo, el Plan Nacional de Residuos Industriales de 1989).

Se recogen aquí los principales planes y programas de gestión de residuos redactados por la administración ambiental:

Urbanos	Plan Nacional de Residuos Urbanos (2000-2006). Resolución de 13 de Enero de 2000
Peligrosos	Plan Nacional de Residuos Peligrosos (1995-2000). Resolución de 28 de Abril de 1995
	Plan Nacional de Descontaminación y Eliminación de Policlorobifenilos (PCB), Policloroterfenilos (PCT) y Aparatos que los Contengan (2001-2010) Resolución de 9 de Abril de 2001.
Especiales	Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales (2001-2006) Resolución de 14 de Junio de 2001.
	Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (2001-2006). Resolución de 14 de Junio de 2001.
	Plan Nacional de Vehículos al final de su vida útil (2001-2006). Resolución de 25 de Septiembre de 2001
	Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso , (2001-2006). Resolución de 8 de Octubre de 2001.
Otros	Plan Nacional de Residuos Industriales . Resolución de 24 de Julio de 1989.
	Programa Nacional de Pilas y Baterías Usadas . Resolución de 25 de Noviembre de 1999.
	V Plan General de Residuos Radiactivos (1999)
	Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados .(1995-2005) Resolución de 28 de Abril de 1995.
	Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales . (1995- 2005) Resolución de 28 de Abril de 1995.

Tabla 1. Planes Nacionales de Gestión de Residuos.

Una vez terminada la vigencia de estos planes, y tras la publicación de la nueva Directiva 2008/98/CE, el Consejo de Ministros resolvió, a petición del Ministerio de Medio Ambiente, la aprobación del diseño de un plan capaz de aglutinar al conjunto de los principales residuos producidos en nuestro país. Así, en febrero de 2009 se aprobó el **Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR)** para el período 2008 – 2015 (BOE 26 02 2009). Dicho plan contempla en capítulos separados un programa de acciones en 13 tipos de Residuos y un Documento Estratégico de desvío de Residuos biodegradables de vertederos. Los residuos que comprende el Plan son:

1. Residuos Urbanos de origen domiciliario.
2. Residuos Peligrosos.
3. Vehículos Fuera de Uso.
4. Neumáticos Fuera de Uso.

5. Pilas y Acumuladores
6. Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos
7. Policlorobifenilos (PCB), policloroterfenilos (PCT) y aparatos que los contengan.
8. Residuos de Construcción y Demolición
9. Lodos de depuradora de aguas residuales urbanas (EDAR Urbanas).
10. Suelos Contaminados.
11. Plásticos de Uso Agrario (PUA).
12. Residuos de Industrias Extractivas.
13. Residuos industriales no Peligrosos.
14. Estrategia de desvío de Residuos biodegradables de vertederos.

A pesar del conjunto de residuos recogidos en él, hemos de decir que este plan no recoge los residuos que, en nuestro país, se producen en mayores cantidades, como son los agrícolas y ganaderos, así como tampoco reúne a otros como los radiactivos, los hospitalarios, etc.

Los principales objetivos de este nuevo plan de residuos integrados son:

- Modificar la tendencia actual del crecimiento de la generación de residuos.
- Erradicar el vertido ilegal.
- Disminuir el vertido y fomentar de forma eficaz: la prevención y la reutilización, el reciclado de la fracción reciclable, así como otras formas de valorización de la fracción de residuos no reciclable.
- Completar las infraestructuras de tratamiento y mejorar el funcionamiento de las instalaciones existentes.
- Obtener estadísticas fiables en materia de infraestructuras, empresas gestoras y producción y gestión de residuos.
- Evaluar los Instrumentos económicos y en particular los fiscales que se han puesto en práctica para promover cambios en los sistemas de gestión

existentes. Identificar la conveniencia de su implantación de forma armonizada en todas las Comunidades Autónomas.

- Consolidación de los programas de I+D+i aplicados a los diferentes aspectos de la gestión de los residuos, incluyendo análisis de la eficiencia de los sistemas de recogida, optimización de los tratamientos y evaluación integrada de los procesos completos de gestión, desde la generación hasta la eliminación.
- Reducir la contribución de los residuos al Cambio Climático fomentando la aplicación de las medidas de mayor potencial de reducción

Por su parte, la comunidad autónoma andaluza siguiendo las directrices marcadas tras la aprobación de la Ley 10/1998 por la que se defiende la integración de planes autonómicos y nacionales, también ha desarrollado planes de gestión de residuos:

Andalucía	Plan de Gestión de Residuos Peligrosos de Andalucía , aprobado por el Decreto de nº 134, de 23 de Junio de 1998.
	Plan Director Territorial de Residuos Urbanos de Andalucía , aprobado por el Decreto nº 218, de 26 de octubre de 1999.
	Plan de Gestión de Residuos Peligrosos de Andalucía , aprobado por el Decreto de nº 99, de 9 de marzo de 2004.

Tabla 2. Planes Autonómicos Andaluces de Gestión de Residuos.

2.4. Reutilización de Residuos en Carreteras

Los asuntos relacionados con la conservación ambiental han tomado una importancia primordial en nuestra sociedad. Las decisiones políticas, económicas y sociales relacionadas con este tema tienen hoy día una mayor atención, y la búsqueda del desarrollo sostenible se ha convertido en uno de los objetivos prioritarios de los gobiernos.

Como se ha expuesto en el segundo apartado de este capítulo de antecedentes, la tendencia de los últimos años en temas de gestión de residuos ha sido su eliminación mediante la incineración o su depósito en vertederos. El aumento incesante de los

volúmenes acumulados (que se ha convertido en un problema serio para la sociedad), ha motivado un cambio de estrategia, en el cual las operaciones de valorización han sido tomadas como las soluciones prioritarias. El endurecimiento de la legislación concerniente a este tema ha provocado que cada vez sea más difícil el depósito de residuos en vertederos, provocando además la reducción paulatina del número de éstos.

Una de las actividades que mayor cantidad de residuos genera es la construcción. La imposibilidad de depósito de sus residuos en vertederos, unida al incremento de los costes energéticos, han reforzado el desarrollo de tecnologías constructivas más sostenibles en las que se incentiva el empleo de materiales reciclados.

Por su parte, el importante desarrollo económico y social sufrido en las cuatro últimas décadas, ha motivado un incremento considerable de la demanda de carreteras, y con ellas, del consumo de áridos. La disminución del número de canteras, debido al incremento de las trabas impuestas por la legislación ambiental que hacen cada vez más difícil su explotación, ha provocado la escasez de estos materiales, incrementado considerablemente los costes de construcción y mantenimiento de las carreteras.

En este sentido, la incorporación de materiales reciclados en la construcción de carreteras como sustitución de los áridos vírgenes, se percibe como una oportunidad para ahorrar recursos naturales y disminuir el impacto asociado con la extracción y transporte de éstos. Los grandes volúmenes de material empleados en la construcción de carreteras (más de 12.000 ton/kilómetro de autovía [18,19]) las convierten en áreas potenciales de reutilización de residuos. Así, los beneficios obtenidos de esta operación no solo son la disminución de residuos en vertederos, sino también la reducción de impactos medio ambientales debidos a la explotación de las canteras y el transporte de áridos. La reutilización de residuos en carreteras establece por tanto un doble objetivo, por un lado la reducción del consumo de áridos naturales, y por otro, la reducción de los materiales depositados en vertederos.

El papel que pueden desarrollar los residuos dentro del conjunto de la carretera como sustitutivos de los áridos naturales puede variar. De esta manera, podemos encontrar residuos tanto en terraplenes [20] y capas granulares [21,22], como formando parte de las mezclas asfálticas que constituyen el firme, ya sea en forma de grava, arena o filler [23,24]. En el siguiente apartado nos centraremos en el estudio de la incorporación de residuos en la fabricación de mezclas bituminosas, puesto que es el objeto principal de la tesis.

2.4.1. Incorporación de Residuos en Mezclas Bituminosas

Según datos de la EAPA (European Asphalt Pavement Association), en Europa se fabrican alrededor de 340 millones de toneladas de mezclas bituminosas en caliente cada año, siendo la aportación de España de unos 50 millones de toneladas fabricadas [25]. Los áridos suponen más del 90% en peso de las mezclas bituminosas [26] lo que se traduce en un consumo de unas 306 millones de toneladas de áridos en Europa, y de 45 millones de toneladas en nuestro país, sólo en la fabricación de mezclas bituminosas. Si extrapolamos estos cálculos al resto del mundo (sólo en EE.UU se fabrican anualmente unos 500 millones de toneladas de mezclas bituminosas en caliente, lo que se supone un consumo de 450 millones de toneladas de áridos), los datos obtenidos resultan bastante alarmantes.

El desarrollo de procedimientos que minimicen el impacto de esta actividad sobre el medio ambiente se convierte por tanto, en una necesidad primordial. Dentro de las posibles soluciones a adoptar se encuentra la reutilización de áridos reciclados, y más concretamente la ya comentada incorporación de residuos como sustitutivos de los áridos naturales.

Es durante la década de los setenta y principio de los ochenta cuando comienzan a tenerse en cuenta el empleo de residuos y subproductos en la fabricación de mezclas bituminosas [27]. Durante dichos años, en España también se desarrollaron investigaciones en torno a este tema, pero los resultados obtenidos carecieron de

continuidad. A pesar de que en algunos de los estudios realizados las conclusiones obtenidas fueron satisfactorias y llegaron a realizarse algunos tramos de prueba, el empleo de estos residuos en carreteras no se generalizó debido principalmente a las circunstancias que rodeaban su gestión. Así, el bajo coste de depósito en vertedero y la inexistencia de sanciones eficaces por vertido, unidas al bajo precio de las materias primas naturales comúnmente utilizadas, dieron al traste con los esfuerzos llevados a cabo en torno a este tema.

A esto hemos de sumar la escasa ayuda que han prestado las diferentes administraciones a la incorporación de materiales procedentes del tratamiento de residuos, como queda reflejado en el carácter conservador del conjunto de especificaciones técnicas para capas de firme existente.

Con la aparición de la Ley 10/1998 de residuos, la situación empieza a cambiar. En ésta se pretende incentivar la reducción de los residuos en origen y dar prioridad a su reutilización, reciclado y valorización sobre otras posibles técnicas de gestión. Además, se prevé la elaboración de planes nacionales de residuos que permitan establecer una mayor integración y coordinación en torno a dicha gestión. Para la consecución de estos objetivos, así como la promoción de tecnologías sostenibles en la eliminación de residuos, la ley anuncia que las administraciones públicas (dentro de sus competencias), puedan establecer instrumentos de carácter económico y medidas que incentiven estas materias.

En base a ella, en el año 2001 se publica el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (2001-2006), que hace referencia a los llamados escombros. A pesar de ello, este plan no hace ninguna referencia clara a las carreteras. Otro de los planes publicados fruto de esta ley y en relación con la reutilización de residuos en mezclas asfálticas es el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso (2001-2006), que establece un sistema de gestión para los residuos procedentes de los neumáticos.

Unos años después de la publicación de estos planes, la tendencia de realizar planes nacionales referidos a residuos concretos cambia, pasando a utilizar la figura del Real Decreto como mecanismo de acción. Así, se aprueban el Real Decreto 1619/2005 sobre la gestión de neumáticos fuera de uso, o el Real Decreto 105/2008 por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.

Tras la finalización del periodo de vigencia de los planes nacionales aprobados, y una vez que fue publicada la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo sobre residuos, el Consejo de Ministros acordó, a propuesta del Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino, aprobar un Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR). En este plan se aboga porque las administraciones públicas hagan un esfuerzo para que en las obras en las que actúen como promotoras se incorporen materiales reciclados en porcentajes cada vez más elevados como sustitución de los materiales vírgenes. Así, insta a la sustitución de los áridos naturales por residuos que sean capaces de desempeñar sus funciones. Del conjunto de residuos recogidos en el PNIR, existen algunos que ya han sido utilizados en la construcción de firmes [28, 29]:

- Residuos urbanos de origen domiciliarios (vidrios, plásticos, escorias,...)
- Residuos peligrosos (aceites industriales usados)
- Neumáticos Fuera de Uso (NFU)
- Residuos de Construcción y Demolición (RCD)
- Lodos de Depuradoras
- Plásticos de uso agrario
- Residuos de industrias extractivas (minería)
- Residuos industriales no peligrosos (principalmente escorias siderúrgicas, cenizas volantes,...)

A pesar de que durante el desarrollo de esta investigación la incorporación de residuos en mezclas asfálticas se hará como sustitución parcial o total de los áridos naturales (arenas, gravas o filler), existen otras funciones dentro de la mezcla que los residuos son capaces de desempeñar:

- Sustitución total o parcial del ligante bituminoso
- Aditivo modificador de las propiedades reológicas del ligante bituminoso
- Aditivo modificador de las propiedades reológicas de la mezcla bituminosa
- Aditivo para reforzar la estructura de la mezcla bituminosa (fibras)

La sustitución parcial o total de áridos en mezclas bituminosas en beneficio de los residuos ha sido empleada en la mayoría de las ocasiones con materiales procedentes de la extracción minera, materiales de rechazo de cantera o materiales obtenidos a partir de los RCD. La naturaleza de estos residuos les permite ser empleados en condiciones similares a las de cualquier árido natural. Por su parte, la sustitución del filler ha sido centrada en residuos de naturaleza en forma de polvo. Así, destaca la utilización sobre todo de cenizas volantes de central térmica.

A pesar de ello, salvando las concernientes a la utilización de RCD y NFU, el PNIR no hace ninguna referencia específica al empleo de residuos en la construcción de firmes. Si bien, existen ciertos residuos que dadas sus características resulta difícil generalizar su uso en la fabricación de mezclas bituminosas, sin embargo, otros muchos pueden tener una aplicación tan interesante como la de los NFU y los RCD. Podemos decir que, a pesar de que desde este plan se realiza un esfuerzo por fomentar el aprovechamiento de los residuos, desde el punto de vista de la ingeniería de carreteras aún mantiene la línea conservadora de las especificaciones normativas existentes hasta la fecha, impidiendo el desarrollo del empleo de nuevos residuos que ya han demostrado su aptitud para formar parte de las capas del firme.

Podemos deducir por tanto, que la reutilización de residuos en la fabricación de mezclas bituminosas es todavía una técnica por desarrollar. Está claro que los esfuerzos llevados a cabo van en la buena dirección, pero conocidas las numerosas ventajas que presenta, éstos han de ser mayores y más ambiciosos. Para ello será fundamental la modificación de las especificaciones y normativa técnica existente, que permitan un aprovechamiento eficiente de estos residuos.

2.4.1.1. Descripción de la técnica

La incorporación de residuos en general en la fabricación de mezclas bituminosas no puede tratarse como una técnica definida en sí misma. Es cierto que, dentro de las técnicas de fabricación de mezclas asfálticas existen algunas basadas en la incorporación de residuos que incluso poseen su propia normativa (como la técnica de reciclado de firmes ya sea en frío o en caliente [30], o la técnica de incorporación de NFU, por vía seca o húmeda [31]), a pesar de ello, como podemos ver en la mayoría de las experiencias desarrolladas en torno a este tema [32-36], la adición de estos materiales de manera extensiva en pavimentos es más un procedimiento común de actuación que una técnica como tal. Adaptando dicho procedimiento a la normativa española, el estudio de incorporación de residuos a mezclas bituminosas se establecería en las etapas descritas a continuación.

En primer lugar, antes de poder realizar la adición de cualquier tipo de residuo en una mezcla bituminosa, es necesario llevar a cabo un estudio previo del material en sí mismo. Por un lado, dicho estudio abarcará el conocimiento de las características del residuo (material del que procede, niveles de producción y cantidades de residuo disponibles, composición, forma, o posibilidad de tratamiento), y por otro los indicios de utilización (posible papel a desempeñar dentro de la mezcla bituminosa, el tratamiento que ha de recibir para poder ser utilizado o la viabilidad de dicho tratamiento).

Una vez realizado el estudio previo del material, se procederá a su tratamiento, siempre y cuando éste sea necesario (hay residuos que podrán utilizarse directamente). Esta etapa puede ser reiterativa hasta dar con el tratamiento adecuado que permita adicionar el residuo en las mismas condiciones que los materiales tradicionales.

Tras el tratamiento previo, y antes de proceder a la adición del residuo en la mezcla, éste deberá cumplir con todas las exigencias que las normativas establecen a los

materiales que son utilizados en mezclas bituminosas (En caso de no satisfacer dichas necesidades, podría replantearse el tratamiento dado al residuo y volver a repetir el proceso). Además, será necesario comprobar que no se produce ningún tipo de reacción con el resto de materiales que conforman la mezcla y que no se produce ningún tipo de lixiviado que pudieran ser motivo de contaminación de suelos o aguas, o que puedan afectar a la flora y fauna del entorno donde vayan a ser empleados. Otro de los aspectos a estudiar y a los que más atención hay que prestar es la adhesividad entre el residuo y el ligante, puesto que si ésta no fuera buena, el empleo del residuo en mezclas bituminosas casi podría descartarse.

El siguiente paso a realizar una vez verificado que el residuo cumple con la normativa al respecto, y que sus características permiten su utilización, es la incorporación de éste a la mezcla bituminosa. En esta etapa deberá determinarse el comportamiento de la mezcla tras la adición del residuo, así como la influencia de la cantidad añadida sobre las propiedades mecánicas de ésta. Para ello, se diseñarán varias mezclas del mismo tipo, a partir de los mismos materiales, en las que únicamente variarán los porcentajes adicionados del residuo, lo que permite además comprobar la cantidad de éste que es capaz de consumir. Es conveniente que una de las mezclas diseñadas no contenga cantidad alguna de residuo, es decir, que sea una mezcla convencional, para establecerse como referencia de las demás.

Tras la realización de los ensayos pertinentes establecidos por la normativa, deberá comprobarse que las mezclas elaboradas con los residuos cumplen con los valores exigidos en dicha normativa (al igual que en la etapa anterior, en el caso de que no cumplieran, cabe la posibilidad que sea por el tratamiento dado al residuo, siendo una de las posibles soluciones modificar éste y repetir el proceso). Además, debe realizarse un análisis comparativo de los valores obtenidos entre las diferentes mezclas estudiadas, a fin de establecer los beneficios y perjuicios que aportan los residuos en esos tipos de mezcla.

Después de terminar toda la etapa de laboratorio (caracterización del residuo, diseño de las mezclas bituminosas, aprobado su empleo en la fabricación de éstas, y analizado el comportamiento de dichas mezclas), si los resultados obtenidos son satisfactorios, y si su ejecución es viable, el siguiente paso sería la aplicación de las mezclas obtenidas en un tramo de prueba en obra. Para ello, será necesario determinar las condiciones de producción en planta (temperatura de fabricación de la mezcla, o el orden en el que han de mezclarse los materiales) y puesta en obra (temperatura de extendido o de compactación), así como la maquinaria necesaria para su ejecución (extendedora o compactadores entre otras). Además, habrá que tener en cuenta si la maquinaria a utilizar es la misma que en caso de las mezclas convencionales o será necesario realizar modificaciones.

Finalmente, durante los trabajos de construcción del tramo de prueba, será necesario llevar a cabo un control de la mezcla repitiendo los mismos ensayos que en la etapa de laboratorio durante su diseño, pero ésta vez con la mezcla fabricada en planta, con el objetivo de comprobar la reproducibilidad de ésta. Además, será necesario realizar ensayos de control de extendido y compactación (macrotextura superficial o CRT), así como ensayos de control a medio-largo plazo del comportamiento del tramo (regularidad superficial o deflexiones).

En base al análisis de todos los resultados obtenidos en las diferentes etapas, así como del resultado obtenido tras la realización de un balance económico del coste de construcción del tramo de prueba (en él irán incluidos los costes de tratamiento del residuo, de modificación de la maquinaria si es necesario o su comportamiento en servicio, y éstos deberán compararse con los costes de una mezcla convencional del mismo tipo), se podrán determinar las prestaciones que conlleva el empleo del residuo estudiado en la construcción de carreteras.

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

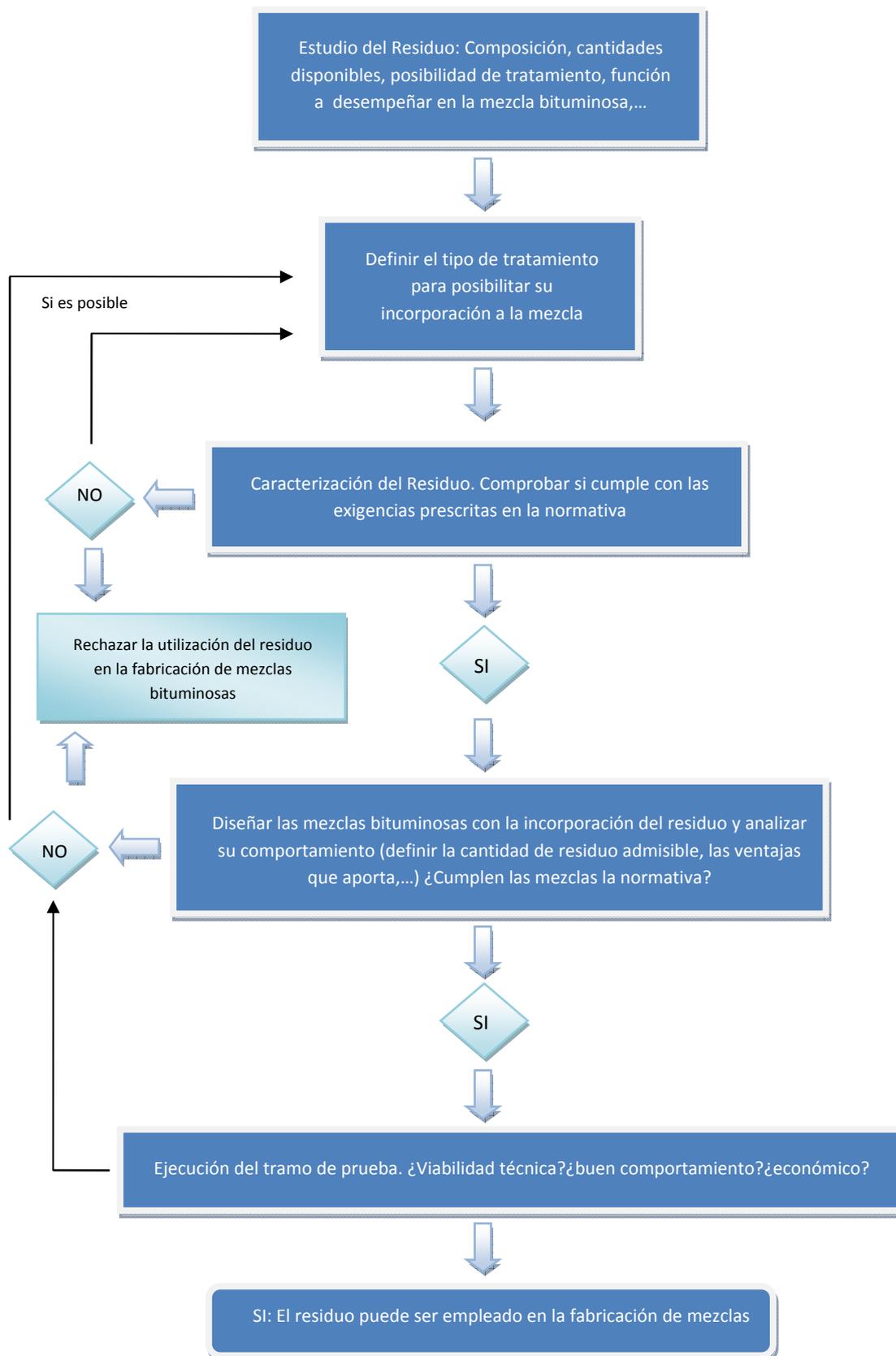


Figura 1. Incorporación de residuos en la fabricación de mezclas bituminosas.

2.4.1.2. Normativa Específica

En España, no existe una normativa específica sobre incorporación de residuos en mezclas bituminosas como tal. Exceptuando las dos técnicas anteriormente citadas (el reciclado de firmes y la fabricación de firmes con NFU), las cuales si poseen su propia normativa al respecto, el resto de residuos utilizados en la fabricación de mezclas bituminosas no tienen la trascendencia y aplicación suficiente para tener una normativa propia definida (los más que llegan a conseguir es algún comentario al respecto de su empleo dentro de la normativa general). En nuestro país, además de la normativa existente para mezclas bituminosas de aplicación general, recogidas en el PG-3 [37] (artículos 541, 542 y 543), y en las instrucciones de carreteras 6.1-IC Secciones de firmes [38] y 6.3-IC Rehabilitación de firmes [39], en relación con la reutilización de residuos en mezclas asfálticas podemos encontrar:

- La Orden Circular 8/2001 sobre el reciclado de firmes, en la cual se definen las diferentes técnicas de reciclado de firmes in situ con emulsión y cemento, y en caliente en central [30].
- La Orden Circular 5 bis/02 sobre las condiciones para la adición de polvo neumáticos usados en las mezclas bituminosas, por la que se modifican los artículos 540, 542 y 543 del PG-3 [40].
- La Orden FOM/891/2004 por la que se actualizan determinados artículos del PG-3 (en ella se contempla “en las obras en las que la utilización del producto resultante de la trituración de neumáticos sea técnica y económicamente viable se dará prioridad a estos materiales”) [41].
- La Orden Circular 21/2007 sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso [31].
- La Orden Circular 24/2008 por la que se modifican los artículos del PG-3 referentes a mezclas bituminosas (542 y 543) y se incluyen como tipos de ligante los betunes caucho [42].

- Orden Circular 21bis/2009 sobre betunes mejorados y betunes modificados de alta viscosidad con caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) y criterios a tener en cuenta para su fabricación in situ y almacenamiento en obra [43].
- El Manual de Empleo de Caucho de Polvo de NFU en Mezclas Bituminosas, elaborado por el CEDEX, establece recomendaciones sobre el empleo de los materiales obtenidos en la trituración fina del caucho procedente de los NFU en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente para carreteras [44].

Como podemos ver todas ellas se refieren bien al reciclado de carreteras o bien a la incorporación de polvo de neumático en mezclas asfálticas, y dentro de esta técnica, a su rama de la vía húmeda. Si bien, es cierta la dificultad añadida en todas las tecnologías innovadoras (puesto que el marco normativo se suele quedar por detrás de la realidad en las obras), este hecho demuestra que la normativa solo se involucra con técnicas que anteriormente han tenido un importante contraste, no ofreciendo ningún tipo de ayuda al desarrollo de nuevas aplicaciones que permitan poner en práctica las políticas de sostenibilidad que tan bien aprendidas están en la teoría. Este aspecto, unido al carácter conservador de las normas en todo lo que respecta la reutilización de residuos, suponen un freno a la evolución de nuevas técnicas que permitan dar solución al conjunto de problemas acarreados por el consumo de materiales vírgenes.

Conjuntamente a esta normativa estatal, en Andalucía, comunidad autónoma donde se ha llevado a cabo la investigación, existen algunas normativas específicas para carreteras. Así, podemos encontrar el manual ICAFIR (Instrucción para el diseño de firmes en la red de carreteras de Andalucía) [45] publicado por GIASA (Gestión de Infraestructuras de Andalucía S.A.), o incluso un pliego dedicado a la reutilización de residuos en firmes, en este caso, correspondiente a la técnica de reciclado: Pliego para reciclado de capas de MBC en frío “in situ” con emulsión bituminosa de la Junta de Andalucía [46].

2.4.1.3. Residuos Empleados en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

Desde sus comienzos en la década de los sesenta, la incorporación de residuos en mezclas bituminosas ha sido un desafío que ha permitido impulsar el desarrollo de procesos constructivos más sostenibles. En este ámbito, encontramos que tanto la función desempeñada por los diferentes residuos utilizados (áridos, filler, aditivos o fibras), como la variedad en la tipología de éstos (aceros, polvo de neumáticos, pavimentos reciclados entre otros), ha sido bastante amplia.

Dentro de los componentes de una mezcla asfáltica, el más abundante, y por tanto, el más consumido y el que mayor oportunidad de consumo de residuos puede ofrecer, son los áridos. Al tratarse de recursos naturales procedentes de una fuente agotable como son las canteras, su consumo excesivo implicaría futuros problemas de escasez, así como un encarecimiento significativo del material. La sustitución total o parcial de los áridos (así como del filler) utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas por residuos es una solución muy a tener en cuenta para paliar este problema. Debido a ello, se pueden encontrar numerosas experiencias cuyo objetivo ha sido verificar la aptitud de algunos residuos para poder desempeñar este papel. Algunas de estas experiencias han tenido mayor aceptación, convirtiéndose en técnicas contrastadas, como pueden ser los casos ya comentados del empleo de polvo de neumático o el reciclado de firmes.

- **Polvo de Neumático Fuera de Uso (PNFU)**

Dentro de las experiencias con mezclas realizadas con este residuo, podemos encontrar dos técnicas bien diferenciadas: la *vía seca* (que consiste en añadir directamente el polvo de neumático a la mezcla como parte de los áridos más finos) y la *vía húmeda* (que consiste en modificar previamente el betún con los residuos de PNFU, y después realizar la mezcla de éste con los áridos y el filler). En la *vía seca* (que es la que más cantidad de residuo consume), el tamaño del polvo utilizado en las diferentes experiencias conocidas varía entre 0 y 6,4

milímetros, siendo el porcentaje habitual de áridos finos sustituidos entre el 1 y el 3%. La adición de éste residuo provoca un aumento de la demanda del contenido de betún de la mezcla en torno a un 10-20%. Existen estudios que han demostrado que la adición por esta vía provoca una reducción en la deformación permanente de la mezcla [47,48], y una reducción del ruido de rodadura de los vehículos [49]. Por su parte, en la vía húmeda (que es la más estudiada), el tamaño del PNFU utilizado varía en el rango 0,15-0,6mm y su porcentaje de adición suele estar en torno al 18-22% sobre el peso del betún [50]. Los numerosos estudios desarrollados con esta técnica (algunos de los cuales se encuentran resumidos en los trabajos de Huang et al. [26]) revelan mejoras sustanciales en el comportamiento ante roderas y fatiga de las mezclas, así como un alargamiento de la vida del pavimento.



Foto 1. Polvo de neumático.

- **Material reciclado procedente del fresado de capas de firme (RAP)**

Son tantas las experiencias desarrolladas con este residuo en la fabricación de mezclas asfálticas, que su empleo se ha convertido en una técnica totalmente depurada y regularizada mediante manuales y textos normativos. Las modalidades de reciclado de firmes atienden a si éste se realiza in situ o en central, en frío o en caliente, y con cemento o con emulsión. De todas las

combinaciones posibles, podemos decir que la que coincide más estrictamente con la reutilización de residuos como sustitución de áridos en mezclas bituminosas, es el reciclado en caliente en central. Esta técnica es capaz de producir mezclas asfálticas con un cierto porcentaje de áridos reciclados de una carretera deteriorada como materia prima. Este porcentaje puede variar desde el 0% hasta casi el 70% en función del tipo de planta de fabricación utilizada, y los tamaños de áridos sustituidos variarán en todo el huso. Los resultados obtenidos por estas experiencias muestran que las mezclas bituminosas recicladas en central se aproximan a las mezclas bituminosas convencionales en términos de costes de fabricación, puesta en obra y control de calidad, pero son mucho más económicas en términos ambientales y de consumo de materias primas [51,52].



Foto 2. Material fresado de capas de firme.

Además de estos dos residuos (que pueden considerarse los estandartes de la reutilización de residuos en mezclas asfálticas), existen otros que aunque su aceptación no ha llegado a niveles tan altos, también han desarrollado un buen número de experiencias. Es el caso de las escorias de acero, el plástico y el vidrio.

- **Escorias de Acero**

La forma angular, dureza y rugosidad superficial que poseen las escorias de acero las convierten en un material muy susceptible de ser utilizado como sustitutivo de los áridos gruesos que componen una mezcla bituminosa. La alta porosidad de éste material hace que la demanda de betún de la mezcla se incremente debido a la absorción, por ello a veces es conveniente combinar su empleo con fibras para evitar el escurrimiento del ligante. Existen estudios que han demostrado la mejora de las propiedades de la mezcla ante la acción del agua y la fatiga, cuando a éstas se incorporan escorias de acero, con filler calizo y un betún modificado con polímeros [53]. Otro estudio más reciente desarrollado en China, ha demostrado las mejoras en cuanto a resistencia a roderas y fisuración a bajas temperaturas, conseguidas por una mezcla con un 62% de escoria de acero como áridos [54]. Otra investigación ha demostrado las ventajas de su empleo en climas de bajas temperaturas, ya que las escorias de acero conservan mejor el calor que los áridos naturales [55]. En España, gracias a las acerías situadas en el norte del país, también se dispone de ciertas cantidades de este residuo, lo que se ha permitido desarrollar diversas experiencias en esta zona [56,57].



Foto 3. Escorias de Acero.

- **Residuos de plástico**

Al igual que ocurre con el polvo de neumático, los residuos de plástico pueden ser utilizados bien para sustituir parte de los áridos de una mezcla bituminosa, o bien, como modificador del ligante. Uno de los primeros estudios desarrollados con este material demostró la mejora de la resistencia a fatiga, así como de la trabajabilidad de la mezcla tanto a altas como a bajas temperaturas [32]. Cuando estos se emplean para sustituir a los áridos adicionados en forma de gránulos en unas proporciones del 30%, y con tamaños entre 2,36 y 5 mm, reducen la densidad de la mezcla en un 16% y aumentan tanto la estabilidad Marshall como la resistencia a tracción indirecta [58]. Estudios realizados con tamaños más pequeños entre 0,30 y 0,92 mm, y un porcentaje de adición del 15% han demostrado mejorar la resistencia de las mezclas ante las roderas y la acción del agua. En este caso las mezclas requerían un 20% más de ligante [59]. La fabricación y puesta en obra de mezclas con residuos de plásticos no requiere modificaciones de la planta ni de la maquinaria empleada.



Foto 4. Residuos de Plástico.

- **Residuos de Vidrio**

Las experiencias realizadas con este residuo no son recientes, en New York y Norwalk (Connecticut, EE.UU) a finales de los años ochenta ya se fabricaron mezclas que incorporaban un 20% de desperdicios de vidrio (Glasphalt) [60]. En esta investigación se demostró la importancia de la utilización de un agente estabilizador como la cal para evitar los desprendimientos de áridos y vidrio de la mezcla. Fueron dichos problemas de desprendimiento de áridos los que llevaron a realizar un estudio que permitiera conocer las cantidades máximas de residuos a incorporar en la mezcla [61]. Así, los tamaños de adición de este residuo en mezclas bituminosas han de ser de 4,75 mm como máximo (para evitar el pinchazo de los neumáticos), y en proporciones del 10-15%. Por otra parte, la adición de este residuo disminuye el contenido de ligante de la mezcla, y por tanto abarata su coste. Existen estudios que han demostrado que su aportación a las mezclas mejora la resistencia al deslizamiento [12]. A la hora de ejecutar las obras, puede emplearse la misma maquinaria que para las mezclas convencionales.



Foto 5. Residuos de Vidrio.

La envergadura del problema generado por el consumo de áridos naturales en la construcción de carreteras hace que se haya experimentado con otras tipologías de residuos además de las ya presentadas. Su empleo no está tan generalizado como en los casos anteriores, pero muchos de ellos presentan muy buenas aptitudes (bien por sus características o por su disponibilidad) para poder ser una solución seria a este problema.

- **Residuos de Construcción y Demolición (RCD)**

Se trata de uno de los residuos de mayor producción, y con unas características muy buenas para poder ser empleado como árido en todas las fracciones. A ello hemos de sumar, el esfuerzo de las administraciones por implantar la reutilización y reciclaje de estos residuos, ejemplo de ello en España son el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006, o su segunda parte 2007-2015, contemplada como el anexo 6 del Plan Nacional Integrado de Residuos. Fruto de estas circunstancias es la reutilización de áridos procedentes de los RCD en la fabricación de mezclas asfálticas. Dada la porosidad del residuo, las mezclas fabricadas con ésta poseen una densidad inferior (mayor cantidad de huecos/mezcla) y su contenido de ligante es superior. Los estudios llevados a cabo con este residuo han demostrado la viabilidad de su utilización en mezclas bituminosas, pero teniendo en cuenta que las propiedades mecánicas de éstas son inferiores a las convencionales (aunque cumpliendo la normativa) [3,62-64]. Los tamaños utilizados varían cubriendo el total del huso granulométrico, y los porcentajes a adicionar han llegado hasta el 50%. Se trata de una técnica en vía de desarrollo, pero con grandes perspectivas. Algunas de las alternativas para conseguir resultados más favorables en la fabricación de mezclas bituminosas serían la selección de los áridos reciclados antes de su adición, la disminución de la cantidad de éstos en la mezcla, el empleo de filleres estabilizadores como el cemento o la cal, o la utilización de betunes de mayor dureza o modificados.



Foto 6. RCD como áridos reciclados [65].

- **Cenizas Volantes:**

La utilización de cenizas volantes en mezclas bituminosas como filler, además del consumo de un residuo, supone una mejora en la trabajabilidad de la mezcla (ideal para trabajos a bajas temperaturas) y una reducción considerable de la energía de fabricación y puesta en obra. En los estudios desarrollados por Zoorob et al. Se demostró la posibilidad de la fabricación de mezclas con cenizas volantes a 110°C y su compactación a 85°C, no afectando la adición de este residuo al contenido de betún de la mezcla, y cumpliendo todas las prescripciones establecidas por la normativa [33]. Otros estudios han demostrado la posibilidad de su utilización como sustitutivo de las fracciones más finas del árido de las mezclas (tamaños máximos de 4,75 mm), siendo los resultados obtenidos para el ensayo Marshall y sensibilidad al agua satisfactorios a niveles de sustitución del 15-20% [66]. Investigaciones más recientes han definido mejor el comportamiento de las mezclas con este residuo, realizando ensayos de sensibilidad al agua y resistencia a deformaciones plásticas, y estudiando la posible toxicidad de su aplicación [67].

Los resultados obtenidos pusieron de manifiesto una mejora del comportamiento ante la acción del agua con la adición de este residuo, pero peores resultados ante deformaciones plásticas que los obtenidos por una mezcla convencional. Los valores de toxicidad estudiados demostraron su viabilidad de aplicación.



Foto 7. Cenizas Volantes.

- **Residuos de Mármol:**

El 30% en peso de los bloques de mármol termina convirtiéndose en un residuo tras su manufactura. De ese 30%, el 40% se conservan en forma de rocas fragmentadas. Un estudio desarrollado en Turquía, puso de manifiesto la viabilidad de reutilización de dicho material en la fabricación de mezclas bituminosas para capas intermedias de tráfico medio [4]. Por su parte, otro estudio [68], demostró la posibilidad de reutilizar los residuos en forma de polvo como filler, adicionados sin tratamiento alguno, y ofreciendo resultados satisfactorios ante deformaciones plásticas.



Foto 8. Residuos de bloques de mármol.

- **Residuos Sólidos Urbanos:**

Dada su enorme disponibilidad, los residuos sólidos urbanos es otro de los residuos con potencial para poder ser incorporados en la fabricación de mezclas bituminosas. Una de las primeras experiencias conocidas con este residuo fue la desarrollada con la escoria granulada obtenida tras la incineración [34]. La geometría de éstas es en forma de agujas y los tamaños más gruesos (por encima de 2,36 mm) no cumplen con el ensayo de desgaste de Los Ángeles, por tanto el papel desempeñado en la mezcla es árido de fracción arena. Las mezclas fabricadas con dicho residuo demandan mayor cantidad de ligante que las convencionales. Los resultados obtenidos tras el estudio demostraron un peor comportamiento de la mezcla a medida que el contenido de residuo iba aumentando, fijándose el límite en un 25% sobre la arena sustituida para poder cumplir con la normativa. Otro estudio posterior también llevó a cabo la sustitución de la arena de la mezcla con este residuo, pero esta vez incorporando la ceniza procedente de su incineración [69]. El tamaño máximo de ceniza empleado fue de 19 mm y el porcentaje de arena sustituida un 15-20%. Los resultados del estudio pusieron de manifiesto el empeoramiento de las propiedades Marshall de la mezcla con respecto a una mezcla de referencia. Una investigación más reciente profundizó en el empleo

de este material como parte del árido fino y el filler de una SMA (Stone Mastic Asphalt), se realizaron ensayos Marshall, de sensibilidad al agua, módulo resiliente, fatiga y resistencia a deformaciones plásticas, obteniéndose valores bastante satisfactorios para un porcentaje de adición del residuo de 8-16% [70].



Foto 9. Residuos Sólidos Urbanos.

- **Residuos de Cubiertas de Asfalto**

La composición de estos residuos es en su gran mayoría áridos finos y filler (50-60%), ligante endurecido (30-35%) y fibras de naturaleza orgánica o inorgánica (1-12%). La densidad tanto de los áridos como del filler está en torno a $2,6 \text{ gr/cm}^3$, y su valor ante el ensayo de desgaste de Los Ángeles en torno a 20. Dadas estas características, resultan muy ventajosos para ser empleados como áridos en la fabricación de mezclas bituminosas, así mismo un estudio de la Universidad de Nevada-Reno afirma que el empleo de estos áridos resulta más económico que el de los empleados tradicionalmente [71]. Según estudios realizados [35], mejoran la estabilidad Marshall de las mezclas y la resistencia a roderas, aumentan su rigidez y reducen el contenido de ligante a añadir en éstas (puesto que los áridos ya incorporan ligante envejecido). Además, el estudio se repitió a bajas temperaturas, presentando una mejora ante el

agrietamiento gracias al porcentaje de fibras contenido en dichos áridos. Por otra parte, un estudio distinto demostró la eficacia del empleo por separado de las fibras contenidas en las cubiertas de asfalto [36]. Se estudiaron dos tamaños de fibras 6,35 mm y 12,7 mm, y dos contenidos diferentes 0,35% y 0,5% sobre el peso total de la mezcla. Se demostró que la incorporación de dichas fibras en la fabricación de mezclas bituminosas aumenta la demanda de contenido de ligante, el porcentaje de huecos/mezcla y la rigidez, además, mejora la respuesta de éstas ante la acción del agua.



Foto 10. Residuos de Cubiertas de asfalto.

- **Residuos de fibras**

Los residuos de fibras procedentes de los neumáticos y alfombras también son reutilizables para incentivar la estabilización de las mezclas y evitar escurrimientos. Un estudio desarrollado en la Universidad de Clemson llevó a cabo un análisis comparativo entre las fibras comúnmente utilizadas (celulosa y polyester) en mezclas bituminosas, y las fibras de neumáticos y alfombras [9]. Los resultados obtenidos no encontraron diferencias ante deformaciones permanentes, y la resistencia ante la acción del agua fue mejor en los casos de las fibras de neumático y alfombra, que en los de las fibras convencionales. El tamaño de las fibras utilizado fue 106, 425 y 850 μm .



Foto 11. Residuos de fibras.

- **Residuos de Cobre**

Existe también una experiencia de reutilización de los residuos de cobre llevada a cabo en Bahrein, el estudio tiene ya algunos años y no es demasiado completo, pero en él se demuestra el cumplimiento de los parámetros Marshall de las mezclas diseñadas con dicho residuo [11]. Las densidades del material son muy elevadas ($3,39 \text{ gr/cm}^3$), mientras que su absorción, bastante baja, lo que se traduce en una reducción en el contenido de ligante de la mezcla. La fracción sustituida fue la arena de la mezcla, y los mejores resultados se obtuvieron reemplazando toda esta fracción por el residuo.



Foto 12. Residuos de Cobre.

- **Residuos de Taconita**

La taconita es un producto minero que cada año genera más de 125 millones de toneladas de subproductos [72]. En Minnesota, estos subproductos llevan utilizándose en la fabricación de mezclas asfálticas desde la década de los setenta [73]. Su densidad es un 10% superior a la de los áridos convencionales ($2,9-3,1 \text{ gr/cm}^3$) y su absorción algo superior (en torno al 1,15%). Los valores obtenidos en el desgaste de Los Ángeles son bastante buenos (en torno a 15), así como los del equivalente de arena (entre 73 y 95). Un estudio reciente llevado a cabo ha demostrado las mejoras en el módulo dinámico y resistencia a tracción indirecta que presentan las mezclas que incorporan este residuo en fracciones tanto gruesas como finas, y en porcentajes que varían desde el 25% hasta el 100% del total de los áridos [5]. Además, ha demostrado que su empleo reduce el ruido producido en rodadura.



Foto 13. Subproductos de Taconita.

- **Cenizas de Lodos de Depuradoras**

También en Bahréin, una experiencia llevada a cabo con las cenizas procedentes de la incineración de los lodos de depuradoras demostró que, las

mezclas que la incorporaban como filler cumplían satisfactoriamente con las prescripciones impuestas en la normativa [74]. El estudio se realizó también a altas temperaturas sin presentar ninguna anomalía y obteniendo resultados similares.



Foto 14. Lodos de depuradora.

- **Residuos de Cal**

Los resultados de un estudio desarrollado en Corea en el año 2006 demostraron que la utilización de este residuo como filler en la fabricación de mezclas asfálticas mejoraba las deformaciones permanentes de la mezcla, especialmente a bajas temperaturas [75]. Además, también se obtuvieron buenos resultados de la mezcla en el comportamiento a fatiga y se mejoró la resistencia a desprendimientos de áridos. El tamaño del residuo es de 0,075mm o inferior. Para poder ser empleado como filler, es necesario calentarlo a 100°C durante 24 horas y después tritarlo.

- **Residuos de Cuero**

Un estudio reciente llevado a cabo en Brasil, para pavimentos en frío, ha demostrado que la incorporación de un 0,3% de serrín de cuero mejora las propiedades de la mezcla y minimiza su agrietamiento [76]. Además se realizó

un análisis de las posibles sustancias nocivas que este residuo pudiera conferir a la mezcla, no detectándose ninguna anomalía.

- **Escorias fundidas de Residuos de Hospital**

Durante una investigación desarrollada en Malasia, se consiguió utilizar escorias obtenidas a partir de residuos de hospital como áridos en mezclas bituminosas [77]. El proceso de obtención del residuo consiste en recuperar las cenizas procedentes de la incineración de los residuos de hospital, y fundirlas en un horno a 1200°C, para posteriormente dejarlas enfriar a temperatura ambiente. El resultado son unas escorias de tamaño máximo 1,3 cm, con una densidad de 1,03 gr/cm³, una absorción en torno a 0,60% y un desgaste de Los Ángeles en torno a 25. Se realizó también un estudio sobre el contenido de metales pesados en el material, dando como resultado valores inferiores al máximo permitido por la normativa, concluyendo por tanto que dicha escoria, no se trata de un material peligroso. Los ensayos de carreteras desarrollados con ésta no fueron demasiado exhaustivos, obteniéndose un porcentaje óptimo de betún de 5,3%, y el cumplimiento de los valores Marshall para una mezcla de capa de rodadura en tráfico medio.



Foto 15. Residuos de hospital.

2.4.2. Aplicaciones

Pasamos ahora a resumir algunas de las experiencias que han sido desarrolladas en obra con mezclas bituminosas que incorporan alguno de los residuos anteriormente presentados. Para un mejor análisis, diferenciaremos entre las actuaciones realizadas en el ámbito internacional y las realizadas en nuestro país.

2.4.2.1. *Ámbito Internacional*

Son muchas las experiencias desarrolladas a nivel internacional con mezclas que reutilizan algún tipo de residuo, sobre todo, si se trata de material asfáltico reciclado (RAP) o polvo de neumático (NFU). Uno de los principales impulsores de la aplicación de ambas técnicas es EE.UU, la ejecución de un número muy considerable de tramos en sus diferentes estados le han permitido la realizar manuales de aplicación en obra muy completos [78-80].

Uno de los estados pioneros en la aplicación del empleo del polvo de neumáticos en mezclas asfálticas fue el estado de Arizona, cuya red de carreteras ya en el año 2001 presentaba un gran número de tramos construidos con esta técnica (Foto 16). Este estado ha sido el líder en el empleo de este tipo de mezclas, pero otros como California, Florida, Texas o Carolina del Sur, también han incurrido en su desarrollo. En las los sitios web de las principales asociaciones de fabricantes de mezclas asfálticas con polvo de neumático del país, se pueden encontrar numerosas referencias de estas aplicaciones [81,82]

Por su parte, en relación con el empleo de materiales reciclados procedentes de mezclas bituminosas también existen numerosas aplicaciones desarrolladas. La tecnología empleada en ellas es la más puntera a nivel mundial y por tanto, los resultados obtenidos son tan buenos como los de las mezclas convencionales. Asociaciones como ARRA (Asphalt Recycling and Reclaiming Association) [83] o NAPA

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

(National Asphalt Pavement Association) [84] recogen numerosas aplicaciones con este tipo de mezclas.

A pesar de que EE.UU es el país de referencia en la aplicación de estas técnicas, existen otras muchas experiencias en todo el mundo. Muchas de ellas pueden encontrarse en informes de la asociación mundial de la carretera [85].

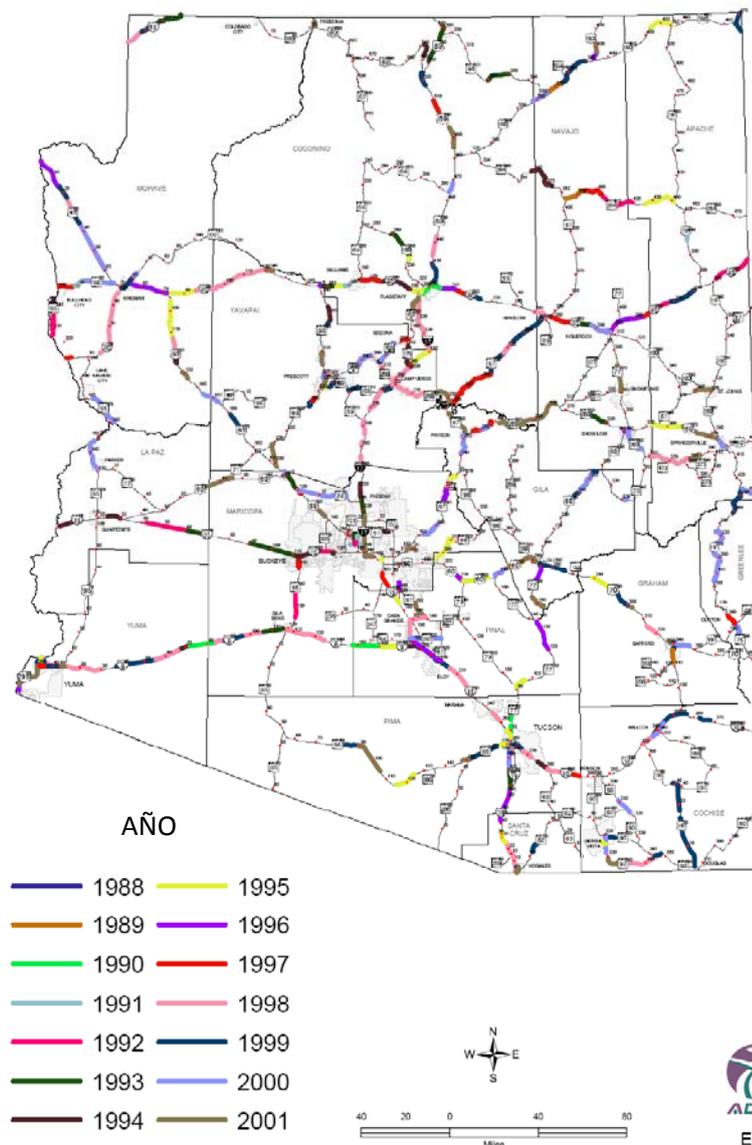


Foto 16. Tramos Construidos en el estado de Arizona con mezclas que incorporan PNFU.

Además de las numerosas aplicaciones realizadas con residuos de NFU y RAP, existen otros tramos realizados con algunos de los residuos presentados en el apartado anterior:

- **Escorias de Acero**

Uno de los primeros tramos de prueba llevados a cabo con este residuo fue en 1994 en Oregón (EE.UU), donde la mezcla extendida incorporaba un 30% de éste [86]. Tras su ejecución, se realizó un estudio de seguimiento a 5 años de las resistencias a deslizamiento y rodadura, y una evaluación general del procedimiento constructivo. Los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, por un lado, la mezcla resultó ser mucho más cara debido al incremento de su densidad (al tener las escorias de acero una porosidad acusada, la demanda de betún de la mezcla es superior) y de energía de fabricación y puesta en obra, por otro, el fracaso técnico (muy mala resistencia a roderas) se atribuyó al bajo contenido de los tamaños más finos de la escoria. Posteriormente a esta experiencia, han ido apareciendo otras que han permitido llevar a cabo el desarrollo de la técnica. Así, nos encontramos con varios tramos de prueba en Gran Bretaña [87,88], o en China [54], donde se utilizaron escorias de acero para fabricar una mezcla SMA (mezclas de última generación), que fue extendida en un tramo de 400 metros de largo y 11 de ancho, en condiciones extremas de precipitaciones y temperatura (-10°C/70°C). Los resultados obtenidos fueron mejores que los de la mezcla convencional de referencia en cuanto a resistencia a roderas y fisuración a bajas temperaturas.

- **Residuos de Vidrio:**

Las primeras aplicaciones del vidrio en mezclas asfálticas se dieron en EE.UU [60,61]. Uno de estos tramos, con un 20% de residuo incorporado, un kilómetro de largo y 7 metros de ancho, construido en Norwalk, puso de manifiesto una de las principales complicaciones que presentan estas mezclas, el desprendimiento de áridos. Desde entonces, los esfuerzos desarrollados en las

aplicaciones de la técnica han ido encaminados a resolver dicho problema. En esta línea, encontramos una de las aplicaciones más recientes llevada a cabo en el año 2001 en Taiwán [12], donde se ejecutaron 3 tramos de prueba, uno de 140 m², y otros dos de 510 m². La mezcla extendida en el primero de ellos incorporaba un 10% de residuo de vidrio, y las extendidas en los otros dos variaban de 0 a 15% el porcentaje reutilizado, incorporando además cal en cada mezcla para evitar los desprendimientos de áridos. Se midieron valores de resistencia al deslizamiento y reflexión de la luz en condiciones nocturnas, superiores a los de las mezclas convencionales, y no se detectaron anomalías en cuanto a desprendimientos.



Foto 17. Tramo de prueba con residuo de vidrio (Reflexión nocturna).

- **Cenizas Volantes:**

A pesar de que se ha empleado como elemento estabilizante en suelos, o como aditivo en cementos, la aplicación de cenizas volantes en la fabricación de mezclas bituminosas no está demasiado generalizada. Una de las actuaciones más significativas fue en 1991, cuando se llevó a cabo la ejecución de un tramo de prueba de 320 metros de longitud y 40 mm de espesor, en la Autopista A684 al norte de Inglaterra [33]. La mezcla empleada en la capa de rodadura (para tráfico muy pesados) incorporaba como filler cenizas volantes. Se analizaron la

resistencia a roderas, textura superficial y deflexiones, obteniéndose resultados tan buenos como los obtenidos en los tramos de mezcla convencional.

- **Residuos Sólidos Urbanos:**

También ha habido alguna experiencia con estos residuos en la puesta en obra de algún tramo de carretera. En Japón, se construyó un tramo donde la mezcla bituminosa empleada, incorporaba escorias de residuos urbanos en su fracción arena. Los resultados obtenidos frente a valores de roderas fueron sustancialmente mejores que los de las mezclas convencionales (de 2 a 4 mm en 3 años) [34].

- **Residuos de Cuero:**

En la autopista Hélio M. Salles en Sao Paolo (Brasil) se desarrolló la experiencia de la construcción de un tramo de prueba con una mezcla de microaglomerado en frío que incorporaba un 0,3% del peso de fibras de cuero [75]. El tramo con una longitud de 320 metros, una anchura de 3,5 metros (un solo carril) y un espesor de 13 mm, pertenecía a una categoría de tráfico medio. Para contrastar los resultados, en el otro carril se extendió una mezcla del mismo tipo, pero sin residuo. Según los investigadores, tras una primera inspección visual a los meses de puesta en servicio, el carril que incorporaba los residuos de cuero presentaba mejor aspecto visual. Como dato destacar que el consumo de cuero sólo en este tramo fue de 162 kg.



Foto 18. Tramo de prueba mezcla con residuos de cuero (carril de la izq.).

2.4.2.2. *Ámbito Nacional*

A pesar de que los estudios llevados a cabo para la incorporación de residuos en mezclas bituminosas en nuestro país no han sido pocos, la falta de apoyo por parte de las administraciones ha impedido la materialización de muchos de ellos en tramos de pruebas. Actualmente, esta actitud está cambiando y, a pesar de ser algo conservadores a la hora de su aplicación, cada vez se apuesta por el empleo de nuevos materiales, más sostenibles que los tradicionales.

Debido a esta actitud conservadora de nuestras administraciones de carreteras, las principales actuaciones a destacar en nuestro país en torno a este tema han sido llevadas con residuos que tienen unas características bien contrastadas para su uso en la fabricación de mezclas bituminosas (residuos procedentes de capas de firme, polvo de neumático y escorias de acero). En este apartado recogeremos algunas de las más significativas.

- **Material Reciclado procedente del fresado de Capas de Firme (RAP):**

Las primeras obras de material reciclado en España tuvieron lugar durante la década de los ochenta. Siguiendo las pautas marcadas en el ámbito

internacional y a partir del desarrollo de la normativa al respecto, el empleo del RAP en nuestro país se fue generalizando y aparecieron obras de reciclado de carreteras (tanto en frío como en caliente) en todas las regiones.

Como ya hemos comentado, la técnica de reciclado que realmente lleva a cabo la incorporación de un residuo en la fabricación de una mezcla bituminosa es el reciclado en caliente. Hoy en día las obras más significativas de esta técnica son los reciclados de altas tasas de RAP, que incorporan grandes cantidades del residuo a la mezcla. Entre las ejecutadas en nuestro país, podemos destacar las siguientes:

- Carretera Nacional CN-230, tramo Viella-Frontera Francesa, llevada a cabo por la Demarcación de Carreteras del Estado en Cataluña. La mezcla empleada fue una S20 con un 50% de RAP incorporado a la Mezcla.
- Autovía A-7, del P.K. 566 al P.K. 572, llevada a cabo por la Demarcación de Carreteras del Estado en Murcia. La mezcla utilizada también fue una S20 con un 50% de RAP incorporado.
- Carretera A-140, tramo Tamarite- Binefar (Huesca), realizada por la Diputación General de Aragón. Las mezclas empleadas en la construcción del tramo fueron una S20 con un 60% de RAP y una S12 con un 40% de RAP [89].
- Carretera A-5, tramo Toledo- Almaraz, llevada a cabo por la Demarcación de Carreteras del Estado en Extremadura. La mezcla utilizada fue una G20 con un 40% de RAP [90].

En Andalucía, las obras de reciclado ejecutadas han sido en su mayoría de reciclado en frío, aunque también encontramos alguna de reciclado en caliente. Entre estas podemos destacar las actuaciones llevadas a cabo en la Autovía A-92 a la altura de Granada, exactamente entre los puntos kilométricos 175,6 a 210, donde se llevó a cabo el extendido de una mezcla G25 con un 45% de RAP incorporado y 19 cm de espesor.[91]

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

- **Polvo de Neumático Fuera de Uso (PNFU)**

Al igual que pasara con el reciclado, la ejecución de tramos de obra con mezclas que incorporen polvo de neumático no empezó a generalizarse hasta que las administraciones tomaron parte en el tema y aparecieron las primeras normativas. Entre las experiencias llevadas a cabo con la vía húmeda podemos desatacar [44,92]:

Vía Húmeda con betún fabricado en central de betunes						
Tramo	Año	Longitud (km)	Tráfico	Espesor de la Capa (cm) y Tipo de Mezcla	Caucho en el Betún (%)	Betún (%)
C-433: Sevilla-Cazalla de la Sierra	1996	0,3	T2	3	-	5,7
SE-30	1996	0,3	T1	3	-	5,7
M-300: Alcalá-Arganda del Rey	1996	0,33	T2	5	-	4,9
M-221 y M-222: Valdaracete a Brea de Tajo	2002	12	T3	5 (S20)+5 (D20)	10	5,6
Travesía de Badarán	2004	0,7				
Travesía Argamasilla de Calatrava (Ciudad Real)	2004	0,5				
A-6 Tordesillas	2005	0,8	T0	6 (S12)	9	5,0

Vía Húmeda con betún fabricado en el lugar de empleo						
Tramo	Año	Longitud (km)	Tráfico	Espesor de la Capa (cm) y Tipo de Mezcla	Caucho en el Betún (%)	Betún (%)
A-372: Ubrique-El Bosque	2002	16	T3	5 (S20)+2,5 (F10)	13	5,5
M-221 y M-222: Valdaracete	2002	12	T3	5 (S20)+5 (D20)	10	5,6
AP-7	2002-2005	-	T1	3-6 (Abierta 12,5)	20	9
VA-20:Ronda Este Valladolid	2004	0,3	T0	6 (S20)	13	5,5
ZA-611: Toro a Venialbo	2004	4	T2	4 (S20)	13	5,5
VA-404: Medina del Campo-Matapozuelos	2004	0,820	T3	6(S12)	13	5,5
A-4: Temleque	2004	1,2	T0	4 (Abierta 12,5)	20	9

Vía Húmeda con betún fabricado en el lugar de empleo						
Tramo	Año	Longitud (km)	Tráfico	Espesor de la Capa (cm) y Tipo de Mezcla	Caucho en el Betún (%)	Betún (%)
A-6: Tordesillas	2005	0,8	T0	6 (PA-12)	9	5
M503: Pozuleo-Villanueva de la Cañada	2007	20	-	-	9	-
M119: Torrejón de Rey- Alcalá de Henaras	2007	20	-	-	9	-
AP-15: Refuerzo Firme	2008	40	-	-	9	-

Tabla 3. Tramos ejecutados con mezclas que incorporan PNFU por la vía húmeda.

Por su parte, algunas de las principales experiencias realizadas con la vía seca han sido [44,93]:

Tramo	Año	Longitud (km)	Tráfico	Espesor de la Capa (cm) y Tipo de Mezcla	Caucho (%)	Betún (%)
C-433: Sevilla-Cazalla de la Sierra	1996	0,3	T2	3 (F10)	1	5,7
M-300: Alcalá-Arganda del Rey	1996	0,33	T2	3(F10) 5(D20)	1	6,1
Ayuntamientos de Alicante, Altea, Elche, Murcia, Orihuela y Torrevieja (Varios tramos)	1998-2005	65	-	3 (M10)	0,5	5,2
Autovía del Noroeste	2003-2005	11	-	3 (F10)	0,5	5,2
Generalitat Valenciana	1996-2004	18,5 4,5	- -	3 (M10) 5 (S12)	0,5	5,2
Diputación de Alicante	1999-2002	15	-	3 (M10)	-	-
N-344: Travesía de Caudete	1999	1,1	-	3 (M10)	-	-
Autovía del Noreste C-415 (Murcia)	2003-2007			F10		
N-332: Favara	2004	2	-	3 (M10)	0,5	5,2
Carretera de Castraz	2004	1,5	T2	5 (S12)	1	5,34
Autovía CT-32 y A-7 (Murcia)	2008			M10		

Tabla 4. Tramos ejecutados con mezclas que incorporan PNFU por la vía seca.

- **Escorias de Acero:**

La importancia que ha tenido la industria siderúrgica en el norte de nuestro país, ha supuesto la disponibilidad de sus residuos para ser empleados como áridos en la fabricación de mezclas bituminosas.

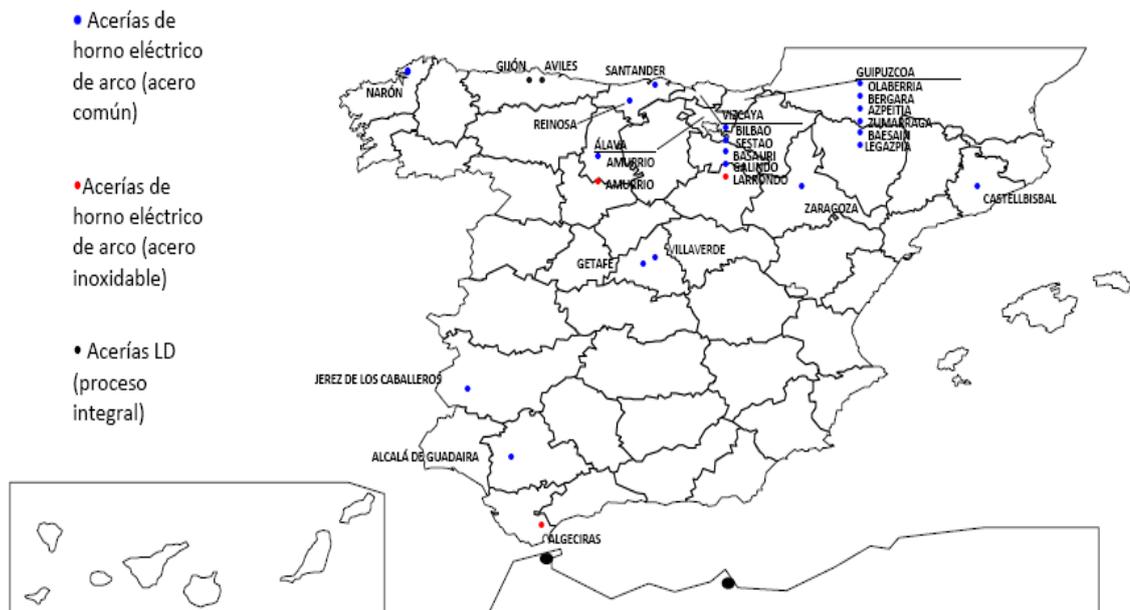


Figura 2. Situación de las acerías españolas [94].

Dadas las buenas características de este material para ser empleado, bien como árido grueso, o como árido fino, desde las administraciones de las zonas donde se producen principalmente estos residuos, se han llevado a cabo la construcción de varios tramos de carreteras con mezclas fabricadas a partir de éstos:

- Carretera GI 3610, tramo Zuzurkil-Andoain (Guipúzcoa), año 1998. Se utilizó una mezcla D12 para capa de rodadura cuya composición fue 80% escoria áridos gruesos, 16% arena y 4% filler cemento. La longitud de la actuación realizada fue de 500 m.

- Carretera eje Ballonti, tramo Nocedal-Balparda (acceso pol. Industrial campillo), año 2005. Se utilizó una mezcla F10 para capa de rodadura cuya composición granulométrica contenía el 100% de los áridos gruesos de escorias de acero. La longitud de actuación fue de 500 m.



Foto 19. Puesta en obra de mezcla con escorias de acero (Tramo Nocedal- Balparda).
Fuente: Acyma.

- Carretera eje Ballonti, acceso a planta industrial, año 2006. Se utilizó una mezcla S20 cuya composición granulométrica contenía el 100% de los áridos gruesos de escorias de acero. La longitud de actuación fue de 200 m.
- Carretera GI 2133, tramo Amezqueta-Alegia (Guipúzcoa), año 2006. Se extendieron dos tramos diferentes: uno con una S12 que a su vez combinaba el 100% de la fracción gruesa con áridos de escoria de acero con arena 100% de escoria en una parte, 100% arena caliza en otra y 50/50% arena caliza/escoria en otra; en el otro tramo extendido se utilizó una mezcla F10 con el 100% del árido grueso compuesto de escoria y la fracción arena 50/50% de caliza y ofita.

- Carretera GI 631, Zumarraga, año 2008. En el tramo se utilizó una mezcla BBTM 11ª 45/85-65 F con el 100% de la fracción gruesa escoria, y el 100% de la fina caliza.
- Carretera GI 2634, año 2008. Para la construcción de esta obra se utilizó un microaglomerado que incorporaba el 100% del árido escoria de acero.

2.5. Material Silestone®

En este apartado se realiza un análisis descriptivo del material objeto de estudio de esta tesis. Por un lado se analizarán las características del material en sí mismo (composición o forma de fabricación), y por otro, los residuos producidos durante su manufactura.

2.5.1. Descripción del Material Silestone®

Silestone® es una piedra artificial especialmente aplicable a decoración, y más concretamente, destinado a la producción de encimeras para cocinas, tableros para baños o mesas, pudiéndose emplear también en suelos, escaleras o similares. La empresa fabricante de este producto es el Grupo Cosentino S.A. [95], cuya sede central está situada en el municipio de Macael, en la comarca de Almanzora, Almería. Se trata de un grupo de carácter familiar y capital íntegramente español, con fábricas y centros de producción y gestión extendidos por todo el mundo (EE.UU, Francia, Alemania, Bélgica, Portugal, Reino Unido, Italia, México, Suecia, Suiza,...). Es la empresa líder mundial en la producción de superficies de cuarzo, entre las cuales, Silestone® es su principal producto.

Según datos recogidos en su patente (nº de publicación ES-2.187.313), Silestone® está compuesto en base a los siguientes materiales:

- Resina de poliéster insaturado, entrando en un porcentaje del 7% al 14% de la masa total.
- Micronizado de sílice, con una granulometría inferior a 60 micras, entrando en un porcentaje del 21% al 24% de la masa total.
- Triturado de sílice 0.1 a 0.3 mm, entrando en un porcentaje del 10% al 32% de la masa total.
- Triturado de sílice 0.3 a 0.8 mm, entrando en un porcentaje del 58.7% de la masa total.
- Triturado de sílice 1 a 2.5 mm, entrando en un porcentaje del 40% de la masa total.
- Cristales transparentes y de colores con granulometrías que van de 0,1 mm a 6 mm, en diferentes porcentajes de la masa.
- Vidrio de espejo con granulometrías que van de 0,1 mm a 6 mm, en diferentes porcentajes de la masa.
- Triturados de granito, también en diferentes granulometrías y porcentajes.
- Triturado de cuarzo, en diferentes granulometrías y porcentajes.
- Triturado de ferrosilíceo, en diferentes granulometrías y porcentajes.
- Además el producto fabricado admite infinidad de tipos diferentes de materiales, como plásticos, mármol, metales, o similares.
- La diversidad de colores se consigue mediante pigmentos o colorantes, principalmente óxidos inorgánicos (de hierro o similares) entrando en un porcentaje del 4% sobre el peso de la resina.
- El endurecimiento de la resina (y de la tabla) se consigue aditivando ésta con:
 - Un acelerador de cobalto, octoato de cobalto al 6% en cobalto, entrando en un porcentaje del 0.2 % sobre el peso de la resina.
 - Un catalizador, peróxido orgánico (perbenzoato de terbutilo), el cual actúa en caliente a 80 ° C, entrando en un porcentaje del 2% sobre el peso de la resina.

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

- Como ligante entre la resina de poliéster y la carga (sílice, cristal, etc.) se utiliza un silano, de fórmula Metacriloxipropiltrimetoxisilano, entrando en un porcentaje del 0.6% al 2% sobre el peso de la resina.

Se trata de un producto que aprovecha los materiales que las canteras de piedra y mármol desechan. Tras su proceso de fabricación, perfectamente integrado en una cadena de producción, se obtiene un material uniforme en toda su extensión y espesor, que posee una gran resistencia y vistosidad.



Foto 20. Material Silestone®.

Proceso de Fabricación

Se toman como fórmulas tipo las dos siguientes, aunque estas varían según los materiales a utilizar para realizar el tablero:

MASA A		MASA B	
Materia Prima	%	Materia Prima	%
Resina	7	Resina	7,5
Micronizado de Sílice	21	Micronizado de Sílice	24
0,1/0,3 mm Triturado de Sílice	32	Espejo 0,1/0,6 mm	19
1/ 2,5mm Triturado de Sílice	40	Espejo 0,6/1,2 mm	15,5
		Espejo 1,2/3 mm	34

Materia Prima	% sobre el peso de la resina
Catalizador	2
Acelerador	0,2
Silano	1
Colorante	4 (Pigmentos) 10 (en colorantes) en estado líquido

El proceso comienza en la zona de almacenaje y pesaje de los sílices. Los materiales de sílice están almacenados de la siguiente manera: el micronizado y el granulado de 0.1/0.3 mm están en silos verticales. Los de granulometría gruesa 0.3/0.8 y 1/2.5 mm, hasta 6 mm, se almacenan en el interior de las naves en sus correspondientes atroses.

El material ensilado es conducido a unos silos más pequeños (1), que son los de trabajo diario y en los que se dosifica la cantidad de material que se va a pesar. El material que se almacena en la nave se lleva a unas tolvas que son las encargadas de dosificar la cantidad de material necesaria para realizar la mezcla.

Una vez pesadas las cargas de sílice necesarias, el material es conducido hacia las mezcladoras (2) a través de dos cintas transportadoras (una para cada mezcladora). Son estas cintas de transporte las que actúan como básculas de pesaje de estos materiales.

El proceso continúa en la zona de mezcla. Para realizar la mezcla de las cargas de sílice y de resinas existen en un ejemplo de realización dos mezcladoras planetarias en una de las plantas de fabricación y tres mezcladoras planetarias en la otra planta de fabricación, independientes pero sincronizadas, con una capacidad máxima de carga entre las dos de 1.350 kg en una de las plantas y 2.000 kg en la otra planta. Se utilizan dos o tres mezcladoras para tener la posibilidad de realizar monocolors, bicolors o tricolors; es decir, en cada mezcladora se puede realizar un color diferente homogeneizándose seguidamente las masas en otra mezcladora de descarga (mezcladora de homogeneización). Esta última mezcladora no mezcla realmente el

material, sino que sólo lo mueve para homogeneizar las mezclas de colores realizadas en las mezcladoras propiamente dichas.

El proceso de mezcla es el siguiente (para cada mezcladora y planta de fabricación): Sobre las mezcladoras hay un pequeño tanque (1) (con capacidad máxima de 100 kg) para recibir la resina de poliéster preacelerada necesaria para realizar la mezcla, en estado líquido. Este tanque actúa a la vez como peso de la resina. La resina llega a este pequeño tanque (R) procedente de otros dos (con capacidad de 4000 Kg cada uno) que están situados al lado de las mezcladoras y en los cuales la resina se ha preparado con la cantidad de acelerador y silano correspondientes para la fabricación diaria. Sobre este pequeño tanque donde se pesa la resina se sitúan otros dos pequeños tanques (que también actúan como peso) para recibir, uno el catalizador (C) y otro el color (A), en la cantidad necesaria.

Figura 3. Proceso de fabricación de Silestone®.

Existe también una tolva de recogida de las cargas de sílice y los materiales que lleve en ese momento la fabricación del color determinado (cargas que han sido pesadas en la zona de los silos), situada encima de la mezcladora que alimenta dichas cargas a la

misma. Una vez completados los pesos de los materiales, cargas (sílice, etc), resina, catalizador y colorante, la mezcla se realiza siguiendo el proceso:

- El catalizador (C) y el colorante (A) caen al tanque (R) de la resina y se mezclan. A su vez, las cargas de los triturados entran en la mezcladora (Si) y se mezclan. El tiempo de mezcla es de 30 segundos.
- Una vez realizadas estas mezclas, la mezcla de resina cae a la mezcladora (2) para mezclarse con las cargas de los diferentes triturados durante 100 segundos, una vez terminada la descarga total de resina. Es decir que todas las cargas de diferentes triturados se mezclan homogéneamente con la resina siendo una mezcla totalmente uniforme en todo su conjunto. Estas mezclas se realizan a temperatura ambiente. Finalizada la mezcla en las mezcladoras, la masa se descarga a la mezcladora de homogeneización.
- Una vez vaciadas las mezcladoras, se produce automáticamente una nueva pesada de materiales para realizar otra mezcla, es decir, que el proceso de mezcla se realiza en fase discontinua, produciéndose mezclas cada 10/15 minutos aproximadamente.
- De la mezcladora de homogeneización, el material (masa) se descarga a una cinta transportadora (C) para conducir la masa a la zona de prensado y realización de la tabla.

A continuación el proceso pasa a la zona de prensado. En esta zona se tiene el distribuidor de masa con el marco para la realización de la tabla, así como la prensa de comparación de la misma.

El distribuidor (3) recoge la cantidad de material necesario para el llenado y realización de una tabla en el marco de dimensiones las específicas de fabricación. Una vez cargada por el distribuidor la cantidad de masa necesaria, éste lo reparte uniformemente en el marco.

A continuación, el distribuidor y el marco se elevan para recoger más cantidad de material con la que realizar una nueva tabla, descansando toda la tabla (masa) en una cinta transportadora. Esta masa es conducida a través de la cinta hacia la prensa de vibro-compresión al vacío (4), la cual también dispone de un marco para sujetar la masa en los extremos cuando la comprime y compacta.

El funcionamiento de la prensa es el siguiente: en primer lugar baja y realiza un vaciado de aire en el interior de la cámara de la tabla durante 60 segundos hasta conseguir el máximo vacío posible intentando llegar hasta cero atmósferas. Seguidamente el pistón de la prensa, que tiene las mismas dimensiones que la tabla a comprimir, martillea sobre ésta, a razón de 3400 r.p.m. (martilleos) de 50 a 60 segundos, quedando la tabla completamente compactada.

Al comprimir la prensa la masa de la mezcla de la mezcladora, ésta se convierte en un bloque totalmente compacto y uniforme en todas sus partes, donde hay la misma cantidad de materiales en la parte de arriba de la tabla, en la de abajo, en la central, en los extremos o en cualquier otro punto de la tabla. Es decir que el corte de la tabla presenta la misma cantidad de resina, triturados, etc. que en la superficie.

Una vez prensada, la tabla es conducida hacia el horno de catálisis (5) a través de la cinta transportadora (endurecimiento de la tabla). En la zona de catálisis las tablas entran en un horno cuya temperatura será de unos 85º C. para endurecerse. El calentamiento del horno se realiza en circuito cerrado con aceite dietérmico calentado con gasóleo. El horno tiene capacidad para 18 tablas, apiladas verticalmente, cada tabla es introducida entre dos planchas huecas por donde circula el aceite caliente.

El hecho de que la capacidad del horno sea de 18 tablas es para que cada una de ellas permanezca en el horno un mínimo de 25 minutos, que es el tiempo necesario para que la resina de poliéster se polimerice y, por consiguiente, se logre el perfecto endurecimiento de la tabla.

El movimiento del horno es de sube-baja, de tal forma que se va llenando de tablas y subiendo o bajando, piso por piso, hasta completar los 18 pisos. La primera tabla en salir del horno será la primera que entró y en su lugar entraría la tabla 19 y así sucesivamente de tal forma que al horno entren y salgan tablas cada 2 minutos, que además es el tiempo que tarda la prensa entre el prensado de una tabla y el de la siguiente.

Una vez sacadas las tablas del horno, se almacenan en las naves de apoyos verticales, para su enfriamiento y posterior calibrado, pulido y cortado en la línea de elaborado final, en las dimensiones que demande la división comercial. El calibrado, pulido y cortado se realiza con máquinas convencionales como las utilizadas para granitos, mármoles, etc.

2.5.2. Descripción de los residuos Silestone®

Durante el desarrollo de su proceso de fabricación, la industria de Silestone® produce dos tipos de residuos.

- Por un lado aparecen los lodos procedentes del lavado del material. Se trata de un residuo en forma de polvo muy fino formado principalmente por cuarzo, resultante de una decantación previa. Según los datos aportados por el fabricante, la producción este residuo se encuentra en torno a las 6000 tn/mes.

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas



Foto 21. Residuos lodos procedentes del lavado de Silestone®.

- Por otro lado tenemos los recortes de las tablas de Silestone®. Tanto la composición de dichas tablas, como el tamaño, han sido expuestos en el apartado anterior (recordar que el espesor máximo de estas tablas es de 3 cm). La producción se encuentra en torno a las 600 tn/mes.



Foto 22. Residuos procedentes del recorte de las tablas de Silestone®.

Actualmente, el destino de estos residuos es su depósito en vertederos cercanos a la zona donde está situada la fábrica, con los costes ambientales y económicos que ello conlleva. Como hemos expuesto en apartados anteriores, esta forma de tratamiento de residuos es la más desfavorable para el medio ambiente, y por tanto, va en contra de toda política de desarrollo sostenible. Al no conocerse alternativa alguna de valorización, y dado el gran éxito del producto en todo el mundo (lo que lleva asociado la continua producción de sus residuos), la acumulación de estos residuos se ha convertido en un serio problema para el grupo Cosentino S.A., muy interesado en encontrar una solución ambientalmente favorable para éstos.

2.6. Conclusiones (motivo de la tesis)

Por todas las circunstancias planteadas durante el desarrollo de este capítulo, y en vista a las características presentadas por los recortes de las tablas de Silestone® (su aparente dureza y similitud con los materiales minerales comúnmente utilizados como áridos en la construcción de carreteras), desde esta investigación se decidió estudiar la posibilidad de dar una solución al problema de la acumulación de estos residuos, llevando a cabo su valoración como sustitutivo de los áridos naturales en la fabricación de mezclas bituminosas para firmes de carreteras.

Así, se ha elegido como título de la presente tesis doctoral “Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la fabricación de Mezclas Bituminosas”.

3. OBJETIVOS

3.1. Introducción

Durante el desarrollo del capítulo anterior se ha puesto de manifiesto la problemática existente en torno a los residuos y su gestión. El nivel de desarrollo alcanzado por la sociedad actual, ha motivado el aumento y diversificación de éstos, convirtiéndolos en una amenaza seria para el medio ambiente. Una de las premisas para poder paliar este problema es el establecimiento de una gestión de residuos eficiente. Este hecho implica la implantación de actividades sostenibles en todos los procesos productivos, capaces de reducir y reutilizar dichos materiales.

Además de este aumento y diversificación de los residuos, el nivel de desarrollo alcanzado también ha traído consigo un incremento del consumo de los recursos naturales que el medio aporta. Dentro de estos recursos se encuentran los áridos de cantera utilizados en las actividades constructivas, y en especial, dadas las grandes cantidades que en ella se consumen, en la construcción de carreteras. El aumento de la demanda de estos materiales ha provocado un problema de escasez y falta de disponibilidad (en lo que ha contribuido la disminución del número de canteras, debido a las cada vez mayores restricciones ambientales), que además ha quedado traducido en un incremento del coste económico de éstos.

En base a estas circunstancias, la construcción de carreteras se presenta como una gran oportunidad para llevar a cabo la reutilización de residuos como sustitución de los áridos vírgenes. Este hecho permite no solo un ahorro en el consumo de recursos naturales y una disminución del impacto asociado a su extracción y transporte, sino también la reducción de los volúmenes de residuos que actualmente se acumulan en los vertederos. Una de las actividades más propicias para poder llevar a cabo esta reutilización de residuos como sustitución total o parcial de los áridos, es la fabricación de mezclas bituminosas utilizadas en la construcción del firme.

Durante los últimos años, tal y como se ha recogido en el capítulo anterior, se ha establecido la tendencia de reutilizar cualquier material que sea capaz de cumplir con las exigencias necesarias para ser empleado como árido en la fabricación de mezclas asfálticas. Esta tendencia es aún más beneficiosa si el material reutilizado se trata de un residuo. Los residuos que tradicionalmente han tenido más aceptación para desempeñar estas funciones han sido aquellos que han presentado como característica principal la dureza, así podemos encontrar áridos procedentes de la reutilización de escorias de acero, de fresado de capas de firme, de residuos de construcción y demolición entre otros.

Dentro de este tipo de residuos podrían englobarse los generados durante el proceso de fabricación de la piedra artificial decorativa Silestone®. La dureza que éstos presentan, hace posible la realización de un estudio que permita su reutilización como áridos en la fabricación de mezclas bituminosas. Hasta la fecha, no se conoce ninguna opción de valorización y los residuos están siendo acumulados en vertederos cercanos a la zona de producción. Además, el éxito sufrido por este producto durante los últimos años, ha traído consigo un aumento considerable en la generación de sus residuos, convirtiéndose en un serio problema para la empresa fabricante.

3.2. Objetivo General

En base a estas circunstancias, se establece como objetivo general de la presente investigación el estudio de la posibilidad de reutilización de los residuos procedentes de la industria de Silestone® como áridos en la fabricación de mezclas bituminosas para su empleo en firmes de carreteras.

La incorporación de estos residuos en la fabricación de mezclas bituminosas puede concebirse como una solución eficaz para resolver, por un lado, el problema de acumulación de éstos en vertederos (y los perjuicios ambientales que ello conlleva), y

por otro, el problema de escasez de áridos para la construcción de carreteras (disminuyendo además los costes).

Podemos decir, que la consecución de dicho objetivo general se concreta en el logro de unos objetivos principales que marcarán el desarrollo de la investigación, y éstos a su vez, en unos objetivos secundarios, que marcarán las etapas a seguir durante todo su desarrollo.

3.3. Objetivos Principales

El objetivo general de la investigación se concreta en los siguientes objetivos principales:

1. Caracterización de los residuos de Silestone® para su reutilización en la fabricación de mezclas bituminosas.
2. Diseño en laboratorio de mezclas bituminosas con la incorporación de residuos de Silestone®.
3. Análisis de la viabilidad de fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas con residuos de Silestone®.

3.4. Objetivos Secundarios

Para alcanzar estos objetivos principales se plantean los siguientes objetivos:

1. Análisis del comportamiento de los residuos de Silestone® ante los ensayos prescritos para áridos de carreteras en el PG-3.
2. Análisis del comportamiento de los residuos de Silestone® ante ensayos específicos que reproduzcan las condiciones de fabricación de la mezcla que puedan resultar más desfavorables.

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

3. Diseño de las fórmulas de trabajo de las mezclas bituminosas con residuos de Silestone®
4. Análisis del comportamiento de las mezclas bituminosas con residuos de Silestone® ante los ensayos prescritos en el PG-3 para mezclas bituminosas.
5. Análisis del proceso de fabricación, extendido y compactación de las mezclas bituminosas con residuos de Silestone®.
6. Análisis económico del proceso de fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas con residuos de Silestone®.

4. METODOLOGÍA

4.1. Introducción

En este capítulo se expone la metodología a seguir durante el desarrollo de la investigación. Para poder llevar a cabo el cumplimiento de los diferentes objetivos propuestos, se establece una metodología detallada que permite estructurar el estudio en distintas etapas o fases, donde cada una de ellas tiene sus propios objetivos (principales y secundarios), procedimientos, y tareas a realizar.

Las fases de la investigación se estructuran y ordenan de manera cronológica, coincidiendo con los objetivos principales marcados en el capítulo anterior. En primer lugar se realiza la caracterización de los residuos de Silestone®. Ésta comprende el análisis del comportamiento de los residuos, tanto ante los ensayos prescritos por la normativa (PG-3), como ante otros ensayos más específicos que puedan aportar algo más sobre su comportamiento durante el proceso de fabricación de la mezcla. Posteriormente, se lleva a cabo el diseño de mezclas bituminosas con la incorporación de dichos residuos. Para ello se realiza el diseño de las fórmulas de trabajo correspondientes, y se analiza el comportamiento de las mezclas fabricadas con éstas ante los ensayos impuestos por la normativa correspondiente. Finalmente, se procede a analizar los trabajos de fabricación en planta y puesta en obra de las mezclas diseñadas durante los trabajos de laboratorio. Para ello, se establece un procedimiento de control tanto durante la fabricación de la mezcla, como durante su extendido y compactación. Además, este estudio se concluye con un análisis económico que permita decidir si es o no viable la reutilización de este residuo como árido para la fabricación de mezclas bituminosas.

4.2. Caracterización de los residuos de Silestone® para su reutilización en la fabricación de mezclas bituminosas

Para poder llevar a cabo la incorporación de un residuo como sustitutivo de los áridos naturales en la fabricación de una mezcla bituminosa, el primer paso a realizar es la caracterización de dicho residuo. Este proceso se basa en la ejecución de una serie de ensayos que permiten determinar las características intrínsecas del material (angulosidad, dureza, resistencia al pulimento o limpieza), y cuyos resultados permiten establecer la aptitud, o no, para poder ser empleado como árido en la fabricación de mezclas asfálticas.

Si las características del residuo tal y como se genera (dimensiones, forma, limpieza) impiden su incorporación directa a la mezcla, éste debe ser sometido a un tratamiento previo, que permita adaptarlo a las condiciones exigidas para su caracterización.

A la hora de seleccionar el plan de ensayos a ejecutar durante la caracterización, debe tenerse en cuenta tanto las exigencias marcadas por la normativa a cumplir por los áridos de carreteras, como aquellos aspectos específicos del residuo en sí, que puedan influir en su comportamiento durante su empleo en la fabricación de las mezclas.



Además, si la sustitución de los áridos por el residuo es solo parcial, debe llevarse a cabo también la caracterización de los áridos naturales a utilizar en la fabricación de la mezcla.

4.2.1. Tratamiento Previo de los Residuos

Dado que las dimensiones de los recortes de las tablas de Silestone® no permiten su incorporación directa a la mezcla, éstos debieron someterse a un tratamiento previo. Éste consistió en la reducción del residuo en tres fracciones de uso común en carreteras (12/25, 6/12 y 0/6 mm) mediante el empleo de una machacadora de mandíbulas.



Foto 23. Fracción 12/25 Silestone®.

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**



Foto 24. Fracción 6/12 Silestone®.

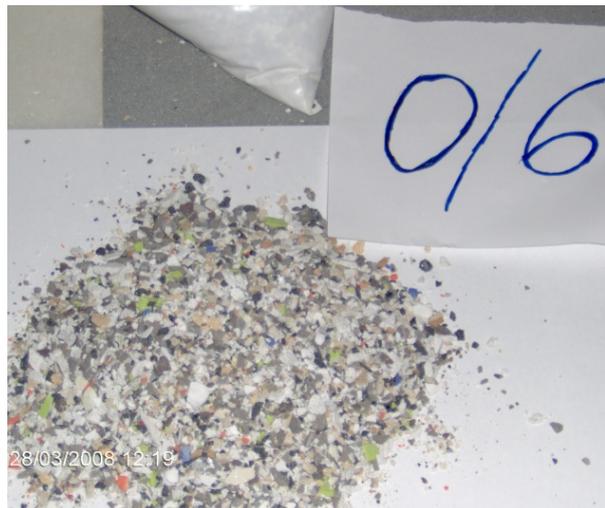


Foto 25. Fracción 0/6 Silestone®.

Como ensayos de control para verificar si este proceso de machaqueo había resultado eficiente, se realizaron los ensayos de forma prescritos por el PG-3 para áridos de carreteras (índice de lajas y angulosidad del árido). Los resultados obtenidos demostraron la necesidad de repetir el tratamiento puesto que se obtuvo un índice de

lajas del 24,5% (cuando el PG-3 lo limita a un máximo de 20%) y un valor de 45,6% para el ensayo de caras de fractura (estando limitado a un mínimo de 75%).

Así, se modificó el proceso utilizando en esta ocasión una machacadora de mandíbulas para la obtención de una fracción intermedia de 0/200 mm, y posteriormente, un molino de impactos, con el que se obtuvieron las fracciones definitivas a utilizar (0/3, 3/6 y 6/12 mm).



Foto 26. Fracción 0/200 Silestone®.



Foto 27. Fracción 6/12 Silestone® definitiva.



Foto 28. Fracción 0/3 Silestone® definitiva.

De la misma forma que tras el tratamiento anterior, se repitieron los ensayos de índice de lajas y coeficiente de caras de fracturas, resultando esta vez satisfactorios, con valores del 18% y 94% respectivamente.

4.2.2. Plan de Ensayos General

Tras la obtención de las fracciones definitivas a utilizar durante el desarrollo de la investigación, se procede a la caracterización del material. El plan de ensayos general a ejecutar para llevar a cabo dicho proceso se define en base a las prescripciones establecidas por el PG-3 para áridos utilizados en la fabricación de mezclas bituminosas. Las normas utilizadas para ello, así como para el resto de la investigación, son las Normas Técnicas Españolas NLT [96] (Ensayos de Carreteras) del Centro de Estudio de Carreteras, y las normas UNE-EN [97] de la Asociación Española de Normalización y Certificación.

Además de los ensayos exigidos por el PG-3 para áridos gruesos y finos, los residuos de Silestone® se someterán a los ensayos de adhesividad con el betún, y los ensayos de densidad relativa y absorción. El plan de ensayos general queda estructurado de la siguiente manera:

Plan de Ensayos General	
Fracción Gruesa Residuos Silestone®	Ensayo de Lixiviación según NLT-326
	Análisis Granulométrico según UNE-EN 933-1
	Proporción de Partículas trituradas (angulosidad del árido grueso) según UNE-EN 933-5
	Forma del árido grueso (Índice de Lajas) según UNE-EN 933-3
	Resistencia a la fragmentación del árido grueso (Coeficiente Los Ángeles) según UNE-EN 1097-2
	Resistencia al pulimento del árido grueso (coeficiente de pulimento acelerado, CPA) según anexo D de la UNE 146130
	Limpieza del árido grueso (contenido de impurezas) según anexo C de la UNE 146130
	Densidad relativa y absorción (NLT-153)
	Análisis de la adhesividad de las partículas con el betún , según NLT-166
Fracción Fina Residuos Silestone®	Equivalente de Arena según UNE-EN 933-8, y en su caso, Azul de Metileno según UNE-EN 933-9
	Análisis Granulométrico según UNE-EN 933-1
	Resistencia a la fragmentación del árido fino (Coeficiente Los Ángeles) según UNE-EN 1097-2
	Densidad relativa y absorción (NLT-153)
	Análisis de la adhesividad de las partículas con el betún , según NLT-355

Tabla 5. Plan de ensayos general de caracterización del residuo Silestone®.

4.2.3. Plan de Ensayos Específico

Dadas las características y composición del material estudiado, se programan dos ensayos más específicos con el objetivo de analizar la influencia que determinadas condiciones durante el proceso de fabricación de la mezcla puedan tener sobre su comportamiento.

Según datos recogidos en la ficha de seguridad del producto [98], se debe prestar especial atención a la hora de someter el material a altas temperaturas. Para impedir la degradación de la resina de poliéster que le da consistencia, el fabricante recomienda evitar la exposición de Silestone® a temperaturas superiores a 170°C. Las temperaturas de fabricación de las mezclas se encuentran en torno a ésta, de manera que se decide establecer un plan de ensayos específico que permita comprobar si la resina sufre alguna modificación que pueda afectar a las propiedades del residuo.

Por un lado, se decide realizar un ensayo que sea capaz de medir la resistencia del residuo después de someterlo a un calentamiento previo, como si del proceso de fabricación de la mezcla se tratara. Tanto la temperatura, como el tiempo de duración al que se expone el residuo, serán sustancialmente superiores a los utilizados habitualmente durante la fabricación de la mezcla. El ensayo elegido es el de resistencia a la fragmentación (Coef. de desgaste de Los Ángeles), y el acondicionamiento del residuo se realizará a una temperatura de 200°C en estufa durante un periodo de tiempo de una hora.

Por otro lado, para poder determinar exactamente si el aumento de temperatura modifica las propiedades del residuo internamente, se lleva a cabo un control de pérdida de peso por temperatura (según UNE-EN 196-2). Además, mediante este ensayo se pretende encontrar el punto en el que el material comienza a ser verdaderamente vulnerable a ésta.

Plan de Ensayos específico
<u>Resistencia a la fragmentación del árido (Coeficiente Los Ángeles) según UNE-EN 1097-2, tras someter los áridos a una temperatura de 200 °C durante un periodo de una hora.</u>
<u>Ensayo de pérdida de peso por temperatura según UNE-EN 196-2</u>

Tabla 6. Plan de ensayos específico de caracterización del residuo Silestone®.

4.2.4. Plan de Ensayos Áridos Naturales

La investigación presentada combina como áridos de la mezcla los residuos de Silestone®, con otros áridos naturales, concretamente, ofitas en la fracción gruesa y

caliza en la fina. Además, como filler (fracción polvo mineral), se utiliza material de aportación, que en este caso es cemento.

Dichos materiales también han de ser caracterizados antes de ser utilizados en la fabricación de una mezcla bituminosa. El plan de ensayos utilizado para ello es el propio realizado a estos materiales:

Plan de Ensayos Áridos Naturales	
Fracción Gruesa Ofítica	Análisis Granulométrico según UNE-EN 933-1
	Proporción de Partículas trituradas (angulosidad del árido grueso) según UNE-EN 933-5
	Forma del árido grueso (Índice de Lajas) según UNE-EN 933-3
	Resistencia a la fragmentación del árido grueso (Coeficiente Los Ángeles) según UNE-EN 1097-2
	Resistencia al pulimento del árido grueso (coeficiente de pulimento acelerado, CPA) según anexo D de la UNE 146130
	Limpieza del árido grueso (contenido de impurezas) según anexo C de la UNE 146130
	Densidad relativa y absorción (NLT-153)
Fracción Fina Caliza	Equivalente de Arena según UNE-EN 933-8, y en su caso, Azul de Metileno según UNE-EN 933-9
	Análisis Granulométrico según UNE-EN 933-1
	Densidad relativa y absorción (NLT-153)
	Análisis de la adhesividad de las partículas con el betún , según NLT-355
Filler Cemento	Análisis Granulométrico según UNE- EN 933-1
	Densidad aparente del polvo mineral según NLT-176

Tabla 7. Plan de ensayos general de caracterización de los áridos naturales.

4.3. Diseño en laboratorio de mezclas bituminosas con la incorporación de residuos de Silestone®

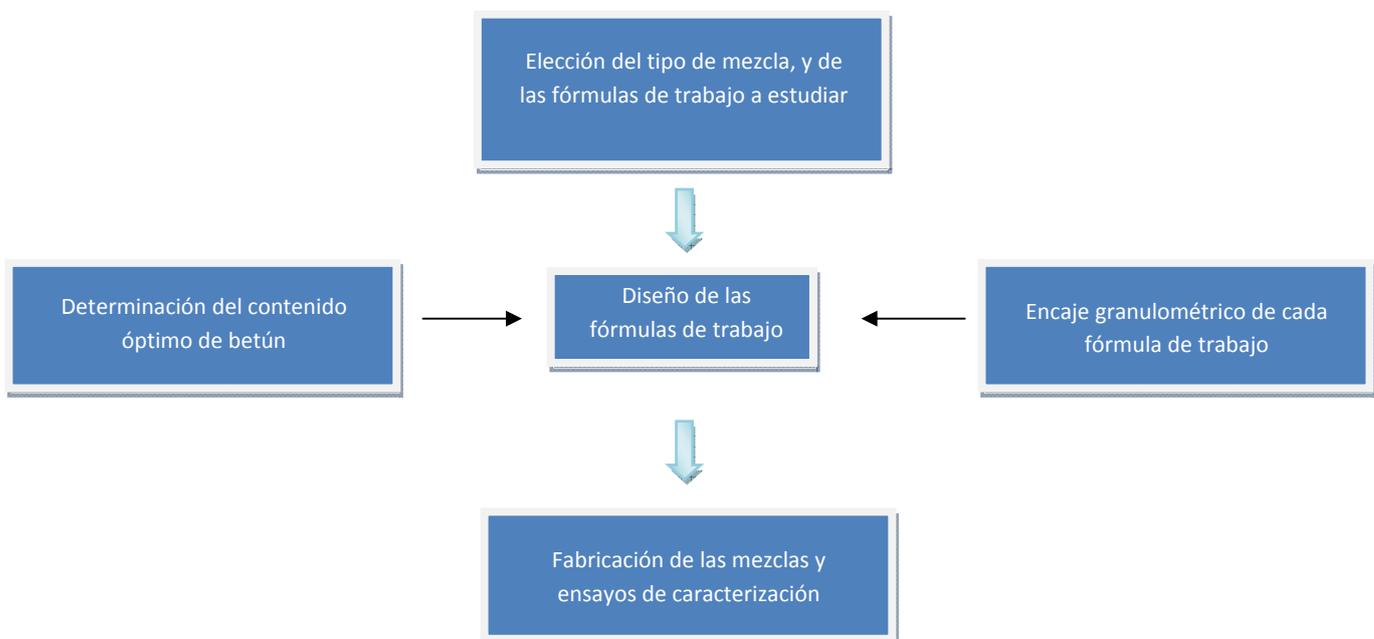
Una vez caracterizado el residuo y verificadas sus aptitudes para ser reutilizado como árido en la fabricación de mezclas bituminosas, el siguiente paso en la investigación es el diseño en laboratorio de mezclas bituminosas que incorporen residuos Silestone® como sustitutivos de los áridos convencionales.

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

En primer lugar es necesario establecer el tipo de mezcla sobre el que se desarrollará el estudio. Una vez seleccionada ésta, se decidirá el número de fórmulas de trabajo a estudiar, así como las variables a introducir en éstas.

Posteriormente debe llevarse a cabo el diseño de cada una de las fórmulas de trabajo de la mezcla a estudiar. Para ello deberá obtenerse el encaje granulométrico a utilizar en cada fórmula (a partir de los materiales caracterizados en la primera etapa de la investigación), así como los contenidos óptimos de betún a añadir.

Finalmente, tras la obtención de las fórmulas de trabajo, se procede la fabricación en laboratorio de las diferentes mezclas, las cuales se someterán a los ensayos establecidos en el PG-3 para decidir si cumplen las condiciones para ser utilizadas en la construcción de firmes de carreteras.



4.3.1. Elección del tipo de mezcla y fórmulas de trabajo

Muchas de las investigaciones realizadas hasta la fecha en torno a este tema, han tendido a reutilizar los residuos en mezclas bituminosas para capas de base o intermedias, con el objetivo de poder valorizar mayor cantidad de éstos. En este estudio se intenta ir más lejos y, además de perseguir un consumo del residuo, se busca algún valor a aportar en el comportamiento de las mezclas con su incorporación. Por ello, se decide que lo más adecuado será llevar a cabo el estudio en mezclas para capas de rodadura que, además de ser las más exigentes (por lo que sus resultados podrían ser extrapolados a otras mezclas), son las que proporcionan mayores propiedades al resultado final de la carretera.

La mezcla elegida para el desarrollo de la investigación es una F10, actualmente denominada BBTM 11A, desde la entrada en vigor de la O.C. 24/2008 [42]. Las mezclas F, de capa fina, son junto con las M, monogranulares, los dos tipos de mezclas bituminosas discontinuas para capas de rodadura. Cada una de ellas se subdividen en 2 tipos en función del tamaño máximo del árido (8 y 10 mm). La discontinuidad se consigue por la eliminación de tamaños intermedios entre la fracción 2,5 y 5 mm lo que las dota de una elevada macrotextura y resistencia a las deformaciones plásticas. Centrándonos en las de tipo F, se colocan en espesores comprendidos entre los 2 y 3,5 cm y están formadas por un 65-80% de árido grueso, 20-35% de árido fino y un 7-10% de filler. Su contenido en ligante es igual o superior al 5,5% [99].

Con la idea de realizar un análisis detallado del comportamiento del residuo en la mezcla, así como establecer unos porcentajes máximos reutilización, se diseñan cuatro fórmulas de trabajo cuyas variables son las cantidades de residuo adicionadas tanto en la fracción fina, como en la gruesa. Así, las composiciones de las fórmulas de trabajo elegidas son:

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

Fórmula de Trabajo	Fracción del Árido	Material	Porcentaje
F 10-1	6/12	Silestone®	50%
		Ofita	50%
	0/3	Silestone®	50%
		Caliza	50%
Filler	Cemento	100%	
F 10-2	6/12	Silestone®	50%
		Ofita	50%
	0/3	Caliza	100%
	Filler	Cemento	100%
F 10-3	6/12	Silestone®	100%
	0/3	Caliza	100%
	Filler	Cemento	100%
F 10-4	6/12	Silestone®	100%
	0/3	Silestone®	100%
	Filler	Cemento	100%

Tabla 8. Composición de las fórmulas de trabajo de las mezclas con Silestone® estudiadas.

Con objeto de poder comparar los resultados obtenidos con una mezcla de referencia, además de estas cuatro fórmulas, se estudia una quinta cuya composición contiene únicamente materiales convencionales en todas las fracciones.

Fórmula de Trabajo	Fracción del Árido	Material	Porcentaje
F 10-Convencional	6/12	Ofita	100%
	0/3	Caliza	100%
	Filler	Cemento	100%

Tabla 9. Composición de la fórmula de trabajo de la mezcla convencional de referencia.

4.3.2. Diseño de las fórmulas de trabajo

La primera tarea a realizar para la obtención de las fórmulas de trabajo es la dosificación granulométrica del esqueleto mineral de las mezclas (considerando también a los residuos como parte de éste). A partir de las granulometrías de los áridos naturales y del residuo, y teniendo en cuenta las densidades específicas de cada material, se realiza la composición granulométrica combinada de los áridos de cada

fórmula de trabajo, encajándola dentro de los husos establecidos por la normativa para las mezclas F10.

Una vez realizado el encaje granulométrico para las cinco fórmulas estudiadas, se procede a la determinación del contenido óptimo de betún a añadir en cada una de ellas. El ensayo prescrito por la normativa para ello es el ensayo Marshall (NLT 159). Éste consiste en la fabricación de tres series de tres probetas cilíndricas (de 101,6 mm de diámetro por 63,5 mm de alto), para cada una de las fórmulas de trabajo a estudiar. Cada serie se fabrica con la misma granulometría (la correspondiente a cada fórmula) variando únicamente el porcentaje de betún añadido sobre el peso del árido en cada una. Para cada porcentaje de betún se calcula la media de los siguientes parámetros: huecos en mezcla en tanto por ciento, densidad aparente en g/cm^3 , y estabilidad en kN. En función de los resultados obtenidos para estos valores y de las especificaciones exigidas en el PG-3, se determina el contenido óptimo de betún.

El betún a utilizar en el desarrollo de toda la investigación es un BM3b (Betún modificado Categoría 3b) que cumple con todas las prescripciones marcadas por el PG-3, con una penetración (NLT-124) de 55, un valor del punto de reblandecimiento de anillo y bola (NLT-125) igual a 89,60 °C, y con una recuperación elástica a 25 °C (NLT-329) de 84. La elección de este betún se hace en base a que su utilización posibilita el empleo de las mezclas en multitud de circunstancias de tráfico y climas.

4.3.3. Fabricación y análisis del comportamiento de las mezclas en laboratorio

La caracterización de las mezclas fabricadas con cada fórmula de trabajo se realiza mediante la ejecución de los ensayos marcados por la normativa. Según el artículo 543 del PG-3 relativo a mezclas bituminosas discontinuas para capa de rodadura, los ensayos que permiten caracterizar el comportamiento de las mezclas tipo F10 son el

ensayo de Inmersión-compresión (NLT 162), y el ensayo de resistencia a deformaciones plásticas mediante el ensayo en pista (NLT 173).

Según se especifica en la norma, el ensayo de Inmersión-Compresión consiste en la fabricación de 10 probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro y 101,6 mm de alto, dichas probetas son separadas en dos grupos de cinco, de los cuales, un grupo es sumergido en un baño con agua a 60°C durante 24 horas, y el otro grupo se deja a temperatura ambiente. Una vez transcurridas las 24 horas, ambos grupos de probetas son sometidos a una carga de compresión simple hasta su rotura, obteniendo de esta forma un valor medio de resistencia en cada uno de los grupos. El resultado de este ensayo que mide la sensibilidad de las probetas a la acción del agua es el índice de resistencia conservada. Dicho índice (expresado en %) se calcula dividiendo la resistencia obtenida por el grupo que estuvo inmerso a 60°C entre la resistencia obtenida por el seco. Según el PG-3 los valores de índice de resistencia conservada en mezclas tipo F10 deben ser superiores al 75%.

Por su parte, para la ejecución del ensayo de resistencia a deformaciones plásticas en pista son necesarias tres probetas prismáticas de dimensiones 300x300x50 mm. El ensayo consiste en someter a las probetas al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida. Según se especifica en el PG-3, la media de la velocidad de deformación en el intervalo de tiempo comprendido entre los 105 y los 120 minutos desde el comienzo del ensayo, determinará la validez o no de la mezcla.



Foto 29. Máquina Wheel Tracking utilizada en el ensayo de pista.

En función de los resultados obtenidos tras la ejecución de estos dos ensayos se decidirá qué fórmulas de trabajo son adecuadas para su empleo en capas de rodadura, en la construcción de firmes de carreteras, y bajo qué condiciones.

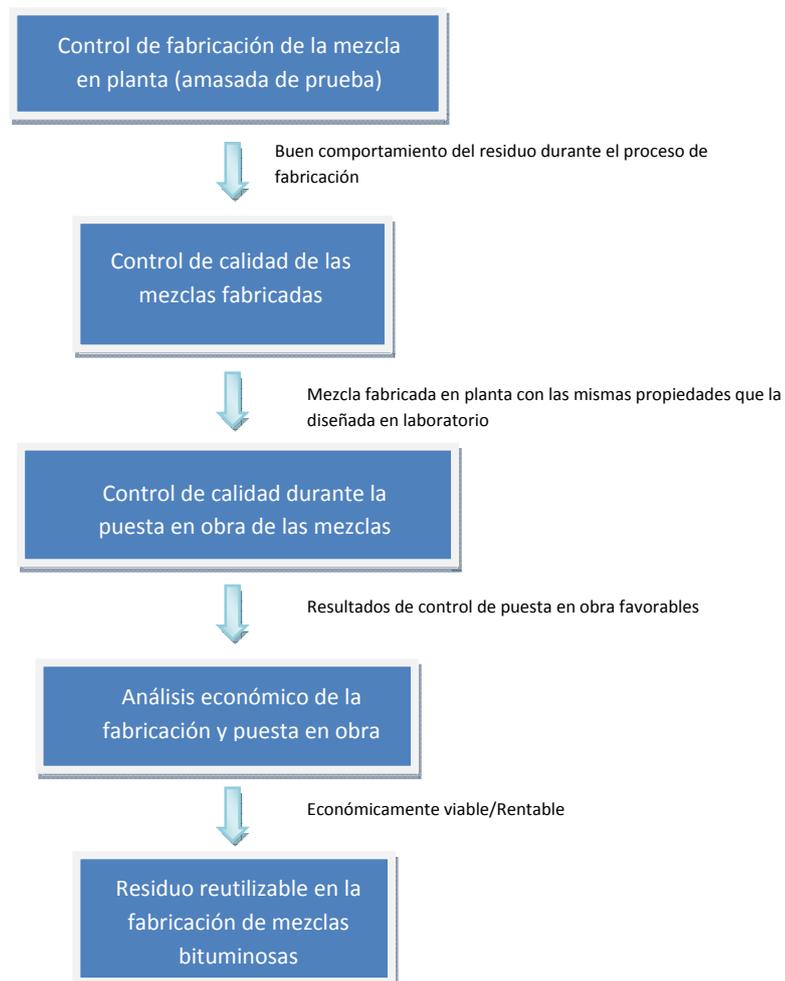
4.4. Análisis de la viabilidad de fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas con residuos de Silestone®

Una vez terminado el diseño de las mezclas en laboratorio, el último paso a dar en la validación de la reutilización de residuos de Silestone® en la construcción de carreteras es su puesta en obra en un tramo de prueba.

Esta parte del estudio comprende una primera etapa de control sobre la fabricación de las mezclas en planta, en la cual pueda analizarse el comportamiento del residuo durante el proceso de fabricación de la mezcla, así como la calidad de ésta. Posteriormente, durante el extendido y compactación de las mezclas, debe llevarse a cabo otro proceso de control para verificar la calidad de las mezclas puestas en obra. Además, es necesario establecer un conjunto de ensayos de control a largo plazo que

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

determinen el comportamiento de las mezclas con el paso del tiempo. Finalmente, para terminar de valorar si es o no viable la reutilización de estos residuos en la fabricación de mezclas bituminosas, es necesario realizar un análisis económico comparativo entre las mezclas fabricadas con residuos de Silestone® y las convencionales, que determine la rentabilidad de su aplicación.



4.4.1. Descripción del tramo de prueba

Coincidiendo con la construcción de la autovía del Almanzora A-334, ubicada en la misma comarca que el centro de fabricación de Silestone®, y concretamente del tramo entre los municipios de Fines y Albox (ejecutado por la empresa Scayr Vallehermoso), se decide llevar a cabo en la zona la puesta en obra de las mezclas diseñadas en el laboratorio. Las ventajas obtenidas con este hecho fueron, por una parte, la cercanía de los residuos (permitiendo de esta forma un ahorro en los costes de transporte), y por otro, la posibilidad de reutilizar la maquinaria empleada para la construcción de la autovía (planta de fabricación de la mezcla, extendedoras, compactadores,...), lo cual supuso un verdadero ahorro en el coste global de la construcción del tramo.

Con el objetivo de analizar el comportamiento de las mezclas diseñadas, el tramo de prueba se divide en 5 subtramos, uno para cada una de las mezclas diseñadas. Dichos subtramos se realizarán sobre una longitud total de 540 m en la carretera A-1100 (vía de doble sentido, con un ancho de carril de 4 m, y categoría de tráfico pesado¹ T3), que une la autovía A-334 con el municipio de Cantoria (Foto 30). Para aprovechar al máximo la longitud del tramo, se decide extender la totalidad de las mezclas entre ambos carriles, quedando su disposición y longitud tal y como se muestra en la foto. El espesor de la capa extendida será de 3 cm.

¹Categorías de Tráfico Pesado: T00 ($IMD_p \geq 4000$), T0 ($2000 \leq IMD_p < 4000$), T1 ($800 \leq IMD_p < 2000$) y T2 ($200 \leq IMD_p < 800$).
IMD_p: Intensidad media diaria de vehículos pesados (Vehículos pesados/día).

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas



Foto 30. Vista general del tramo de prueba.

4.4.2. Fabricación de las Mezclas

Para la fabricación de las mezclas se utilizará la misma planta empleada en la construcción del tramo de autovía, ubicada muy próxima al tramo de ensayo, permitiendo establecer un mejor control sobre las temperaturas de compactación y extendido. La planta utilizada fue una central discontinua (Intrame modelo UM 260), donde los áridos son almacenados en tolvas, separados por fracciones (6/12 y 0/3) y materiales (Silestone®, Ofita y Caliza). Desde dichas tolvas, y mediante un sistema de cintas transportadoras, se trasladan los áridos, en sus correspondientes dosificaciones dependiendo de la mezcla, hasta el tambor secador de la planta. La forma de dosificar los áridos se regula en función de la velocidad de la cinta transportadora que llega hasta la boca de cada tolva. Una vez en el tambor secador, en su primer tramo, el árido sufre la extracción del polvo que lleva adherido, pasando éste al filtro de mangas de la

planta. Una vez eliminado el polvo del árido, éste pasa a la segunda parte del tambor donde se lleva a cabo su calentamiento para la fabricación de la mezcla. Dicho aumento de temperatura, en torno a los 200 °C, es provocado por una llama situada en el principio del tambor. Una vez calentados y sin restos de polvo mineral, los áridos pasan del tambor secador a las tolvas de almacenamiento en caliente, donde se mantienen a temperatura de fabricación de la mezcla, dispuestos a ser añadidos en su correcta dosificación. Éstos son vertidos a la cámara de amasado junto con las cantidades de betún y filler correspondientes, donde se conformará finalmente la mezcla.

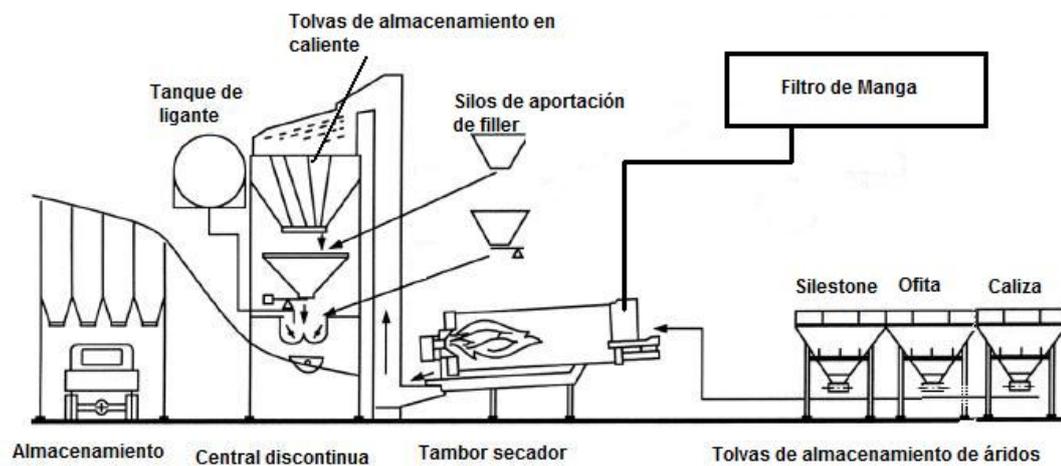


Gráfico 1. Funcionamiento de la planta discontinua utilizada para la fabricación de las mezclas en obra.

Los acopios tanto de los áridos naturales utilizados, como de los residuos Silestone® machacados, se situarán en una explanada contigua a la ubicación de la planta, cercana también a la fábrica de producción del material estudiado.



Foto 31. Vista General de la planta y los acopios de áridos.

Antes de realizar la fabricación definitiva de las mezclas para el extendido de los tramos, se llevará a cabo la ejecución por un lado, de una amasada en blanco (amasada sin utilizar betún, solo el paso de los áridos por la planta) que permita analizar el comportamiento del residuo durante el proceso de fabricación de la mezcla, y por otro, de una amasada de prueba mediante la cual pueda analizarse la calidad de la mezcla fabricada y las condiciones de trabajo de la planta (temperatura de los materiales, temperatura de la mezcla o tiempo de amasado).

Los ensayos de control a realizar a las mezclas en esta fase de la investigación, determinarán por un lado, el estado de los residuos tras la fabricación de éstas (para asegurar que no se fracturan ni pierden propiedades de resistencia), y por otro, sus propiedades generales (que permitan validar el proceso de elaboración de las mezclas en planta). El plan de ensayos definido para esta fase de control de producción es:

Ensayos de Control de Fabricación de las Mezclas	
Amasada en Blanco	<u>Análisis Granulométrico</u> según UNE-EN 933-1
	<u>Resistencia a la fragmentación del árido</u> (Coeficiente Los Ángeles) según UNE-EN 1097-2
Amasada de Prueba	<u>Ensayo Marshall</u> según NLT 159
	<u>Análisis granulométrico</u> según NLT 165
	<u>Contenido de ligante</u> según NLT 164

Tabla 10. Plan de ensayos para el control de fabricación de las mezclas.

4.4.3. Extendido y Compactación del tramo de prueba

Previamente al extendido de las mezclas, se realizará un ensayo de control de regularidad superficial (Índice de Regularidad Internacional, IRI) sobre la capa existente de la carretera en la que van a ser colocadas (compuesta por 12 cm de espesor de mezcla tipo S 25, que permanecerá como capa intermedia tras el extendido de las F10). La finalidad de este ensayo es conocer las características de regularidad del tramo para poder identificar las causas de posibles problemas tras la puesta en obra de las mezclas con los residuos de Silestone® si llegaran a producirse.

La maquinaria a utilizar en la ejecución de los tramos de prueba será la misma que la empleada en la construcción del tramo de autovía. Ésta se compone de: una barredora BRO-90 Equitecma, una báscula Montaña 60 Tm, una extendedora Titan 525 – ABG, una extendedora Demag DF – 135, una cortadora de aglomerado, una minicargadora con pala, Dumper 3000 kg, un compactador de neumáticos Dynapac CP-271, Un compactador de neumáticos Dynapac CP-30, dos compactadores tandem CC-422, ocho bañeras, una bañera - góndola, un compresor, dos palas cargadoras.

Para el control de calidad del tramo de prueba se propone la toma de muestras in situ de cada una de las mezclas a la salida de la extendedora. Con dichas muestras se realizarán ensayos de control con el objetivo de verificar que las mezclas extendidas han sido fabricadas satisfactoriamente. Así, tal y como se hizo en la etapa de laboratorio, se repetirán los ensayos de inmersión-compresión y deformación plástica en pista, y se compararán los resultados. Además, para comprobar la correcta puesta

en obra de las mezclas, justo después de ésta se tomarán valores de macrotextura mediante el ensayo del círculo de arena.

Por otra parte, para controlar el comportamiento de las mezclas a largo plazo, se propone la realización de un conjunto de ensayos que permitan controlar su evolución. En dicho plan de ensayos se contempla la realización de un ensayo IRI cada seis meses durante un periodo de tres años.

4.4.4. Análisis económico

Una vez terminado todo el proceso de fabricación y puesta en obra de las mezclas, el último paso para poder valorar la viabilidad de la reutilización de los residuos de Silestone® como sustitutivo de áridos naturales es la realización de un balance económico global.

En este estudio, se analizan todos los aspectos concernientes a la aplicación del residuo en las mezclas, desde su tratamiento, hasta la puesta en servicio de éstas (costes de maquinaria, consumo energético, costes de transporte,...). Además, deberá llevarse a cabo un análisis comparativo de los resultados obtenidos para cada una de las mezclas estudiadas.

En base a los resultados obtenidos con esta valoración económica, podrá decidirse la viabilidad de reutilización de este residuo en la fabricación de mezclas asfálticas.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Introducción

Durante el desarrollo de este capítulo se exponen y analizan el conjunto de resultados obtenidos en cada una de las fases de la investigación. A partir de ellos se valorará si es posible llevar a cabo la reutilización de los residuos de Silestone® en la construcción de carreteras.

Siguiendo el mismo orden establecido en la metodología, en primer lugar se presentan los resultados pertenecientes al proceso de caracterización de los residuos y áridos naturales. En base al análisis de los resultados obtenidos en esta parte, se determinará si los residuos cumplen con las exigencias recogidas en el PG-3 y si son aptos para poder ser reutilizados como áridos en la fabricación de mezclas bituminosas.

En segundo lugar, se muestran los resultados concernientes al diseño de las mezclas fabricadas con residuos de Silestone®. Los valores obtenidos en los ensayos de caracterización de las mezclas establecerán si las mezclas diseñadas son o no aptas para su utilización en capas de firme, y bajo qué condiciones podrán utilizarse.

Por último, se llevará a cabo el análisis sobre el conjunto de ensayos realizados durante la fabricación y puesta en obra de las mezclas. Los resultados obtenidos en éstos, junto con el obtenido tras el análisis económico del final del estudio, terminarán por validar si los residuos procedentes de Silestone® pueden ser reutilizados en las fabricación de mezclas bituminosas.

5.2. Caracterización de los residuos de Silestone® para su reutilización en la fabricación de mezclas bituminosas

Los resultados obtenidos durante la caracterización del residuo muestran la aptitud para su utilización en mezclas bituminosas para capas de rodadura, incluso para las solicitaciones de tráfico más exigentes. Por otra parte, si bien es verdad que hay que tener cierta precaución de no someter los residuos de Silestone® a temperaturas elevadas, se comprobó que las utilizadas durante todo el proceso de puesta en servicio de las mezclas no afectaba de ninguna manera en sus propiedades. En base a estos resultados, puede afirmarse que los residuo de Silestone® no presentan problemas en las etapas de fabricación y puesta en obra, y que poseen las características necesarias para ser empleados en la fabricación de mezclas bituminosas.

5.2.1. Plan de Ensayos General

Los primeros ensayos realizados durante el proceso de caracterización de los residuos fueron los establecidos en el PG-3 para cualquier tipo de árido de carreteras. Haciendo distinción entre la fracción gruesa del residuo (6/12 mm) y la fina (0/3 mm), a continuación se analizan los resultados obtenidos tras la ejecución de éstos. Hemos de decir que los resultados obtenidos para estos ensayos se analizaron en base al tipo de mezcla seleccionado (se tomaron los límites establecidos en el artículo 543 del PG-3 para mezclas bituminosas discontinuas para capas de rodadura), así por ejemplo, la fracción 3/6 mm obtenida tras el machaqueo, se desecho del proceso de caracterización.

Fracción Gruesa Residuos Silestone®

- Ensayo de Lixiviación: los valores obtenidos en relación al contenido de agentes contaminantes están todos por debajo de los valores límites admisibles para la utilización de este tipo de materiales. El método utilizado fue el prescrito por la

norma NLT 326, consistente en colocar el residuo en un recipiente de malla, situado en el interior de un tanque, al que se somete a lixiviación con agua, de acuerdo con la técnica y aparatos que la norma refiere. La relación líquido/sólido es de 10:1 y la duración del proceso de lixiviado es de 24 horas en las que el agua se mantiene en agitación.

Resultados del Ensayo de Lixiviación (NLT 326)		
Parámetro	Unidades	Resultados
Hierro	mg/L Fe	<0,2
Cobre	mg/L Cu	<0,1
Plomo	mg/L Pb	<0,5
Cinc	mg/L Zn	<0,01
Níquel	mg/L Ni	<0,2
Cromo	mg/L Cr	<0,1
Cadmio	mg/L Cd	<0,05
Manganeso	mg/L Mn	<0,1

Tabla 11. Resultados de Lixiviación del residuos Silestone®

- Análisis Granulométrico: los resultados obtenidos en el análisis granulométrico para la fracción 6/12 del residuo Silestone® son los siguientes (notar, que no existe ninguna prescripción normativa en torno a este tema):

Tamaño de los Tamices (UNE-EN 933-2)	Fracción 6/12 Silestone®
12,5	100
10	85
4	6
2	0
0,5	0
0,063	0

Tabla 12. Análisis granulométrico de la fracción 6/12 de los residuos Silestone®

- Proporción de partículas trituradas: los resultados obtenidos en este ensayo muestran un valor del 94% en caras de fractura, estando limitado en la norma a un mínimo del 75%.
- Forma del árido grueso: el coeficiente de lajas viene limitado en el PG-3 por un valor máximo de 20 para las solicitudes de tráfico más altas, el resultado obtenido tras el machaqueo por los residuos de Silestone® fue de 18, de forma que también cumplen la normativa en este aspecto.

- Resistencia a la fragmentación del árido grueso: este ensayo es uno de los más interesantes dentro de las propiedades de un árido para carreteras, y podríamos considerarlo como clave, ya que si el residuo no posee la resistencia suficiente, es prácticamente imposible tratarlo para hacer que la adquiera. El resultado obtenido para este ensayo fue de 11,15, y por tanto cumple con el PG-3, que limita su valor a un máximo de 15 en mezclas asfálticas para capas de rodadura con las cargas de tráfico más desfavorables.
- Resistencia al pulimento del árido grueso: el ensayo de pulimento (CPA) dio también resultados satisfactorios, obteniéndose un coeficiente de 0,51, siendo el 0,50 el mínimo que exige la normativa. Denotar que a pesar de encontrarse cercano al límite, el valor obtenido es muy parecido al obtenido por los mejores áridos naturales utilizado en carreteras, por ejemplo las ofitas, tienen su CPA en torno a dicho valor.
- Limpieza del árido grueso: al tratarse de un producto de origen industrial, el contenido de impurezas de éste es prácticamente nulo. El valor obtenido fue de 0,035% frente al 0,5% que es máximo que permite la norma.
- Densidad relativa y absorción: estos valores no se encuentran limitados en el PG-3. Los ensayos de densidad y absorción se realizan porque los valores obtenidos influirán posteriormente en las tareas de encaje granulométrico y contenido óptimo de betún (dependiendo de las densidades de los áridos se realizará el encaje por volumen o por peso, y dependiendo de la absorción, será necesaria mayor o menor cantidad de betún a añadir a la mezcla). Así, los resultados de este ensayo arrojan los siguientes valores:

Densidad relativa y absorción (NLT-153)	
Densidad Relativa Aparente	2,38 g/cm ³
Densidad Relativa Aparente en superficie saturada seca	2,36 g/cm ³
Densidad Relativa Real	2,35 g/cm ³
Coefficiente de Absorción	1,95%

Tabla 13. Resultados de densidad y absorción de la fracción 6/12 de los residuos Silestone®

- Análisis de la adhesividad de las partículas con el betún: al igual que en caso anterior este ensayo tampoco viene limitado por la normativa. Su resultado es interesante puesto que da indicios de la envuelta del residuo por el betún. El resultado obtenido también fue satisfactorio, obteniéndose un valor superior al 95%.

Fracción Fina Residuos Silestone®

- Equivalente de arena: al tratarse de un material de origen industrial, se trata de un residuo bastante homogéneo y carente de impurezas, por tanto, el valor obtenido en el ensayo de equivalente de arena fue bastante alto, 93, muy por encima de 50 que es el exigido como mínimo por el PG-3.
- Análisis Granulométrico: como en el caso anterior referente a la fracción gruesa, la normativa no especifica ningún huso para la granulometría de los áridos por separado. Los resultados obtenidos en el análisis granulométrico para la fracción 0/3 del residuo Silestone® son:

Tamaño de los Tamices (UNE-EN 933-2)	Fracción 0/3 Silestone®
12,5	100
10	100
4	100
2	83
0,5	33
0,063	3

Tabla 14. Análisis granulométrico de la fracción 0/3 de los residuos Silestone®

- Resistencia a la fragmentación del árido fino: como ya hemos comentado en el caso de la fracción gruesa, este valor es clave en las propiedades del árido. Para la fracción fina también se obtienen valores del coeficiente de desgaste de los ángeles (9,23) por debajo del máximo establecido por la normativa (15).
- Densidad relativa y absorción: los valores obtenidos para la fracción fina del residuo en este ensayo con resultan similares a los obtenidos en la gruesa:

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

Densidad relativa y absorción (NLT-153)	
Densidad Relativa Aparente	2,33 g/cm ³
Densidad Relativa Aparente en superficie saturada seca	2,31 g/cm ³
Densidad Relativa Real	2,30 g/cm ³
Coefficiente de Absorción	0,56%

Tabla 15. Resultados de densidad y absorción de la fracción 0/3 de los residuos Silestone®

- Análisis de la adhesividad de las partículas con el betún: utilizando la norma correspondiente para áridos finos, el valor obtenido para la adhesividad de las partículas fue el máximo prescrito por este ensayo, 10.

Como podemos comprobar, los resultados obtenidos tras la ejecución de los ensayos prescritos por el PG-3 para áridos de carreteras, ponen de manifiesto la aptitud de los residuos de Silestone® para poder ser reutilizados en la fabricación de mezclas bituminosas en capas de rodadura. Se presenta a continuación una tabla resumen del conjunto de resultados obtenidos en estos ensayos:

Fracción Gruesa Áridos Silestone®		
Ensayo	Resultado	Límite Normativa
Ensayo de Lixiviación según NLT-326	*	-
Análisis Granulométrico según UNE-EN 933-1	*	-
Proporción de Partículas trituradas_(angulosidad del árido grueso) según UNE-EN 933-5	94%	>75%
Forma del árido grueso (Índice de Lajas) según UNE-EN 933-3	18	<20
Resistencia a la fragmentación del árido grueso (Coeficiente Los Ángeles) según UNE-EN 1097-2	11,15	<15
Resistencia al pulimento del árido grueso (coeficiente de pulimento acelerado, CPA) según anexo D de la UNE 146130	0,51	<0,50
Limpieza del árido grueso (contenido de impurezas) según anexo C de la UNE 146130	0,035%	<0,5%
Densidad relativa y absorción (NLT-153)	*	-
Análisis de la adhesividad de las partículas con el betún, según NLT-166	>95	-

Fracción Fina Residuos Silestone®		
Ensayo	Resultado	Límite Normativa
Equivalente de Arena según UNE-EN 933-8, y en su caso, Azul de Metileno según UNE-EN 933-9	93	>50
Análisis Granulométrico según UNE-EN 933-1	*	-
Resistencia a la fragmentación del árido fino (Coeficiente Los Ángeles) según UNE-EN 1097-2	9,23	<15
Densidad relativa y absorción (NLT-153)	*	-
Análisis de la adhesividad de las partículas con el betún, según NLT-355	10	-

Tabla 16. Resumen de Resultados de Plan General de Caracterización.

*Datos recogidos en las tablas anteriores.

5.2.2. Plan de Ensayos Específico

Una vez verificada la aptitud del residuo ante las exigencias impuestas por la normativa, y dadas las recomendaciones recogidas en la hoja de seguridad del material, el siguiente paso es determinar el comportamiento de éste ante condiciones adversas que pudieran darse durante el proceso de fabricación de una mezcla bituminosa. Para ello se realizaron los ensayos específicos de temperatura, cuyos resultados ponen de manifiesto la capacidad del árido para soportar temperaturas superiores a las utilizadas durante la fabricación de las mezclas.

El resultado obtenido tras la ejecución del ensayo de desgaste de los ángeles una vez sometido el residuo a una exposición de una hora en una estufa a una temperatura de 200°C fue un valor de 9, por debajo del valor máximo establecido por el PG-3, que se encuentra en 15. Se demuestra por tanto que la estructura interna del árido no se ve afectada por la temperatura de fabricación de las mezclas en caliente.

Por su parte, en el ensayo de pérdida de peso por temperatura se pone de manifiesto que, efectivamente, hasta los 200°C, las pérdidas de peso en los residuos de Silestone®

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

no son significativas, llegando a un 0,31% de pérdida de peso para dicha temperatura, pero que a partir de los 300°C, las pérdidas se disparan de manera exponencial, viéndose por tanto muy afectada la estructura interna del material, quedando su resistencia reducida a valores mínimos (Gráfico 2).

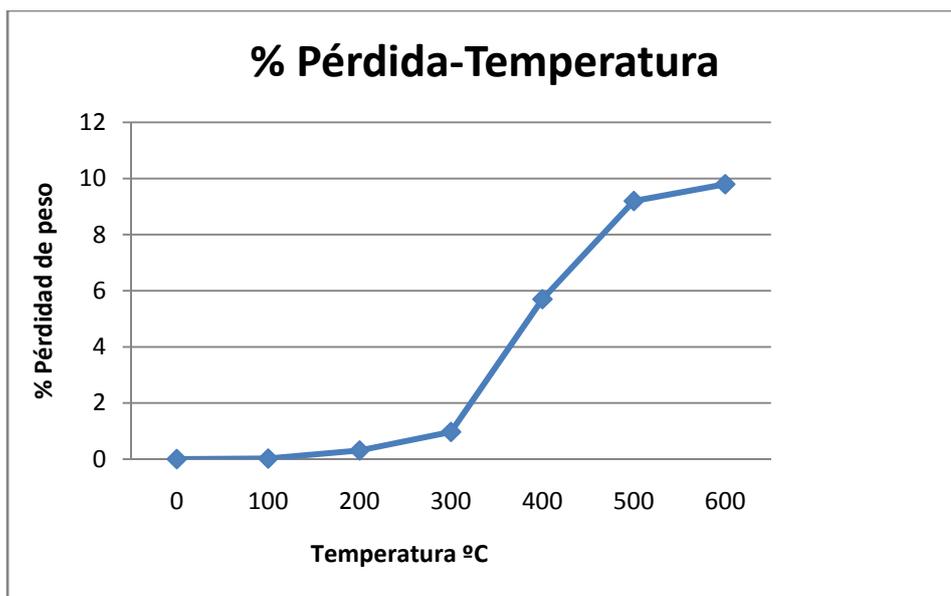


Gráfico 2. Ensayo de pérdida de peso por temperatura.

En vista a los resultados obtenidos podemos decir que si bien, es claro que el residuo Silestone® se ve afectado por su exposición a altas temperaturas, durante el proceso de fabricación y puesta en obra de una mezcla bituminosa no se alcanzan temperaturas tan altas como para que las propiedades del material se vean afectadas. Este hecho unido a que el material cumple con todas las exigencias establecidas en el PG-3 para áridos de carreteras, manifiestan la capacidad del residuo para ser valorizado como árido en la fabricación de mezclas bituminosas.

5.2.3. Plan de Ensayos Áridos Naturales

De la misma forma que en el caso del residuo, los áridos naturales utilizados durante el desarrollo de esta investigación también se caracterizaron para verificar que cumplieran con las especificaciones exigidas a los áridos para fabricación de mezclas bituminosas.

El plan de ensayos se realizó distinguiendo entre la fracción gruesa, en la que se utilizó árido ofítico, y la fracción fina, donde se empleó una arena caliza, tal y como marca la norma. Además, también se realizaron los ensayos de caracterización del filler utilizado durante el estudio (que fue en su totalidad de aportación, dada la tipología de mezcla seleccionada). El conjunto de resultados obtenidos en los diferentes ensayos cumplieron con las exigencias establecidas por la normativa.

Fracción Gruesa Árido Ofítico

- Análisis Granulométrico: los resultados obtenidos en el análisis granulométrico de las ofitas utilizadas en el estudio son los siguientes:

Tamaño de los Tamices (UNE-EN 933-2)	Fracción 6/12
12,5	97
10	73
4	0
2	0
0,5	0
0,063	0

Tabla 17. Análisis Granulométrico árido ofítico.

- Proporción de partículas trituradas: los resultados obtenidos en este ensayo muestran un valor del 100% en caras de fractura, ideal para su empleo en carreteras (el Pg-3 limita a un mínimo del 75%).
- Forma del árido grueso: el índice de lajas obtenido en las ofitas es del 5%, estando limitado en el PG-3 por un valor máximo de 20 para las solicitaciones de tráfico más altas.

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

- Resistencia a la fragmentación del árido grueso: El resultado obtenido para este ensayo es de 10,6, y por tanto también satisfactorio según el PG-3, que limita su valor a un máximo de 15.
- Resistencia al pulimento del árido grueso: el coeficiente de pulimento obtenido es el mismo que en el caso de los residuos Silestone®, 0,51, estando el mínimo exigido por la normativa en 0,50.
- Limpieza del árido grueso: El valor obtenido es de 0,11% frente al 0,5% que es máximo que permite la norma.
- Densidad relativa y absorción: como puede observarse en los valores obtenidos en el ensayo, la densidad de las ofitas es sustancialmente superior a la de los residuos de Silestone®, y por tanto, deberemos de tenerlo en cuenta al efectuar el encaje granulométrico.

Densidad relativa y absorción (NLT-153)	
Densidad Relativa Aparente	3,10 g/cm ³
Densidad Relativa Aparente en superficie saturada seca	3,13 g/cm ³
Densidad Relativa Real	3,20 g/cm ³
Coefficiente de Absorción	1,04%

Tabla 18. Resultados de densidad y absorción del árido ofítico.

Fracción Fina Árido Calizo

- Equivalente de arena: del valor obtenido en este ensayo se observa como el contenido de impurezas de un árido natural es superior al de los residuos de Silestone®. El valor de equivalente de arena obtenido en las calizas fue de 63, por encima del 50 exigido como mínimo por la normativa.
- Análisis Granulométrico: Los resultados obtenidos en el análisis granulométrico para la fracción 0/3 de arena caliza fueron:

Tamaño de los Tamices (UNE-EN 933-2)	Fracción 0/3
12,5	100
10	100
4	100
2	80
0,5	32,7
0,063	13,5

Tabla 19. Análisis Granulométrico árido calizo.

- Densidad relativa y absorción: los valores obtenidos para la arena caliza también dan valores superiores de densidad que en el caso del residuo:

Densidad relativa y absorción (NLT-153)	
Densidad Relativa Aparente	2,79 g/cm ³
Densidad Relativa Aparente en superficie saturada seca	2,80 g/cm ³
Densidad Relativa Real	2,83 g/cm ³
Coefficiente de Absorción	0,4 %

Tabla 20. Resultados de densidad y absorción del árido calizo.

- Análisis de la adhesividad de las partículas con el betún: el índice de adhesividad de la arena caliza es de 7-8, inferior al de los finos Silestone®.

Filler Cemento

- Análisis Granulométrico: la granulometría obtenida en el filler utilizado fue:

Tamaño de los Tamices (UNE-EN 933-2)	Filler
12,5	100
10	100
4	100
2	100
0,5	100
0,063	97

Tabla 21. Análisis Granuométrico del filler cemento.

- Densidad aparente del polvo mineral: el valor obtenido en este ensayo es de 0,7 gr/cm³, estando limitado en el PG-3 al intervalo de 0,5-0,8 gr/cm³.

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

Como resumen de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos de los áridos naturales se expone la siguiente tabla:

Áridos Ofíticos (fracción 6/12 mm)		
Ensayo	Resultado	Límite Normativa
Análisis Granulométrico según UNE-EN 933-1	*	-
Proporción de Partículas trituradas (angulosidad del árido grueso) según UNE-EN 933-5	100%	>75%
Forma del árido grueso (Índice de Lajas) según UNE-EN 933-3	5	<20
Resistencia a la fragmentación del árido grueso (Coeficiente Los Ángeles) según UNE-EN 1097-2	10,6	<15
Resistencia al pulimento del árido grueso (coeficiente de pulimento acelerado, CPA) según anexo D de la UNE 146130	0,51	<0,50
Limpieza del árido grueso (contenido de impurezas) según anexo C de la UNE 146130	0,11%	<0,5%
Densidad relativa y absorción (NLT-153)	*	-
Áridos Calizos (fracción 0/3 mm)		
Ensayo	Resultado	Límite Normativa
Equivalente de Arena según UNE-EN 933-8, y en su caso, Azul de Metileno según UNE-EN 933-9	63	>50
Análisis Granulométrico según UNE-EN 933-1	*	-
Densidad relativa y absorción (NLT-153)	*	-
Análisis de la adhesividad de las partículas con el betún, según NLT-355	7-8	-
Filler Cemento		
Ensayo	Resultado	Límite Normativa
Análisis Granulométrico según UNE- EN 933-1	*	-
Densidad aparente del polvo mineral según NLT-176	0,7 gr/cm ³	0,5-0,8 gr/cm ³

Tabla 22. Resumen de los resultados de caracterización de los áridos naturales.

*Datos recogidos en las tablas anteriores.

Una vez caracterizados los materiales a estudiar, y tras verificar la aptitud de éstos para ser utilizados en la fabricación de mezclas bituminosas, en la siguiente etapa se diseñan éstas en laboratorio.

5.3. Diseño en laboratorio de mezclas bituminosas con la incorporación de residuos de Silestone®

En esta etapa tiene lugar el diseño en laboratorio de mezclas bituminosas con la incorporación de residuos Silestone® como sustitutivo de áridos naturales. Como ya se indicó en el capítulo anterior, la mezcla seleccionada para llevar a cabo el estudio fue una discontinua para capa de rodadura tipo F10.

Los trabajos de laboratorio comportaron el diseño de cinco fórmulas de trabajo, cuatro de ellas con el residuo incorporado, y otra, únicamente con áridos convencionales a modo de referencia. Los resultados obtenidos pusieron de manifiesto la posibilidad de fabricar mezclas bituminosas con residuos Silestone® como sustitutos de áridos naturales, incluso en su totalidad, capaces de cumplir con las exigencias establecidas por la normativa para mezclas de capa de rodadura.

5.3.1. Diseño de las fórmulas de trabajo

Como partida de los trabajos de laboratorio, se determinaron las granulometrías y porcentajes óptimos de betún a emplear en cada fórmula de trabajo, en base a las características generales recogidas por el PG-3 para este tipo de mezclas (Tabla 23). Para poder establecer un análisis más explícito de los resultados obtenidos durante el diseño de éstas, se recogerán cada una de ellas por separado. Se comenzará por el análisis de la mezcla convencional de referencia, y posteriormente se pasará a las mezclas con residuos de Silestone® incorporados. En último lugar, se realizará un análisis comparativo a modo resumen de los resultados obtenidos en cada una de las mezclas.

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

Características F10		
Huso Granulométrico	Tamaño del Tamiz (mm)	% que pasa
	12,5	100
	10	75-97
	4	23-38
	2	18-32
	0,5	11-23
	0,063	7-9
Proporción de polvo mineral de aportación (T00 a T2)		100 %
Dotación mínima de ligante*		5,5 %
Relación Filler-Betún		1,3 a 1,7
Ensayo Marshall	Nº de golpes cada cara	50
	Estabilidad (kN)	>7,5
	Huecos Mezcla (%)	>4
Resistencia conservada Inmersión-Compresión		≥75 %
Resistencia a def. plásticas mediante pista en el intervalo 105 a 120 min (T00 a T2) y zona térmica cálida		≤12 µm/min

Tabla 23. Propiedades de las mezclas tipo F10 para capas de rodadura.

*Susceptible de corrección volumétrica

- **Mezcla F10- Convencional**

La primera mezcla diseñada fue la F10 convencional de forma que los resultados obtenidos en ésta pudieran servir de referencia para las otras mezclas a estudiar. En base a las granulometrías de los áridos ofíticos para la fracción gruesa 6/12 mm, los calizos para la fina 0/3 mm, y el cemento para el filler, se realizó el ajuste granulométrico de la fórmula de trabajo de la mezcla para que cumpliera con el huso establecido por el PG-3 para las mezclas F10. El encaje se realizó en peso, y los porcentajes a añadir de cada material fueron un 70% de ofitas, un 22,9% de calizas y un 7,1 % de cemento. La curva granulométrica resultante es la siguiente:

Tamiz	Granulometría Ofita (% que pasa)	Granulometría Caliza (% que pasa)	Granulometría Cemento (% que pasa)	Huso F10 (% que pasa)	Curva Granulométrica (% que pasa)
12,5	97	100	100	100	100
10	73	100	100	75-97	81,1
4	0	100	100	23-38	30
2	0	80	100	18-32	25,4
0,5	0	32,7	100	11-23	14,5
0,063	0	13,5	97	7-9	8,9
	70%	22,9%	7,1%		

Tabla 24. Encaje Granulométrico de la mezcla F10-Convencional.

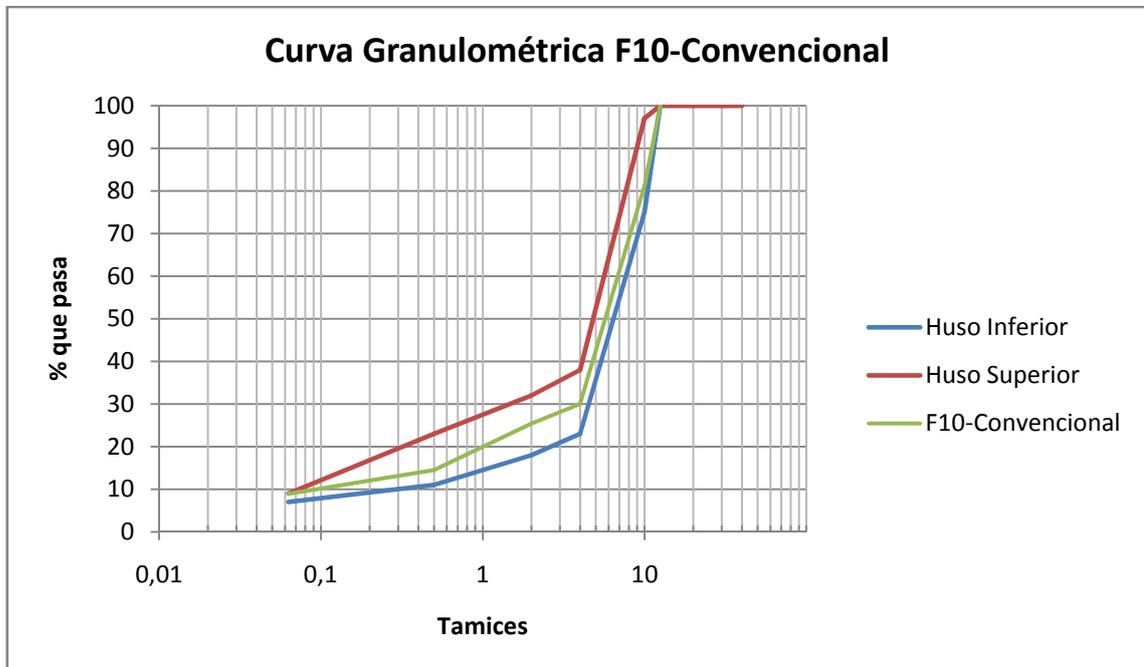


Gráfico 3. Curva Granulométrica F10-Convencional.

La densidad relativa de los áridos en aceite de parafina según la NLT 176/96 fue de 3,056 gr/cm³.

Para llevar a determinar el contenido óptimo de ligante a añadir a la mezcla, se realizó el ensayo Marshall (NLT 159) con tres series de tres probetas, variando los contenidos de cada serie entre 4,5%, 5% y 5,5% sobre el peso de los áridos. Las características principales del ensayo son:

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

- Temperatura de fabricación de la mezcla: 160° C
- Temperatura de compactación de las probetas: 158° C
- Nº de golpes por cada cara: 50

Las medias de los resultados obtenidos en el ensayo para cada uno de los porcentajes de betún fueron:

Ligante sobre áridos (%)	4,5	5	5,5
Densidad Probetas (gr/cm ³)	2,583	2,611	2,634
Huecos/Mezcla (%)	8,32	6,56	4,97
Estabilidad (kN)	12,7	16,9	17,7

Tabla 25.Resultados del ensayo Marshall F10-Convencional.

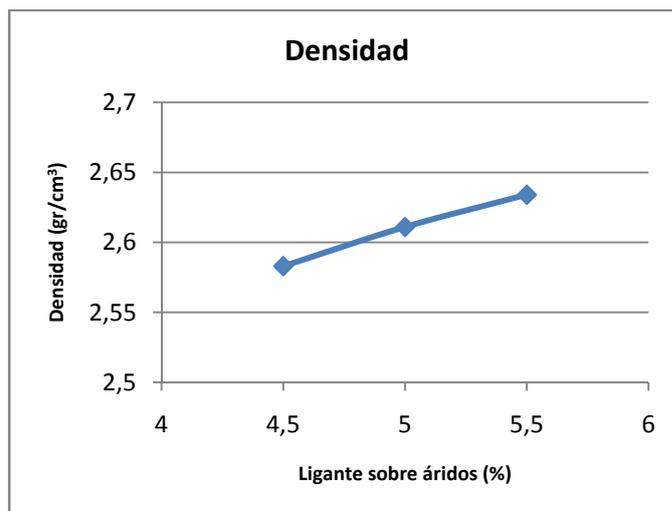


Gráfico 4. Curva de densidad Marshall F10-Convencional.

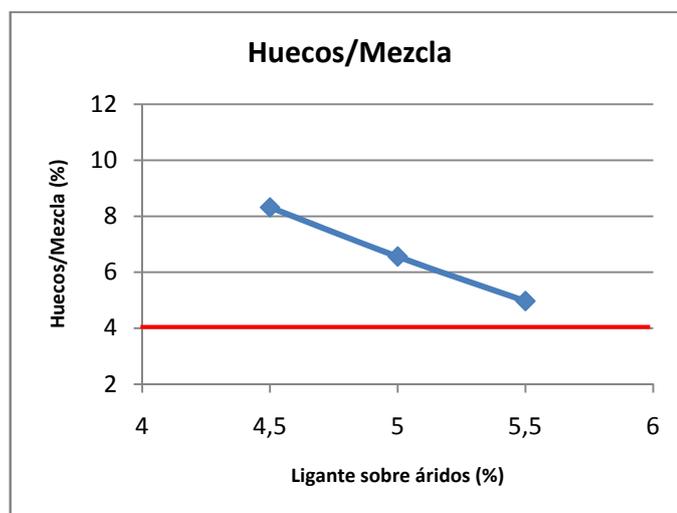


Gráfico 5. Curva de Huecos/Mezcla F10-Convencional.

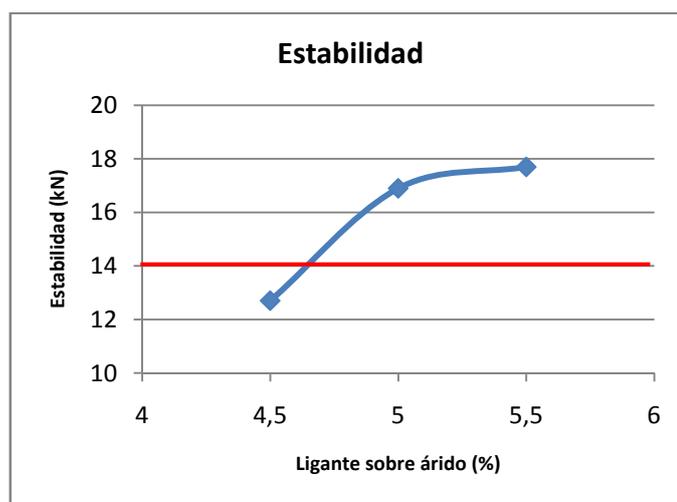


Gráfico 6. Curva de estabilidad Marshall F10-Convencional.

Como podemos observar, al aumentar el contenido de ligante añadido aumenta la densidad de la probeta y disminuyen los huecos en mezcla. Según establece el PG-3, los valores de estabilidad y de huecos en mezcla en mezcla tipo F10 han de ser superiores al 4% y a 14 kN, respectivamente. El porcentaje de ligante que mejor satisface ambas condiciones es el 5%, que es por tanto el contenido óptimo de ligante con el que se fabricará la mezcla F10 convencional.

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

- **Mezcla F10-1**

La composición de esta fórmula de trabajo es:

Fórmula de Trabajo	Fracción del Árido	Material	Porcentaje
F 10-1	6/12	Silestone®	50%
		Ofita	50%
	0/3	Silestone®	50%
		Caliza	50%
	Filler	Cemento	100%

Tabla 26. Composición F10-1.

A partir de las diferentes granulometrías de los materiales que la forman se realiza el encaje granulométrico, con la obtención de la correspondiente curva de áridos combinados. Por tratarse de materiales con densidades bastante dispares, el encaje granulométrico se hizo en volumen, siendo su resultado un 33% de ofitas, 34% de 6/12 residuo Silestone®, 14% de caliza, 14% de 0/3 residuo Silestone® y un 5% de cemento.

Tamiz	Granulom. Ofita	6/12 Silestone®	Granulom. Caliza	0/3 Silestone®	Granulom. Cemento	Huso F10	Curva Granulométrica
12,5	97	100	100	100	100	100	99
10	73	85	100	100	100	75-97	86
4	0	6	100	100	100	23-38	35
2	0	0	80	83	100	18-32	27,8
0,5	0	0	32,7	33	100	11-23	14,2
0,063	0	0	13,5	3	97	7-9	7,2
	33%	34%	14%	14%	5%		

Tabla 27. Encaje Granulométrico de la mezcla F10-1.

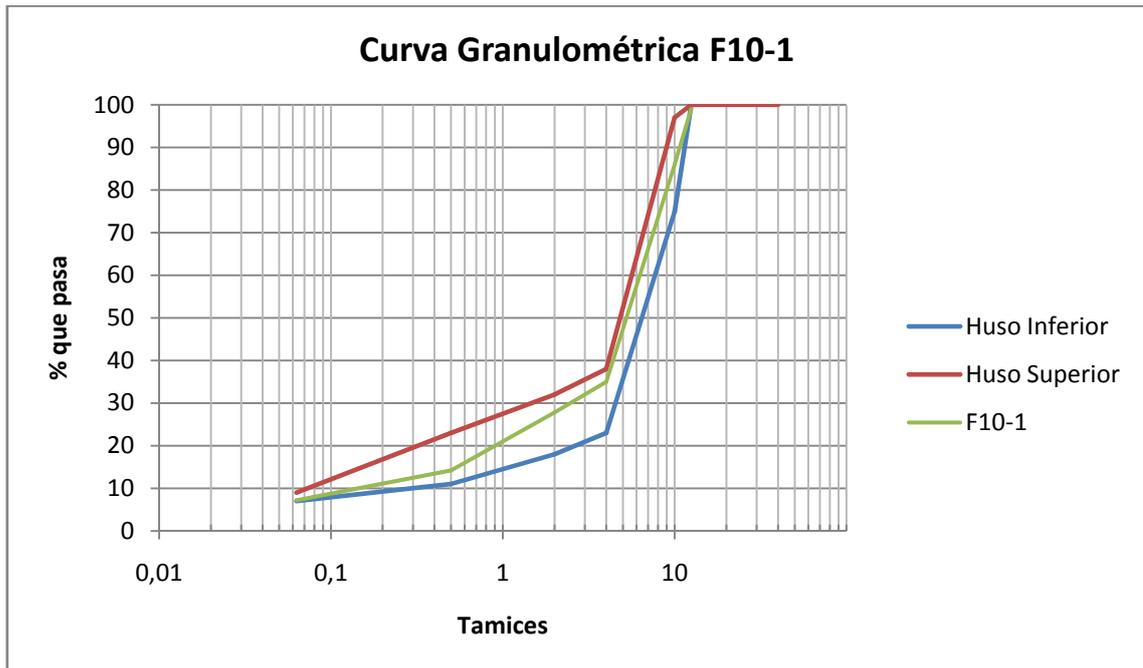


Gráfico 7. Curva Granulométrica F10-1.

La densidad relativa de los áridos en aceite de parafina según la NLT 176/96 fue de $2,775 \text{ gr/cm}^3$. Como podemos comprobar, la densidad del conjunto de áridos es inferior a la de la mezcla de referencia debido a la menor densidad del residuo adicionado a la mezcla como sustitutivo de los áridos naturales.

Al igual que en caso anterior, la determinación del contenido óptimo de ligante a añadir a la mezcla, se realiza mediante el ensayo Marshall (NLT 159) con tres series de tres probetas, variando los contenidos de cada serie entre 5%, 5,5% y 6% sobre el peso de los áridos. Una vez más, las características principales del ensayo son:

- Temperatura de fabricación de la mezcla: 160° C
- Temperatura de compactación de las probetas: 158° C
- Nº de golpes por cada cara: 50

A continuación se recogen las medias de los resultados obtenidos en el ensayo para cada uno de los porcentajes de betún fueron:

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

Ligante sobre áridos (%)	5	5,5	6
Densidad Probetas (gr/cm ³)	2,380	2,420	2,393
Huecos/Mezcla (%)	7,3	5,1	5,5
Estabilidad (kN)	18,3	17,3	18,6

Tabla 28. Resultados del ensayo Marshall F10-1.

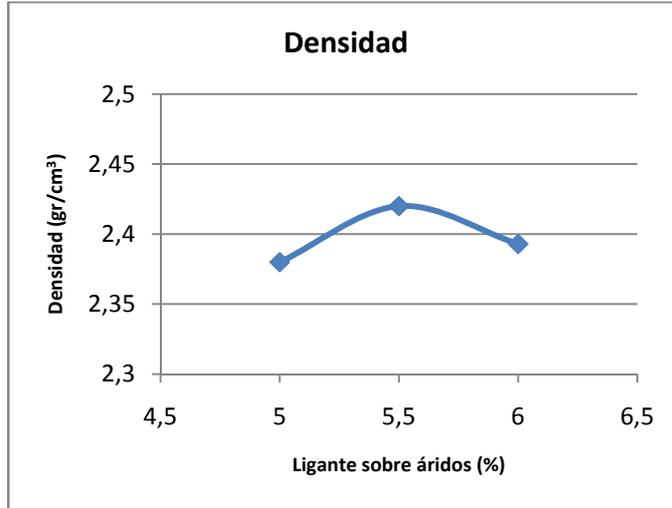


Gráfico 8. Curva de densidad Marshall F10-1.

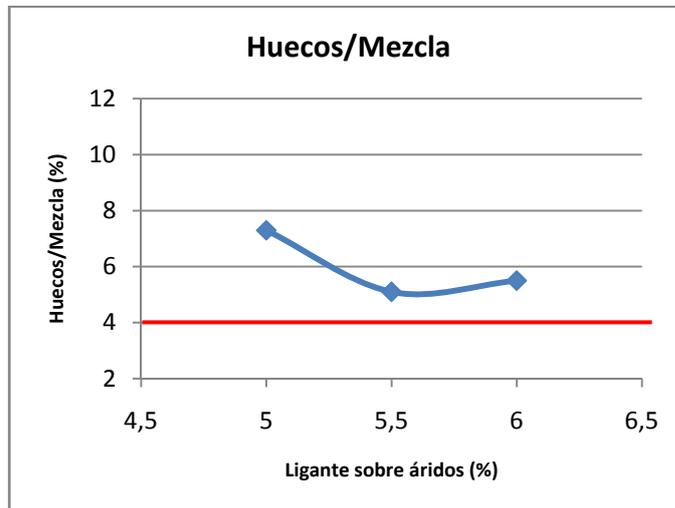


Gráfico 9. Curva de Huecos/Mezcla F10-1.

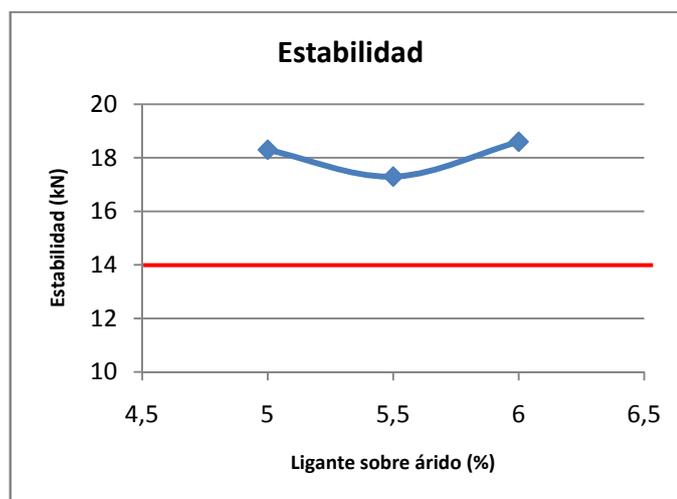


Gráfico 10. Curva de estabilidad Marshall F10-1.

Las densidades de las probetas son un tanto inferiores que las de la mezcla de referencia, ello es debido a la menor densidad del residuo ya comentada. En base a los resultados obtenidos de estabilidad y huecos en mezcla, el porcentaje óptimo de betún seleccionado fue el 5%.

- **Mezcla F10-2:**

La composición de esta fórmula de trabajo es:

Fórmula de Trabajo	Fracción del Árido	Material	Porcentaje
F 10-1	6/12	Silestone®	50%
		Ofita	50%
	0/3	Caliza	100%
	Filler	Cemento	100%

Tabla 29. Composición F10-2.

La dosificación obtenida tras la realización del encaje granulométrico realizado en peso fue de 34% de ofita, 35% 6/12 de residuo Silestone®, 27% caliza y 4% cemento. La curva granulométrica obtenida fue:

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

Tamiz	Granulom. Ofita	Granulom. 6/12 Silestone®	Granulom. Caliza	Granulom. Cemento	Huso F10	Curva Granulométrica
12,5	97	100	100	100	100	99
10	73	85	100	100	75-97	85,6
4	0	6	100	100	23-38	33,1
2	0	0	80	100	18-32	25,6
0,5	0	0	32,7	100	11-23	12,9
0,063	0	0	13,5	97	7-9	7,5
	34%	35%	27%	4%		

Tabla 30. Encaje Granulométrico de la mezcla F10-2.

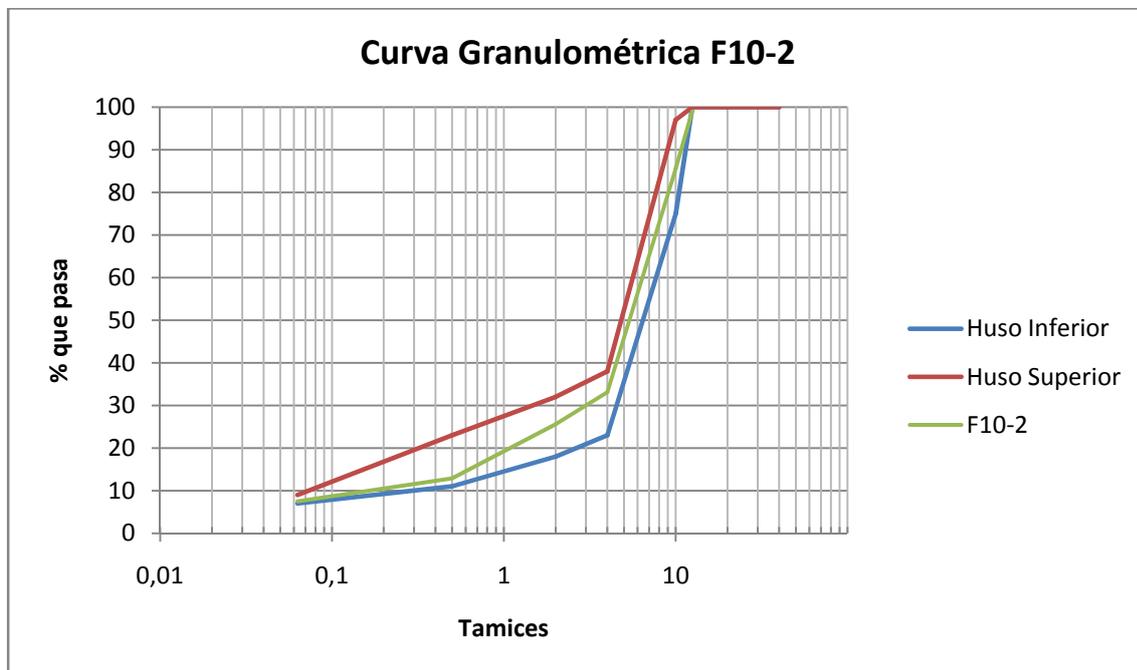


Gráfico 11. Curva Granulométrica F10-2.

La densidad relativa de los áridos en aceite de parafina según la NLT 176/96 fue de 2,748 gr/cm³. Como en el caso anterior, la densidad del conjunto de áridos es inferior a la de la mezcla de referencia.

Los porcentajes de betún utilizados en la obtención del contenido óptimo de ligante fueron 4,5%, 5% y 5,5% sobre el peso de los áridos. Las características del ensayo Marshall son las mismas que en los casos anteriores:

- Temperatura de fabricación de la mezcla: 160° C
- Temperatura de compactación de las probetas: 158° C
- Nº de golpes por cada cara: 50

Las medias de los resultados obtenidos en el ensayo para cada uno de los porcentajes de betún fueron:

Ligante sobre áridos (%)	4,5	5	5,5
Densidad Probetas (gr/cm ³)	2,359	2,414	2,419
Huecos/Mezcla (%)	8	5,2	4,3
Estabilidad (kN)	17,8	16,3	16,6

Tabla 31. Resultados del ensayo Marshall F10-2.

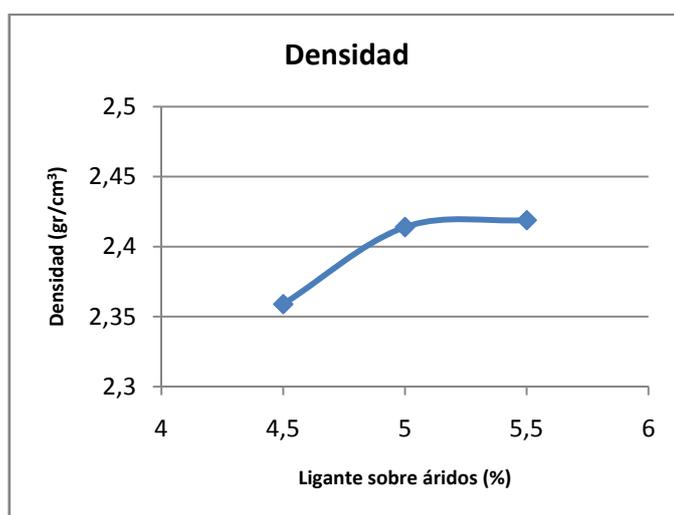


Gráfico 12. Curva de densidad Marshall F10-2.

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

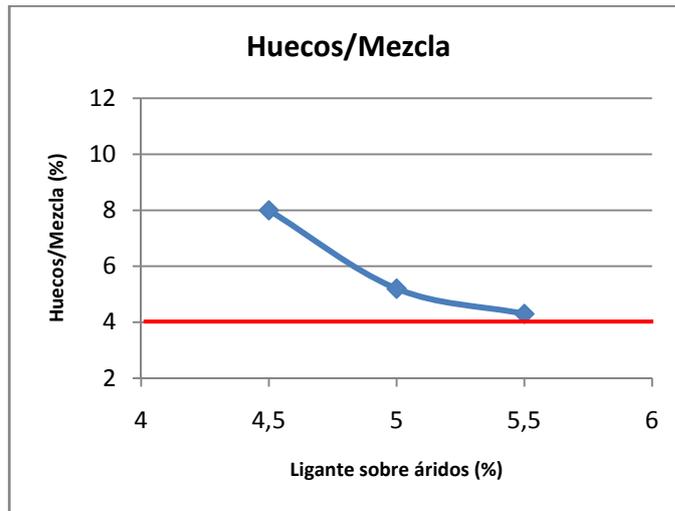


Gráfico 13. Curva de Huecos/Mezcla F10-2.

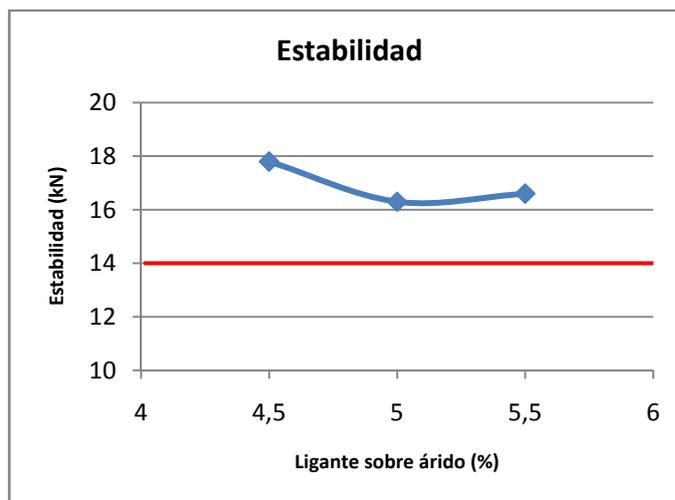


Gráfico 14. Curva de estabilidad Marshall F10-2.

En base a estos resultados, el contenido óptimo de betún seleccionado fue el 5,3%.

- **Mezcla F10-3:**

La composición de esta fórmula de trabajo es:

Fórmula de Trabajo	Fracción del Árido	Material	Porcentaje
F 10-1	6/12	Silestone®	100%
	0/3	Caliza	100%
	Filler	Cemento	100%

Tabla 32. Composición F10-3.

La dosificación obtenida a partir de las granulometrías de los diferentes materiales fue un 70% de 6/12 residuo Silestone®, 25% caliza y 5% cemento, siendo su curva granulométrica la siguiente:

Tamiz	Granulom. 6/12 Silestone®	Granulom. Caliza	Granulom. Cemento	Huso F10	Curva Granulométrica
12,5	100	100	100	100	100
10	85	100	100	75-97	89,5
4	6	100	100	23-38	33,2
2	0	80	100	18-32	25,5
0,5	0	32,7	100	11-23	13,2
0,063	0	13,5	97	7-9	8,2
	70%	25%	5%		

Tabla 33. Encaje Granulométrico de la mezcla F10-3.

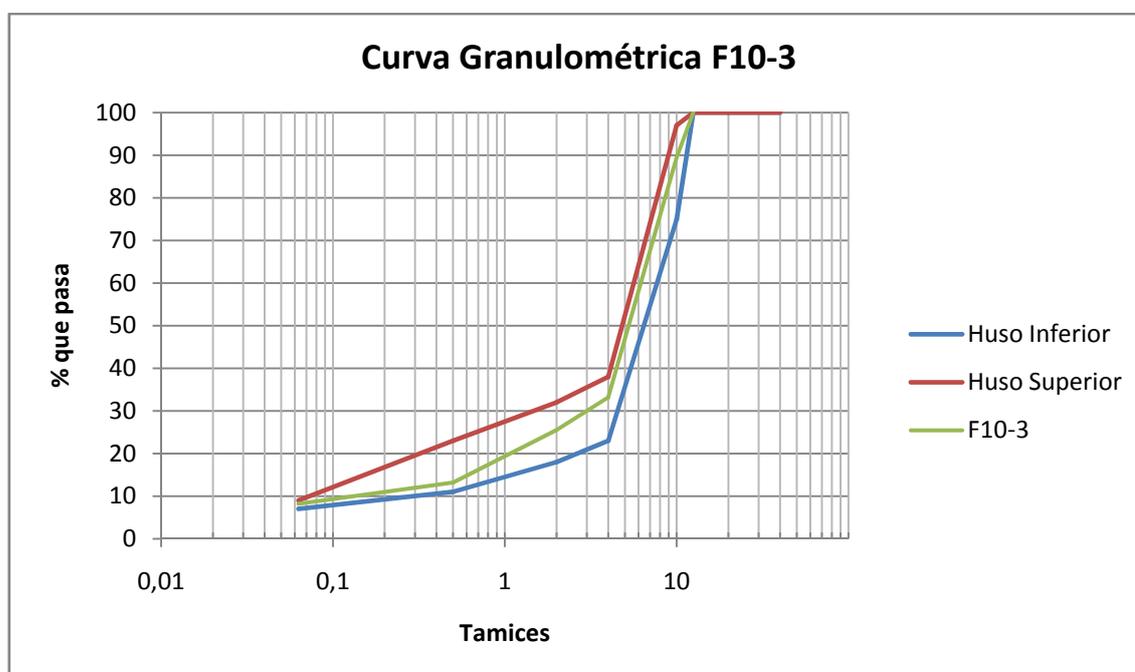


Gráfico 15. Curva Granulométrica F10-3.

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

La densidad relativa de los áridos en aceite de parafina según la NLT 176/96 fue de 2,487 gr/cm³. Como vemos, al aumentar la cantidad de residuo sustituido, la densidad de los áridos de la mezcla disminuye.

Los porcentajes de betún utilizados en la obtención del contenido óptimo de ligante fueron 5%, 5,5% y 6% sobre el peso de los áridos. De nuevo, las características del ensayo Marshall son las mismas que en los casos anteriores:

- Temperatura de fabricación de la mezcla: 160° C
- Temperatura de compactación de las probetas: 158° C
- Nº de golpes por cada cara: 50

Las medias de los resultados obtenidos en el ensayo para cada uno de los porcentajes de betún fueron:

Ligante sobre áridos (%)	5	5,5	6
Densidad Probetas (gr/cm ³)	2,089	2,131	2,112
Huecos/Mezcla (%)	10,3	8	8,3
Estabilidad (kN)	20,0	18,8	19,9

Tabla 34. Resultados del ensayo Marshall F10-3.

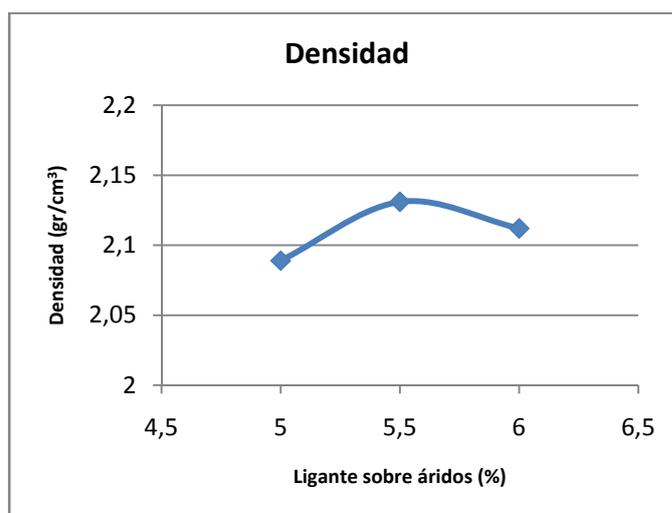


Gráfico 16. Curva de densidad Marshall F10-3.

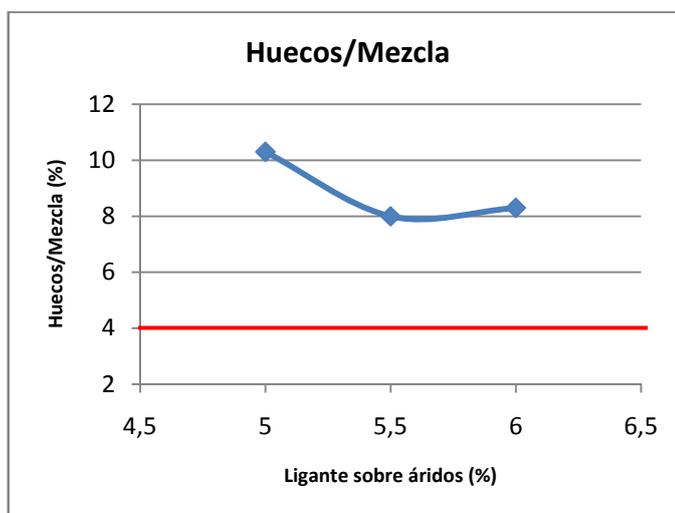


Gráfico 17. Curva de Huecos/Mezcla F10-3.

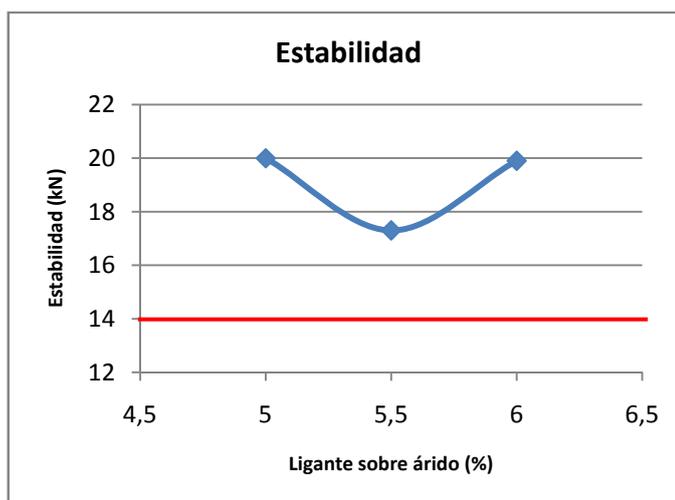


Gráfico 18. Curva de estabilidad Marshall F10-3.

En base a los resultados obtenidos en el ensayo Marshall, el contenido óptimo de betún elegido para esta fórmula de trabajo fue 5,3%.

- **Mezcla F10-4:**

La composición de la fórmula de trabajo de la mezcla F10-4 es:

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

Fórmula de Trabajo	Fracción del Árido	Material	Porcentaje
F 10-1	6/12	Silestone®	100%
	0/3	Silestone®	100%
	Filler	Cemento	100%

Tabla 35. Composición F10-4.

La dosificación obtenida tras realizar el encaje granulométrico fue 70% de 6/12 residuo Silestone®, 23% de 0/3 residuo Silestone® y 7% de cemento. La curva granulométrica obtenida fue:

Tamiz	Granulometría 6/12 Silestone®	Granulometría 0/3 Silestone®	Granulometría Cemento (% que pasa)	Huso F10 (% que pasa)	Curva Granulométrica (% que pasa)
12,5	100	100	100	100	100
10	85	100	100	75-97	89,5
4	6	100	100	23-38	34,2
2	0	83	100	18-32	26,9
0,5	0	33	100	11-23	14,6
0,063	0	3	97	7-9	7,5
	70%	23%	7%		

Tabla 36. Encaje Granulométrico de la mezcla F10-4.

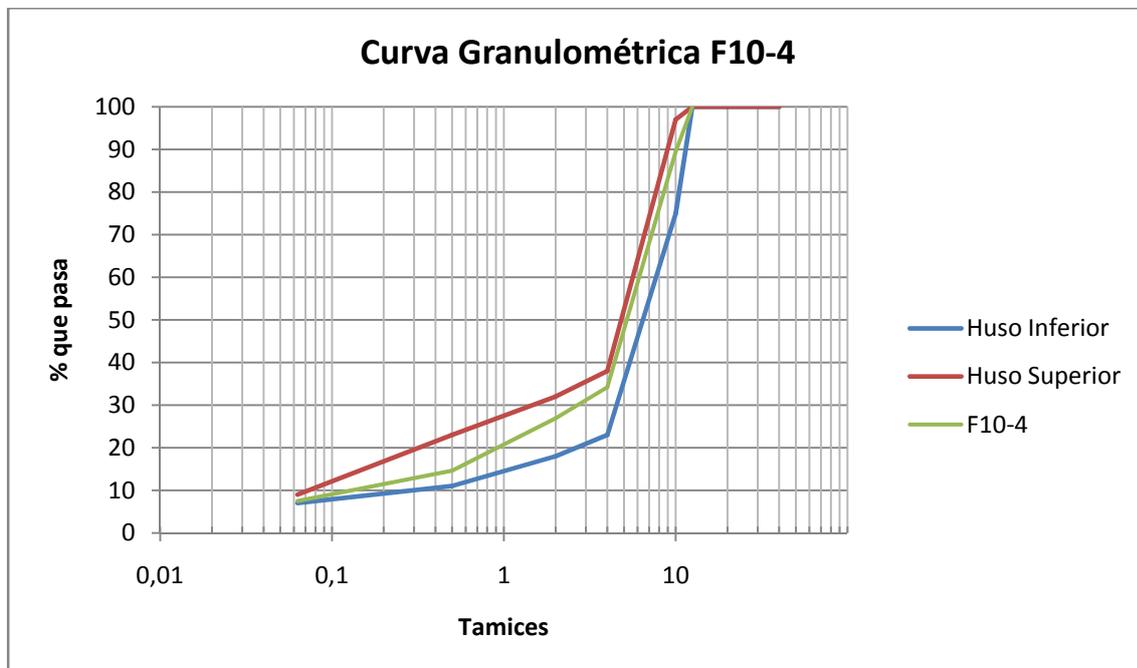


Gráfico 19. Curva Granulométrica F10-4.

La densidad relativa de los áridos en aceite de parafina según la NLT 176/96 fue de 2,422 gr/cm³. Esta fórmula de trabajo sustituye el 100% del árido por residuos de Siletone®, de ahí que la densidad obtenida sea la más baja.

Los porcentajes de betún utilizados en la obtención del contenido óptimo de ligante fueron 5%, 5,5% y 6% sobre el peso de los áridos. Repitiendo una vez más el ensayo Marshall con las mismas características:

- Temperatura de fabricación de la mezcla: 160° C
- Temperatura de compactación de las probetas: 158° C
- Nº de golpes por cada cara: 50

Las medias de los resultados obtenidos en el ensayo para cada uno de los porcentajes de betún fueron:

Ligante sobre áridos (%)	5	5,5	6
Densidad Probetas (gr/cm ³)	2,055	2,081	2,074
Huecos/Mezcla (%)	9,7	8,1	7,8
Estabilidad (kN)	19,2	18,6	19,2

Tabla 37. Resultados del ensayo Marshall F10-4.

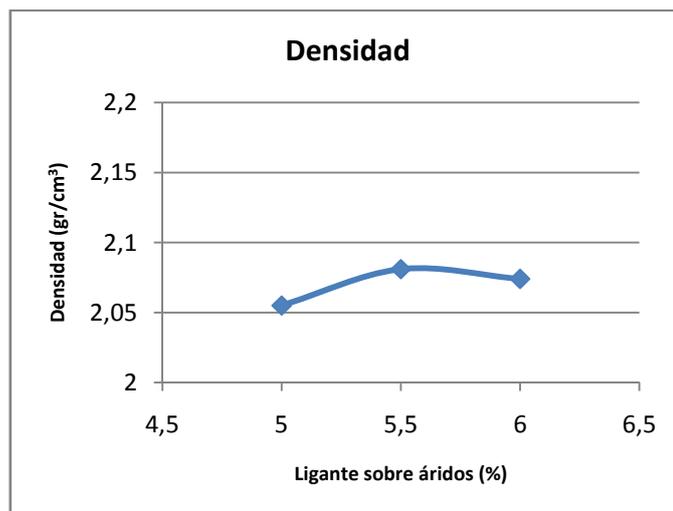


Gráfico 20. Curva de densidad Marshall F10-4.

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

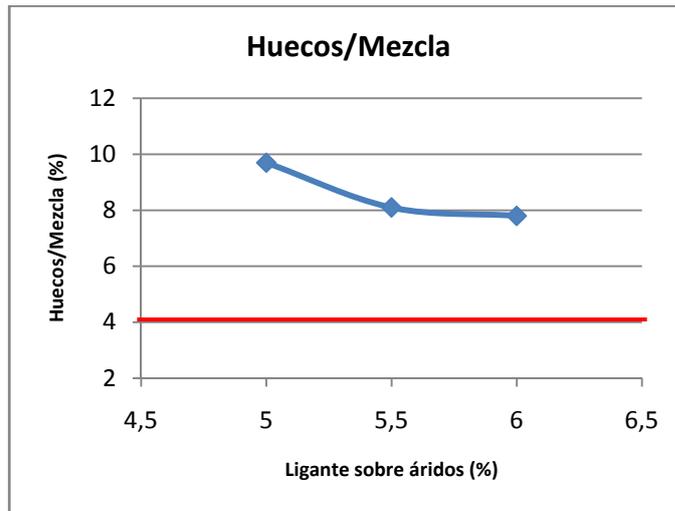


Gráfico 21. Curva de Huecos/Mezcla F10-4.

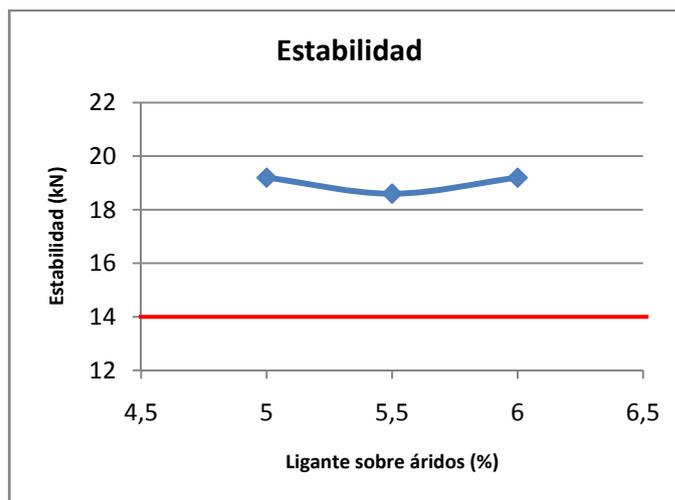


Gráfico 22. Curva de estabilidad Marshall F10-4.

En base a estos resultados, el contenido óptimo de ligante seleccionado fue el 5,5%.

- **Resumen Fórmulas de Trabajo:**

A continuación se lleva a cabo un resumen con los valores obtenidos en las diferentes fórmulas de trabajo diseñadas. Además, se llevará a cabo un análisis comparativo de las mezclas con residuos Silestone®, entre ellas mismas, y con la mezcla de referencia.

Las granulometrías seleccionadas para cada una de las fórmulas de trabajo diseñadas fueron:

Tamiz	Huso F10	F10-Convencional	F10-1	F10-2	F10-3	F10-4
12,5	100	100	99	99	100	100
10	75-97	81,1	86	85,6	89,5	89,5
4	23-38	30	35	33,1	33,2	34,2
2	18-32	25,4	27,8	25,6	25,5	26,9
0,5	11-23	14,5	14,2	12,9	13,2	14,6
0,063	7-9	8,9	7,2	7,5	8,2	7,5

Tabla 38. Resumen de las Granulometrías de las mezclas estudiadas.

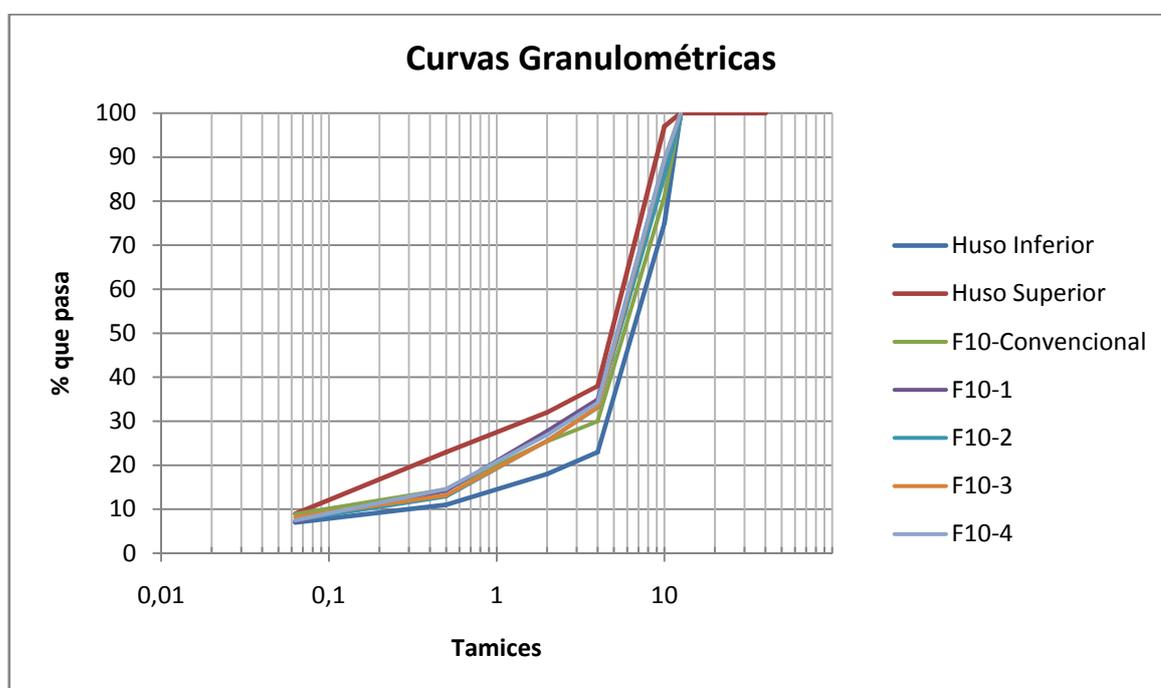


Gráfico 23. Curvas Granulométricas de las mezclas estudiadas.

Como podemos observar, el encaje realizado es bastante similar en todas las fórmulas de trabajo estudiadas. Este encaje está realizado lo más centrado posible en el huso con el objetivo de prevenir que pequeñas variaciones de la granulometría durante la fabricación, no impidan que el esqueleto mineral siga cumpliendo con las especificaciones. Además, destacar que todas las granulometrías presentadas cumplen con la condición de discontinuidad entre los tamices 4 y 2 mm que marca el PG-3.

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

Por otra parte, los resultados obtenidos tras la realización de los respectivos ensayos Marshall para la determinación del contenido óptimo de ligante fueron:

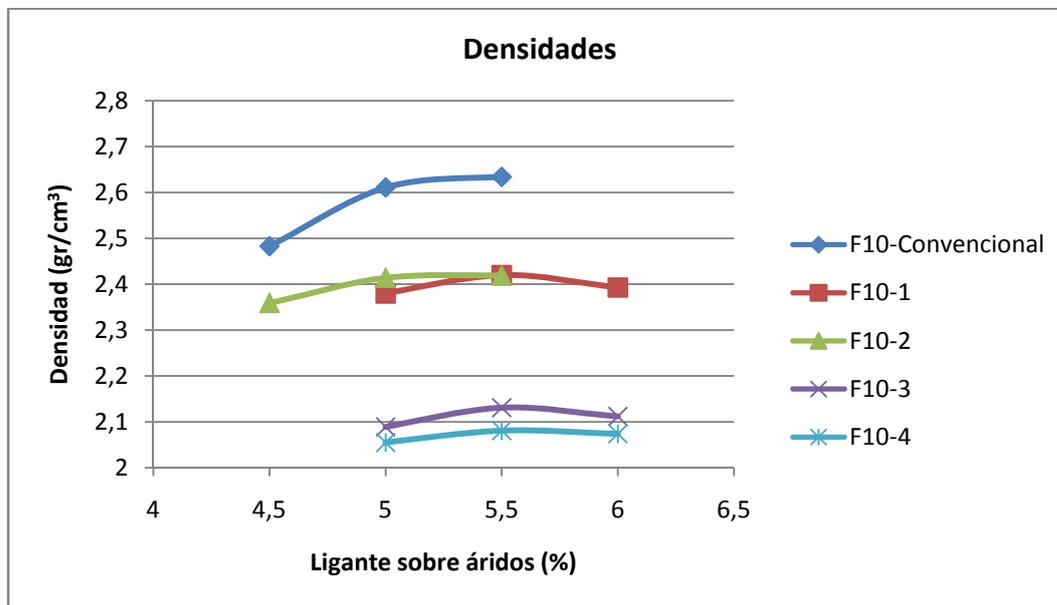


Gráfico 24. Curvas de densidades Marshall de las mezclas estudiadas.

Se observa que existe una clara tendencia a la disminución de la densidad de las probetas conforme se incrementa la cantidad de residuos de Silestone® incorporada. Esto es debido a las diferencias de densidad entre los áridos naturales (de densidad superior) y los residuos (de menor densidad), que termina repercutiendo en la densidad alcanzada por las probetas. Además, podemos observar como las mezclas con residuos Silestone® son más estables a la variación de betún (son más planas), y por tanto esto es una ventaja en caso de fallos en la dosificación de betún, puesto que la mezcla variará poco sus propiedades.

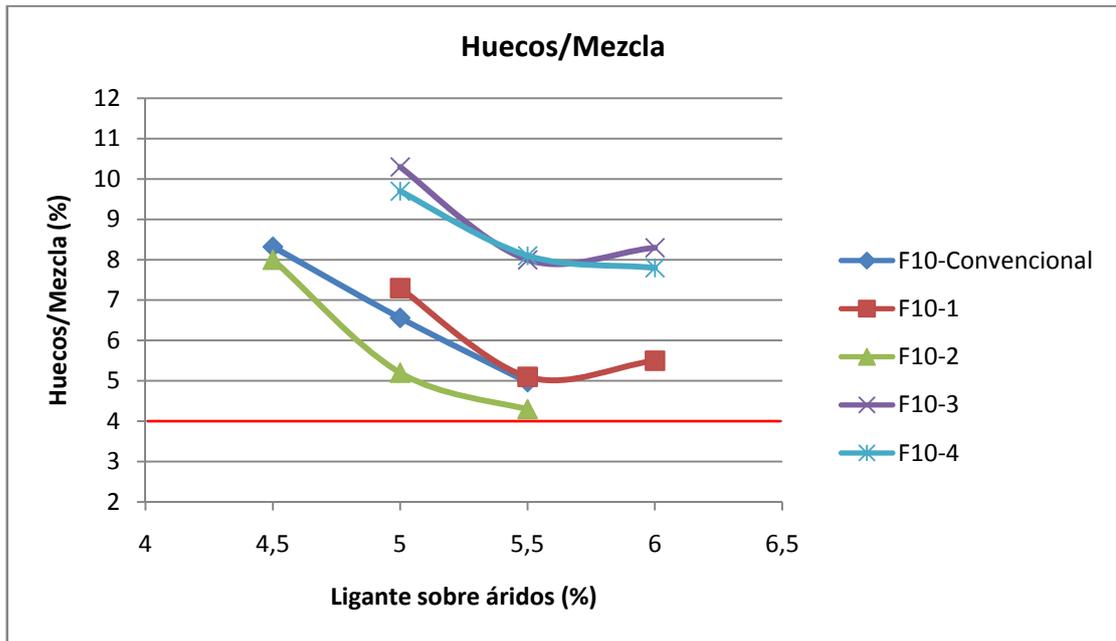


Gráfico 25. Curvas de Huecos/Mezcla de las mezclas estudiadas.

Parece existir cierta tendencia al aumento del porcentaje de huecos en mezcla con el aumento del porcentaje de residuos adicionados a ésta. Esta tendencia, guarda correspondencia con los valores obtenidos en la densidad de las probetas, lo que puede traducirse también, además de en una diferencia de densidad de los áridos, en una mayor dificultad de compactación de las mezclas conforme se aumenta su contenido de residuos. De nuevo se muestra un comportamiento más estable ante las variaciones del porcentaje de ligante en las mezclas con Silestone® que en la mezcla convencional. La similitud en la tendencia de las curvas de las fórmulas de trabajo que incorporan residuos ponen de manifiesto un mismo comportamiento de éste ante la variación del porcentaje de betún.

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

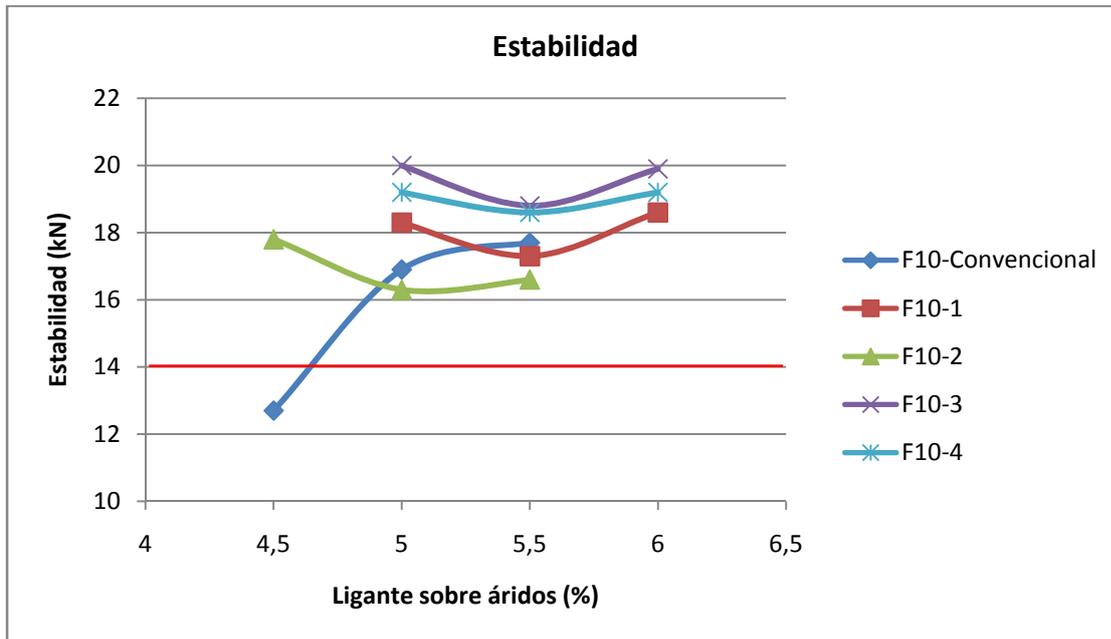


Gráfico 26. Curvas de estabilidad Marshall de las mezclas estudiadas.

La tendencia mostrada por las curvas de las mezclas con residuos (todas siguen un mismo comportamiento), difiere de la obtenida para la mezcla de referencia. Una vez más, el residuo vuelve más estable los resultados obtenidos en función de la variación de betún. Además puede observarse cómo, el aumento de residuo en la mezcla mejora los valores de estabilidad de la mezcla.

En base a los resultados analizados, los contenidos óptimos de betún seleccionados para cada una de las fórmulas de trabajo fueron:

Mezcla	F10- Convencional	F10-1	F10-2	F10-3	F10-4
Contenido óptimo de betún	5%	5%	5,3%	5,3%	5,5%

Tabla 39. Contenidos Óptimos de Betún.

El contenido de betún demandado por las mezclas aumenta conforme aumenta el contenido de residuo en éstas. Esto puede ser debido a la mayor absorción que presentan los residuos Silestone® y que por tanto requieren mayor cantidad de ligante para garantizar una envuelta que proporcione cohesión a la mezcla.

Como resumen de los resultados obtenidos tras el análisis Marshall podemos decir que el aumento de la cantidad de residuo Silestone® adicionado en la mezcla provoca una

disminución de la densidad, un aumento del porcentaje de huecos en mezcla, así como un aumento de la estabilidad de éstas. Por otra parte, la adición de residuo a las mezclas hace que éstas sean más estables a los cambios de contenido de ligante, lo cual supone una ventaja si hay problemas en la dosificación de éste, ya que sus propiedades se verán modificadas en menor medida.

5.2.2. Análisis del comportamiento de las mezclas en laboratorio

Una vez definidas las cinco fórmulas de trabajo del estudio, se procede a su caracterización en laboratorio. Para ello se utilizaron los ensayos prescritos en el artículo 543 del PG-3 para este tipo de mezclas. Así, a cada mezcla se le realizaron los ensayos de inmersión-compresión (NLT 162) y resistencia a deformaciones plásticas en pista (NLT 173). Los resultados obtenidos pusieron de manifiesto que todas las fórmulas de trabajo estudiadas cumplen con las especificaciones normativas y por tanto son aptas para la construcción de firmes en capas de rodadura.

A continuación se exponen los resultados de los ensayos y su análisis para las cinco fórmulas de trabajo estudiadas. Comenzaremos por la mezcla F10 de referencia, continuando posteriormente con los resultados de las cuatro mezclas con residuos incorporados. Finalmente, se realizará un resumen comparativo del conjunto de resultados obtenidos en estos ensayos.

- **F10- Convencional:**

El primer ensayo de caracterización realizado a las mezclas es el ensayo de inmersión-compresión (NLT 162). En el caso de la mezcla convencional de referencia, se obtienen los siguientes resultados:

Probetas No Sumergidas						
Probeta Nº	1	2	3	4	5	Media
Densidad (gr/cm ³)	2,648	2,649	2,632	2,656	2,697	2,656
Resistencia (Kgf/cm ²)	112,3	115,1	109,8	102,4	110,6	110,0

Tabla 40. Resistencias y densidades en seco F10-Convencional.

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

Probetas Sumergidas						
Probeta N°	1	2	3	4	5	Media
Densidad (gr/cm ³)	2,668	2,648	2,659	2,644	2,654	2,655
Resistencia (Kgf/cm ²)	89,8	95,7	93,5	99,1	100,2	95,66

Tabla 41. Resistencias y densidades en húmedo F10-Convencional.

Resistencia Conservada 86,9 %

Como podemos observar en la Tabla 23, la mezcla diseñada cumple con las especificaciones establecidas por el PG-3 para mezclas de capa de rodadura.

El siguiente ensayo a realizar es el ensayo de resistencia a deformaciones plásticas en pista (NLT 173), las condiciones de ejecución de dicho ensayo fueron:

- Temperatura de compactación de las probetas: 160° C
- Número de probetas fabricadas para el ensayo: 3
- Temperatura de ensayo: 60° C
- Presión de Contacto: 9,0 Kgf/cm²

Los resultados obtenidos para la mezcla F10 de referencia son:

Velocidad de deformación V _{min./min.}	Velocidad (μ/min)
V _{30/45}	2,7
V _{75/90}	2,4
V _{105/120}	2,0
Deformación total (mm.)	0,88

Tabla 42. Resultados Ensayos Pista F10-Convencional.

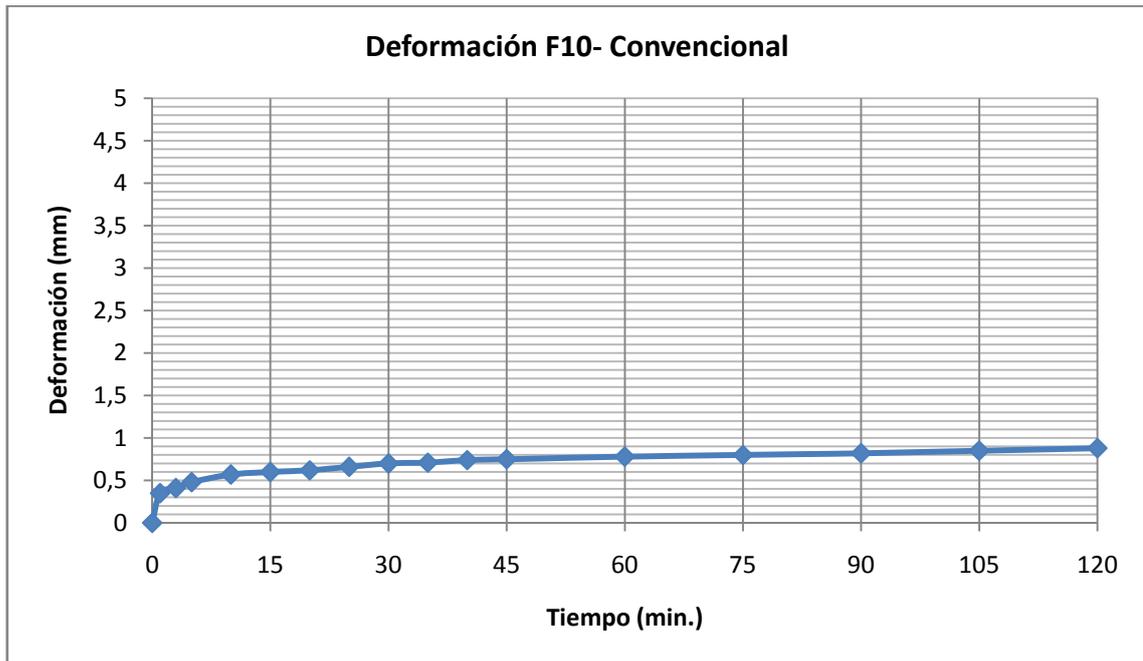


Gráfico 27. Gráfica de deformación del ensayo en pista mezcla F10-Convencional.

De la misma forma que en el caso del ensayo de inmersión-compresión, la mezcla de referencia diseñada también cumple con las especificaciones establecidas para mezclas de capa de rodadura (Tabla 23), y por tanto, es apta para la construcción de firmes de carreteras.

Una vez finalizada la caracterización de la mezcla de referencia, continuaremos con la caracterización de las diferentes mezclas con residuos Silestone® incorporado.

- **Mezcla F10-1:**

Los resultados obtenidos en el ensayo de inmersión compresión para la mezcla F10-1 son:

Probetas No Sumergidas						
Probeta Nº	1	2	3	4	5	Media
Densidad (gr/cm ³)	2,383	2,381	2,382	2,384	2,376	2,381
Resistencia (Kgf/cm ²)	65,92	64,95	66,16	66,17	66,03	65,84

Tabla 43. Resistencias y densidades en seco F10-1.

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

Probetas Sumergidas						
Probeta N°	1	2	3	4	5	Media
Densidad (gr/cm ³)	2,363	2,388	2,376	2,375	2,382	2,377
Resistencia (Kgf/cm ²)	59,55	59,50	60,27	59,75	61,81	60,20

Tabla 44. Resistencias y densidades en húmedo F10-1.

Resistencia Conservada 91,4 %

Como podemos observar, a pesar de que las resistencias obtenidas por las probetas de la mezcla F10-1 son inferiores a las de la mezcla de referencia, el comportamiento de éstas ante la acción del agua es sustancialmente mejor, cumpliendo por tanto con el límite establecido por la normativa. Además, también puede apreciarse una reducción en la densidad de las probetas que puede ser debida a la menor densidad del residuo frente a los áridos naturales.

Por su parte, las condiciones de ensayo fueron:

- Temperatura de compactación de las probetas: 160º C
- Número de probetas fabricadas para el ensayo: 3
- Temperatura de ensayo: 60º C
- Presión de Contacto: 9,0 Kgf/cm²

Los resultados obtenidos para la mezcla F10-1 fueron:

Velocidad de deformación V _{min./min.}	Velocidad (µ/min)
V _{30/45}	11,8
V _{75/90}	6,0
V _{105/120}	4,4
Deformación total (mm.)	2,06

Tabla 45. Resultados Ensayos Pista F10-1.

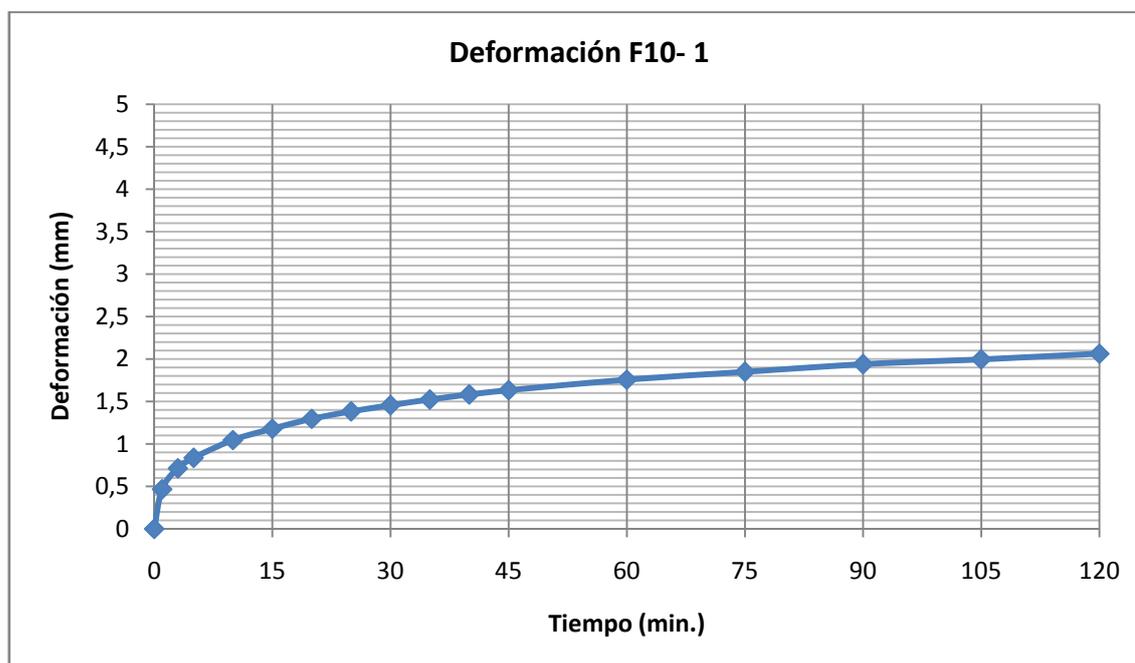


Gráfico 28. Gráfica de deformación del ensayo en pista mezcla F10-1.

Los resultados obtenidos ante el ensayo de deformaciones plásticas en pista para la mezcla F10-1 muestran un comportamiento ligeramente más desfavorable que el presentado por la mezcla convencional, pero a pesar de ello cumple ampliamente con el límite especificado en el PG-3 y por tanto, también se verifica la aptitud de esta mezcla para ser utilizada en la fabricación de capas de rodadura en carreteras.

- **Mezcla F10-2:**

Los resultados obtenidos en el ensayo de inmersión-compresión para la mezcla F10-2 son:

Probetas No Sumergidas						
Probeta Nº	1	2	3	4	5	Media
Densidad (gr/cm ³)	2,422	2,397	2,410	2,409	2,411	2,410
Resistencia (Kgf/cm ²)	71,42	73,79	73,42	73,51	73,51	73,13

Tabla 46. Resistencias y densidades en seco F10-2.

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

Probetas Sumergidas						
Probeta Nº	1	2	3	4	5	Media
Densidad (gr/cm ³)	2,422	2,404	2,409	2,412	2,413	2,412
Resistencia (Kgf/cm ²)	64,45	60,42	66,67	63,17	66,73	64,28

Tabla 47. Resistencias y densidades en húmedo F10-2.

Resistencia Conservada 87,9 %

Como vemos, en este caso la resistencia conservada de la mezcla vuelve a ser superior a la de la mezcla de referencia, cumpliendo de sobra con las especificaciones establecidas por la norma. A pesar de ello, vuelven a obtenerse valores de resistencia inferiores a los de la mezcla convencional. Además, vuelve a observarse una disminución en la densidad de las probetas con respecto a la mezcla de referencia.

Al igual que en los casos anteriores, las condiciones del ensayo de resistencia a deformación en pista para la mezcla F10-2 fueron:

- Temperatura de compactación de las probetas: 160º C
- Número de probetas fabricadas para el ensayo: 3
- Temperatura de ensayo: 60º C
- Presión de Contacto: 9,0 Kgf/cm²

Los resultados obtenidos para la mezcla F10-2 fueron:

Velocidad de deformación V _{min./min.}	Velocidad (µ/min)
V _{30/45}	9,5
V _{75/90}	4,4
V _{105/120}	3,7
Deformación total (mm.)	2,06

Tabla 48. Resultados Ensayos Pista F10-2.

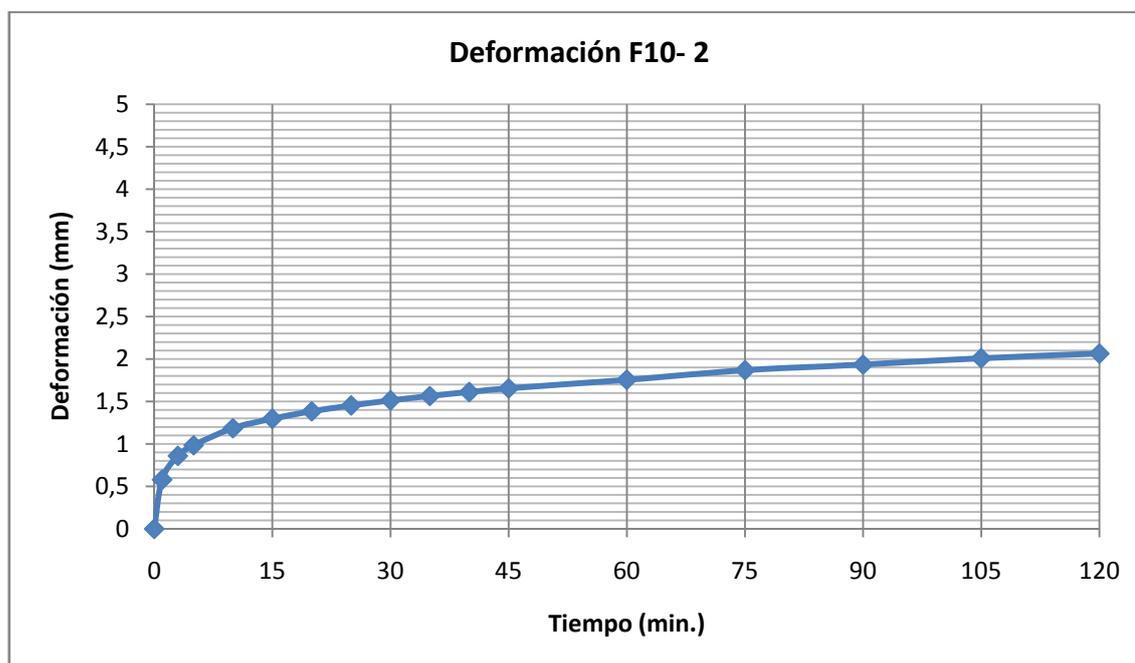


Tabla 49. Gráfica de deformación del ensayo en pista mezcla F10-2.

Los resultados obtenidos en resistencias a deformaciones plásticas para esta mezcla son muy similares a los obtenidos para la F10-1, y por tanto, algo inferiores a los de la mezcla de referencia. A pesar de ello, los valores de deformación cumplen con los límites establecidos por el PG-3, demostrándose la aptitud de la mezcla F10-2 para ser utilizada en capas de rodadura de firmes.

- **Mezcla F10-3:**

Los resultados del primer ensayo de caracterización realizado a la mezcla F10-3 (inmersión-compresión) son los siguientes:

Probetas No Sumergidas						
Probeta Nº	1	2	3	4	5	Media
Densidad (gr/cm ³)	2,206	2,196	2,207	2,214	2,191	2,203
Resistencia (Kgf/cm ²)	63,71	65,44	68,17	62,48	57,20	63,36

Tabla 50. Resistencias y densidades en seco F10-3.

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

Probetas Sumergidas						
Probeta Nº	1	2	3	4	5	Media
Densidad (gr/cm ³)	2,207	2,213	2,212	2,183	2,192	2,201
Resistencia (Kgf/cm ²)	54,40	52,93	55,63	49,13	56,34	53,66

Tabla 51. Resistencias y densidades en húmedo F10-3.

Resistencia Conservada 84,7 %

Las resistencias obtenidas en este ensayo por la mezcla F10-3 vuelven a ser inferiores a las de la mezcla convencional. Además, su comportamiento ante la acción del agua también ha empeorado, a pesar de ello los resultados obtenidos cumplen con las exigencias marcadas por la normativa. En cuanto a la densidad de las probetas, empieza a apreciarse la tendencia de que a mayor cantidad de residuo incorporado en la mezcla, menor densidad tienen las probetas.

El siguiente ensayo realizado tiene por objeto determinar la resistencia a deformaciones plásticas en pista de laboratorio. Las condiciones de ensayo y los resultados obtenidos para el ensayo de resistencia a deformación en pista para la mezcla F10-3 fueron:

- Temperatura de compactación de las probetas: 160º C
- Número de probetas fabricadas para el ensayo: 3
- Temperatura de ensayo: 60º C
- Presión de Contacto: 9,0 Kgf/cm²

Velocidad de deformación V _{min./min.}	Velocidad (µ/min)
V _{30/45}	13,3
V _{75/90}	5,0
V _{105/120}	3,5
Deformación total (mm.)	3,58

Tabla 52. Resultados Ensayos Pista F10-3.

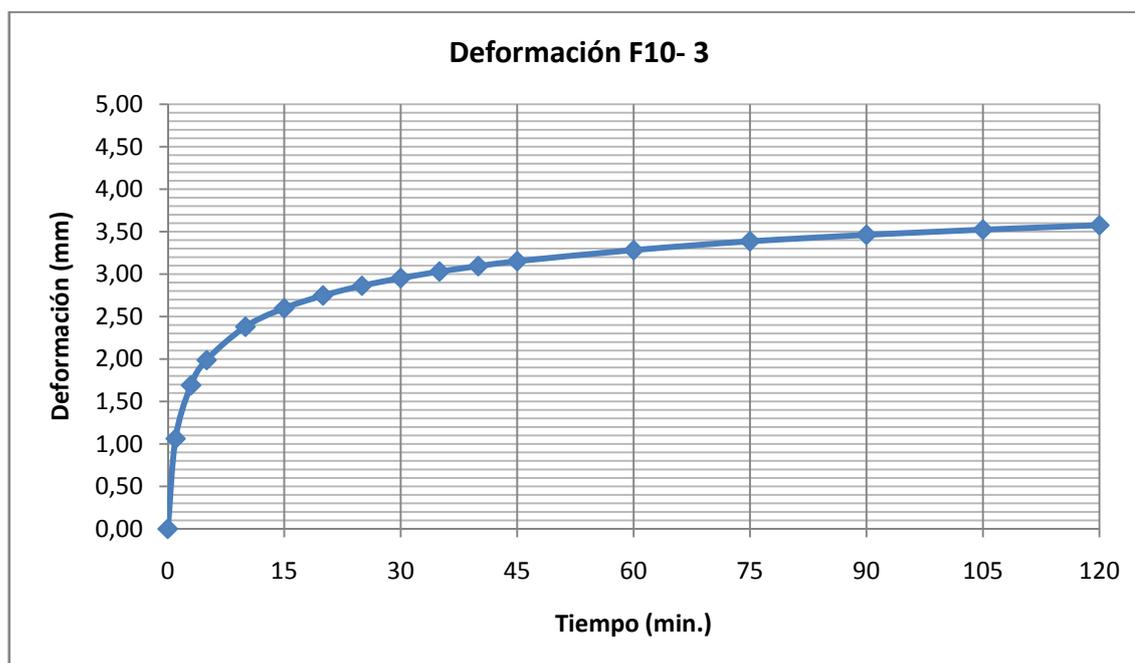


Tabla 53. Gráfica de deformación del ensayo en pista mezcla F10-3.

Los valores de resistencias inferiores reflejados en el ensayo de inmersión-compresión, también se han puesto de manifiesto en el ensayo en pista mostrando unas deformaciones superiores a las del resto de mezclas. No obstante, los valores obtenidos en ambos ensayo cumplen con los establecidos por la normativa y por tanto permiten la utilización de la mezcla F10-3 en capas de rodadura.

- **Mezcla F10-4:**

Los resultados obtenidos en el ensayo de inmersión-compresión fueron:

Probetas No Sumergidas						
Probeta Nº	1	2	3	4	5	Media
Densidad (gr/cm ³)	2,146	2,148	2,150	2,144	2,151	2,148
Resistencia (Kgf/cm ²)	61,83	63,45	57,51	58,39	58,72	59,94

Tabla 54. Resistencias y densidades en seco F10-4.

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

Probetas Sumergidas						
Probeta Nº	1	2	3	4	5	Media
Densidad (gr/cm ³)	2,141	2,149	2,143	2,140	2,152	2,145
Resistencia (Kgf/cm ²)	56,73	54,31	51,11	52,94	54,67	53,92

Tabla 55. Resistencias y densidades en húmedo F10-4.

Resistencia Conservada 90,0 %

A pesar de que los valores de resistencia obtenidos para la mezcla F10-4 son los más bajos de los ensayos de inmersión-compresión realizados durante la caracterización de las mezclas diseñadas, éstos cumplen la normativa establecida para mezclas de capas de rodadura, mostrando muy baja sensibilidad ante la acción del agua. En cuanto a la densidad de las probetas obtenidas, termina por confirmarse que a mayor cantidad de residuo en la mezcla, menor densidad poseen las probetas.

Por su parte, las condiciones de ensayo y los resultados obtenidos para el ensayo de resistencia a deformación en pista fueron:

- Temperatura de compactación de las probetas: 160º C
- Número de probetas fabricadas para el ensayo: 3
- Temperatura de ensayo: 60º C
- Presión de Contacto: 9,0 Kgf/cm²

Velocidad de deformación V _{min./min.}	Velocidad (µ/min)
V_{30/45}	14,2
V_{75/90}	6,9
V_{105/120}	5,6
Deformación total (mm.)	2,99

Tabla 56. Resultados Ensayos Pista F10-4.

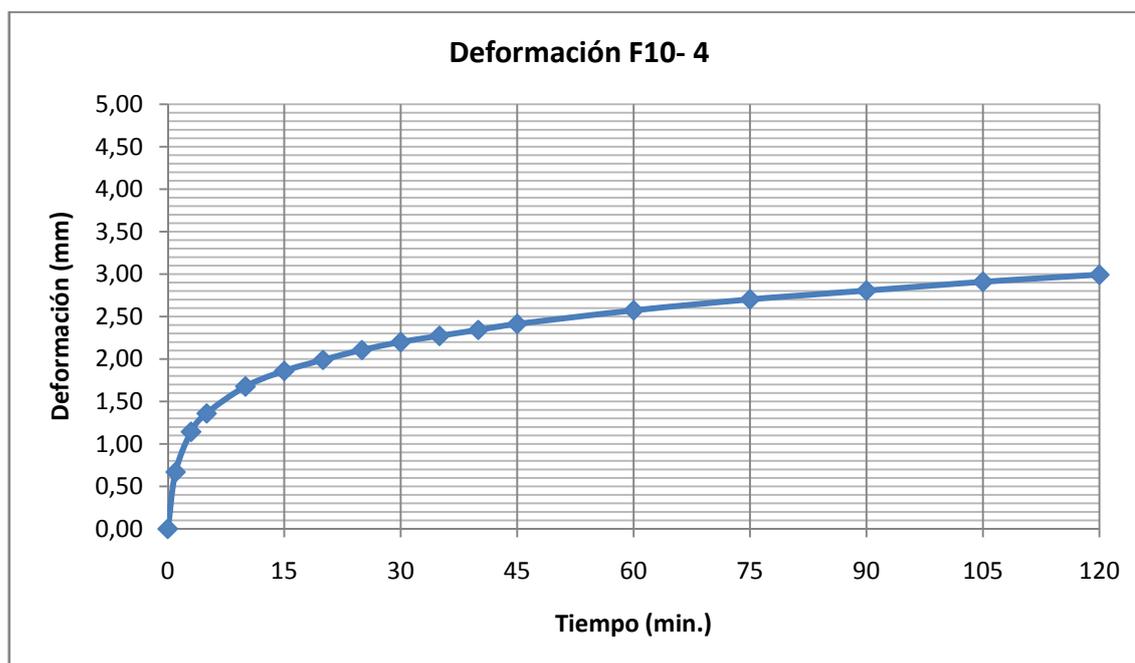


Tabla 57. Gráfica de deformación del ensayo en pista mezcla F10-4.

A pesar de que la velocidad de deformación obtenida para el ensayo en pista es superior a las del resto de las fórmulas de trabajo estudiadas, ésta cumple con los requisitos exigidos en la norma, con lo que se demuestra que es posible utilizar mezclas bituminosas para capas de rodadura de firmes de carreteras, fabricadas íntegramente con residuos de Silestone®.

- **Resumen Ensayos de Caracterización:**

A modo resumen, se expone a continuación un breve análisis comparativo del conjunto de resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de las mezclas estudiadas.

Las medias de los resultados obtenidos en los ensayos de inmersión-compresión fueron:

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

Mezclas		F10-Convencional	F10-1	F10-2	F10-3	F10-4
Probetas No Sumergidas	Densidad (gr/cm ³)	2,656	2,381	2,410	2,203	2,148
	Resistencia (kgf/cm ²)	110,0	65,84	73,13	63,36	59,94
Probetas Sumergidas	Densidad (gr/cm ³)	2,655	2,377	2,412	2,201	2,145
	Resistencia (kgf/cm ²)	95,66	60,20	64,28	53,66	53,92
Resistencia Conservada (%)		86,9	91,4	87,9	84,7	90,0

Tabla 58. Resumen de resultados ensayos de inmersión-compresión.

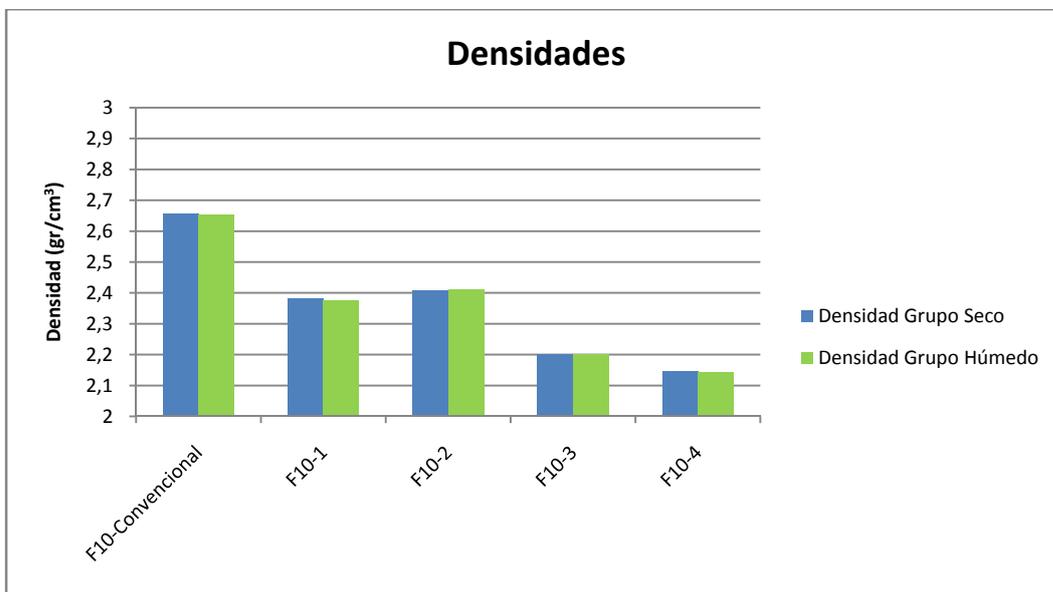


Gráfico 29. Densidades medias de las probetas de inmersión-compresión.

Las densidades obtenidas en las probetas del ensayo de inmersión compresión muestran como a mayor cantidad de residuo adicionado en la mezcla, menor densidad tiene la probeta. Este resultado es lógico puesto que la densidad de los residuos de Silestone® es inferior a la de los áridos naturales.

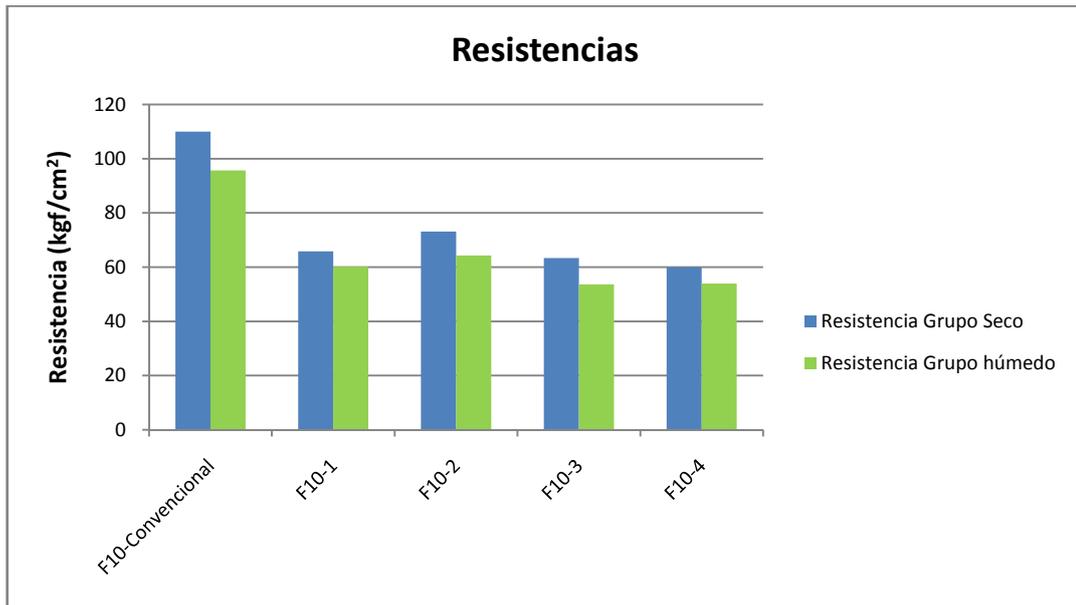


Gráfico 30. Resistencias medias de las probetas de inmersión-compresión.

En primer lugar hemos de destacar la evidente pérdida de resistencia que trae consigo la incorporación de residuos Silestone® a las mezclas bituminosas (es claro que la mezcla convencional ofrece resistencias superiores). De la misma forma que en el caso de la densidad, se muestra una cierta tendencia por la que a mayor cantidad de residuo incorporado en la mezcla, menor es la resistencia de las probetas ensayadas.

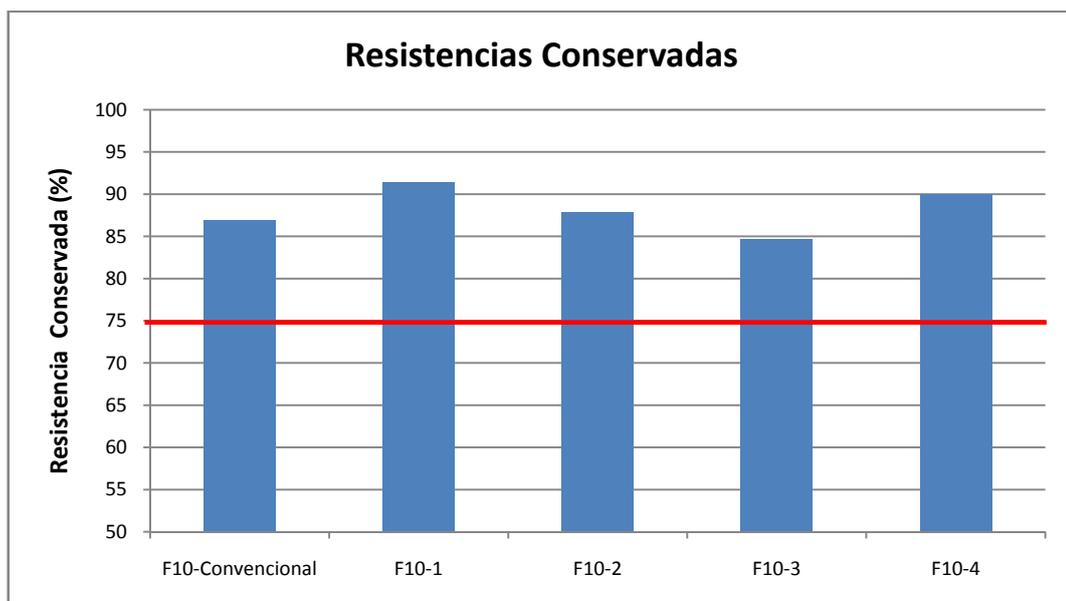


Gráfico 31. Resistencias conservadas de las mezclas estudiadas ante el ensayo de inmersión-compresión.

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

Como podemos observar, todas las mezclas diseñadas cumplen con las especificaciones impuestas en el PG-3 para el ensayo de inmersión-compresión. Si bien es verdad que la resistencia ofrecida a compresión simple por las mezclas que contienen residuos de Silestone® es inferior que la de la mezcla convencional, podemos decir que su comportamiento ante la acción del agua es sustancialmente mejor, viéndose menos afectadas por la acción de ésta. Destacar el comportamiento ante el agua de las mezclas que incorporan residuo en la fracción fina, lo cual puede ser debido a la mejor adhesión que presentan éstos con el betún comparada con la de la arena caliza (10, sobre 7-8 de la arena caliza), que puede proporcionar una mayor cohesión a la mezcla fabricada.

En relación a los resultados obtenidos en el ensayo de pista fueron los siguientes:

Mezclas	F10-Convencional	F10-1	F10-2	F10-3	F10-4
$V_{105/120}$ ($\mu/\text{min.}$)	2,0	4,4	3,7	3,5	5,6
Deformación total (mm.)	0,88	2,06	2,06	3,58	2,99

Tabla 59. Resumen de resultados ensayos de pista.

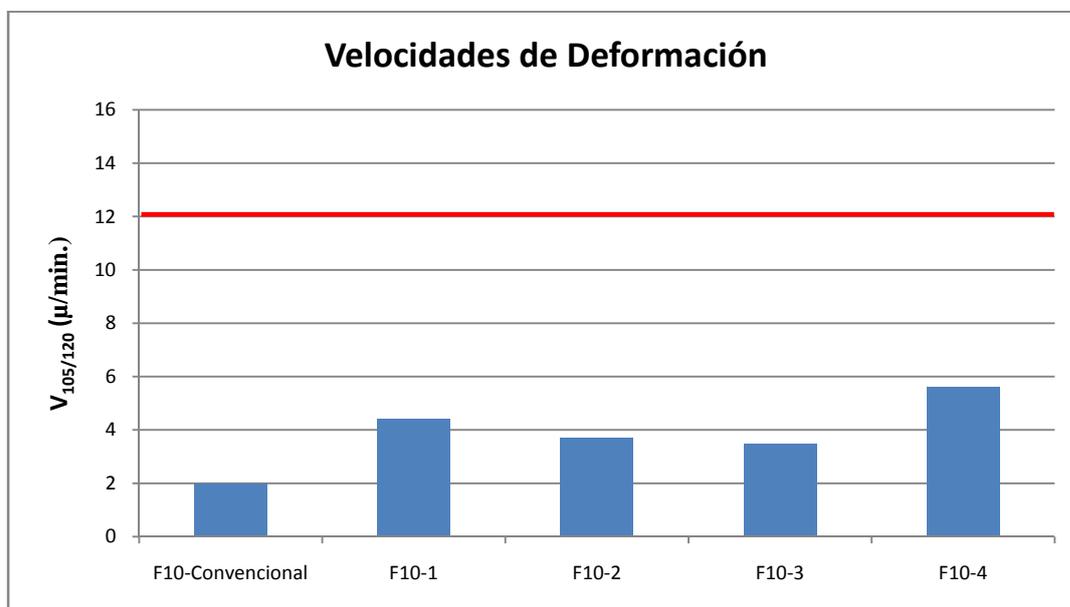


Gráfico 32. Velocidades de deformación de las mezclas estudiadas en los ensayos de pista.

Al igual que ocurriera en el ensayo de inmersión-compresión, la adición del residuo provoca un empeoramiento de la mezcla ante deformaciones plásticas. A pesar de ello, todas las mezclas diseñadas cumplen con las especificaciones establecidas en el PG-3 para mezclas de capa de rodadura ante el ensayo de pista, y por tanto son aptas para su utilización en la construcción de carreteras.

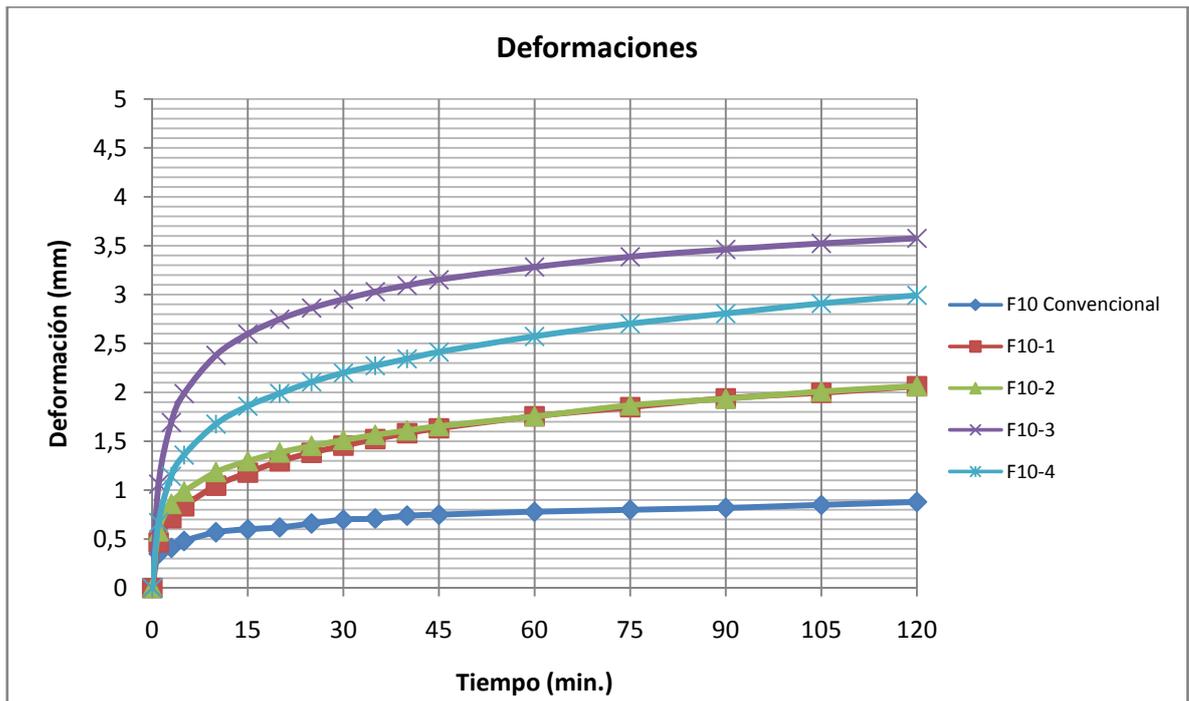


Gráfico 33. Deformaciones en el ensayo de pista de las mezclas estudiadas.

Como podemos observar, la sustitución de los áridos naturales por el residuo lleva asociado un aumento de las deformaciones. En especial, este aumento se acentúa cuando el porcentaje de ofitas sustituidas es alto, lo cual es lógico dado que en este ensayo la resistencia del árido grueso juega un papel fundamental, y en nuestro caso, la resistencia de los residuos de Silestone® son inferiores a las de las ofitas, de ahí el aumento de las deformaciones.

En vista de los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de las mezclas estudiadas, puede concluirse que todas ellas son aptas para la construcción de capas de rodadura en firmes de carretera. Dado que los resultados obtenidos en la etapa de laboratorio son positivos, se plantea una segunda etapa en la investigación que tiene

por objeto analizar el comportamiento de las mezclas diseñadas con un tramo de carretera. Los resultados de esta segunda etapa se exponen en el apartado siguiente.

5.4. Análisis de la viabilidad de fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas con residuos de Silestone®

La última etapa de esta investigación fue el estudio del comportamiento en obra de las mezclas diseñadas en laboratorio. Para ello, se ejecutó un tramo de prueba donde se realizó un análisis tanto del proceso de fabricación de las mezclas en planta (análisis del comportamiento del residuo y control de calidad de las mezclas fabricadas), como del proceso de extendido y compactación de ésta (control de calidad de las mezclas y del extendido en sí mismo). Además, para controlar el comportamiento a largo plazo, se establece un plan de ensayos de control. Finalmente se realizó un estudio económico que permitiera decidir la viabilidad o no de reutilización de este residuo en la fabricación de mezclas bituminosas.

Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados, pusieron de manifiesto el buen comportamiento del residuo durante el proceso de fabricación de las mezclas, así como la buena calidad de éstas. Por otra parte, los ensayos realizados durante la puesta en servicio del tramo de prueba (control de temperatura de fabricación y extendido, control de calidad de las mezclas,...) también mostraron un buen comportamiento de las mezclas estudiadas, validando su empleo para la construcción de carreteras. Finalmente, el análisis económico realizado mostró un ahorro en el coste de puesta en obra de las mezclas que incorporaban residuos sobre la convencional, lo que terminó de demostrar la viabilidad de reutilizar los residuos de Silestone® como áridos para la fabricación de mezclas bituminosas.

5.4.1. Fabricación de las Mezclas

Días antes del extendido del tramo, para poder contrastar que los residuos Silestone® no sufrían ningún tipo de degradación durante el proceso de fabricación de la mezcla debido a las temperaturas alcanzadas, se realizó una amasada en blanco de prueba. Así, se puso en funcionamiento la planta para la fabricación de una mezcla con residuos de Silestone®, sin adicionar ni betún ni filler, de manera que los residuos sufrieran todo el proceso de fabricación, pero pudiera observarse en qué estado se encontraban al final de ésta. Posteriormente, se recuperaron y se les realizó un ensayo granulométrico que verificara si se habían fracturado, y un ensayo de resistencia a la fragmentación que determinase si habían perdido propiedades resistentes en el proceso. Los resultados obtenidos para dichos ensayos son los siguientes:

Tamaño de los Tamices (UNE-EN 933-2)	Fracción 6/12 Silestone®	Fracción 0/3 Silestone®
12,5	100	100
10	80	100
4	3	100
2	0	78
0,5	0	27
0,063	0	3

Tabla 60. Granulometría de los residuos de Silestone® tras la amasada en blanco.

Coefficiente de Desgaste Los Ángeles 11,6

Tabla 61. Resultado del ensayo de resistencia a la fragmentación de los residuos de Silestone® tras la amasada en blanco.

Se observa que ni la granulometría, ni la resistencia del residuo sufrieron variaciones durante la fabricación de la mezcla. Este hecho terminó de contrastar que el residuo no presenta ningún inconveniente para formar parte del proceso de fabricación de mezclas bituminosas, y por tanto presenta todas las aptitudes físicas para ser valorizado como árido de carreteras.

y con el objetivo de poder analizar el comportamiento de los residuos utilizados en la planta, así como de controlar de calidad de la mezcla fabricada, se realizaron una amasada en blanco y una de prueba. que consistió en la fabricación de tres de las mezclas estudiadas, la F10-1, la F10-2 y la F10-4. El proceso seguido para ello es el

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

calentamiento previo de los áridos en el tambor secador hasta una temperatura en torno a los 200º C, y posteriormente, el mezclado junto al betún (a una temperatura en torno a los 170º C) y al filler cemento. Las temperaturas de fabricación de las mezclas resultantes se establecieron en torno a los 165º C, tal y como se había estudiado en la etapa de laboratorio.

Por otra parte, para poder establecer un control sobre la calidad de las mezclas fabricadas, se preparó la ejecución de una amasada de prueba que consistió en la fabricación de tres de las mezclas con residuos estudiadas, la F10-1, la F10-2 y la F10-4. El proceso seguido para ello es el calentamiento previo de los áridos en el tambor secador hasta una temperatura en torno a los 200º C, y posteriormente, el mezclado junto al betún (a una temperatura en torno a los 170º C) y al filler cemento. Las temperaturas de fabricación de las mezclas resultantes se fijaron en 165º C, tal y como se había estudiado en la etapa de laboratorio. Los ensayos de control realizados a estas mezclas son los siguientes:

Ensayos de Control de Fabricación de las Mezclas	
Ensayo Marshall según NLT 159	
Análisis granulométrico según NLT 165	
Contenido de ligante según NLT 164	

Tabla 62. Ensayos de control de fabricación de las mezclas tras la amasada de prueba.

Los resultados obtenidos para cada una de las mezclas fabricadas en esta amasada de prueba fueron:

Mezclas		F10-1	F10-2	F10-4
Ensayo Marshall	Densidad (gr/cm³)	2,397	2,401	2,090
	Huecos/Mezcla (%)	6,07	6,7	7,9
	Estabilidad (kN)	16,1	16,2	18,1
Análisis Granulométrico (% que pasa)	12,5	100	100	100
	10	80,3	86,3	86,3
	4	32,9	27,5	32,5
	2	24,0	20,9	24,7
	0,5	13,7	14,8	11,9
	0,063	7,1	7,4	7,2
Contenido de Ligante (%)		4,88	5,14	5,41

Tabla 63. Resultados de los ensayos de control de fabricación de las mezclas tras la amasada de prueba.

Como podemos ver, los valores obtenidos en los diferentes ensayos realizados a las mezclas cumplen con las exigencias establecidas en el PG-3, y además, muestran propiedades similares a las de las mezclas fabricadas en laboratorio, y por tanto validan la calidad del proceso de fabricación en planta.

5.4.2. Extendido y Compactación del tramo de prueba

En primer lugar, antes de llevar a cabo el extendido del tramo de prueba, se realizó un ensayo de IRI sobre la mezcla existente en la carretera donde éste iba a ser ejecutado. El objetivo fue comprobar el estado de la capa sobre la que iba a situarse el tramo. Los resultados obtenidos fueron:

Vía	Capa	Valores de IRI			Criterio de Aceptación	IRI Medio	Desv.
		% Obtenido	%Exigido	Cumple			
Carril Derecho	S25	40,00%	50<3,0	NO	P.P.T.G. ADAR	3,049	0,803
		100%	80<4,5				
		100%	100<6,0				
Carril Izquierdo	S25	60,00%	50<3,0	SI	P.P.T.G. ADAR	2,906	0,491
		100%	80<4,5				
		100%	100<6,0				

Tabla 64. Resultados del ensayo IRI previo al extendido de las mezclas.

Los resultados del carril derecho no cumplen con las prescripciones exigidas en este ensayo, por lo que habría que tenerse este hecho en cuenta si algún posible defecto de regularidad apareciera en esta zona tras el extendido de las mezclas de nuestro estudio.

Una vez verificado el estado de la capa existente sobre el tramo a trabajar, se realizó la ejecución de la puesta en servicio de las mezclas estudiadas. El orden de fabricación de las mezclas en la planta, y por tanto, de su posterior extendido, siguió un patrón definido. En primer lugar se fabricó la mezcla F10- Convencional, y posteriormente se fueron adicionando porcentajes del residuo de forma creciente, primero en la fracción

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

gruesa, y posteriormente en la fina. Así, el orden final establecido fue F10-Convencional, F10-2, F10-3, F10-1 y F10-4.

La temperatura de fabricación en planta se fijó en 190° C para los áridos y 170° C para el betún, de esta forma, dada la distancia de la planta al tramo de prueba, se alcanzaría una temperatura de extendido de unos 150° C (unos 120° C tras el paso de los rodillos de compactación), ideal para garantizar la trabajabilidad de la mezcla, y asegurar que el betún no sufriera problemas de oxidación. Así, se fijó un control de temperatura tanto en planta como durante el extendido, para el cual se utilizó una cámara térmica que verificó que la puesta en servicio de los tramos se hizo a temperatura adecuada.

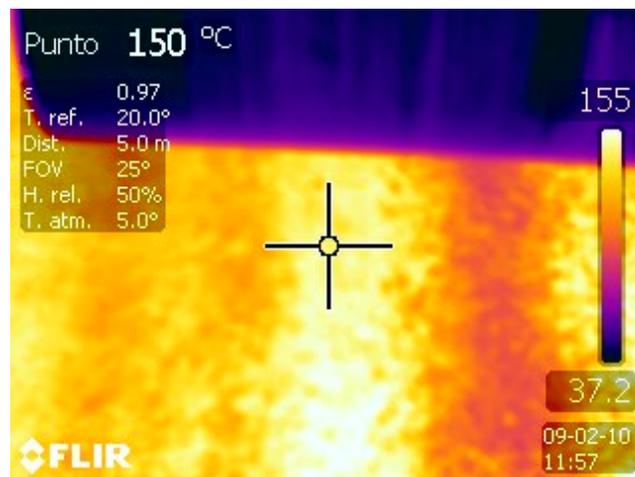


Foto 32. Temperatura de salida de la mezcla de la extendidora.



Foto 33. Temperatura de compactación de las mezclas.

Durante el extendido de cada una de las mezclas con residuo estudiadas, se tomaron muestras a la salida de la extendidora, con las cuales se llevaron a cabo ensayos de control de calidad (Inmersión-compresión y resistencia a deformaciones plásticas en pista).

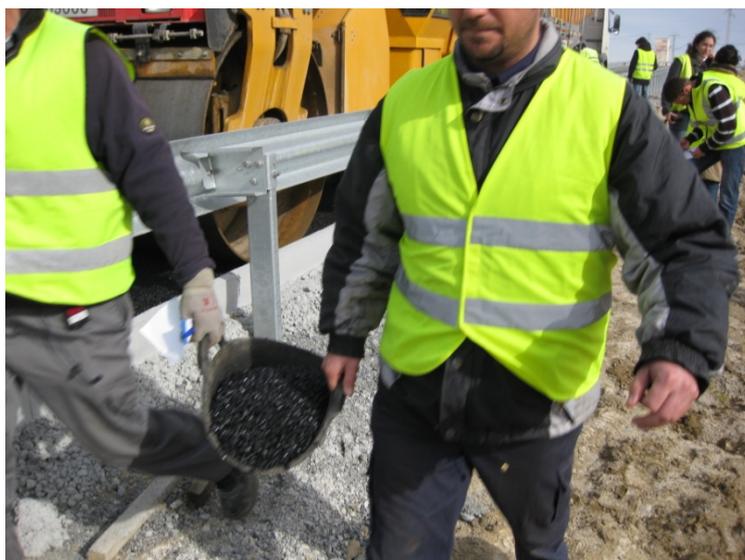


Foto 34. Recogida de muestras a la salida de la extendidora.

Los resultados de control obtenidos en dichos ensayos han sido los siguientes:

Mezclas	F10-1	F10-2	F10-3	F10-4
Inmersión-Compresión (Resistencia conservada)	83%	91%	85%	90%
Def. Plásticas en Pista ($V_{105/120}$)	2,3	1,1	1,7	2,5

Tabla 65. Resultados de los ensayos de control de las muestras recogidas en el extendido.

Todos los resultados cumplen con las especificaciones establecidas por el PG-3, y por tanto, muestran la calidad de las mezclas extendidas. Comparando los resultados con los obtenidos durante la etapa de diseño en laboratorio, tenemos:

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

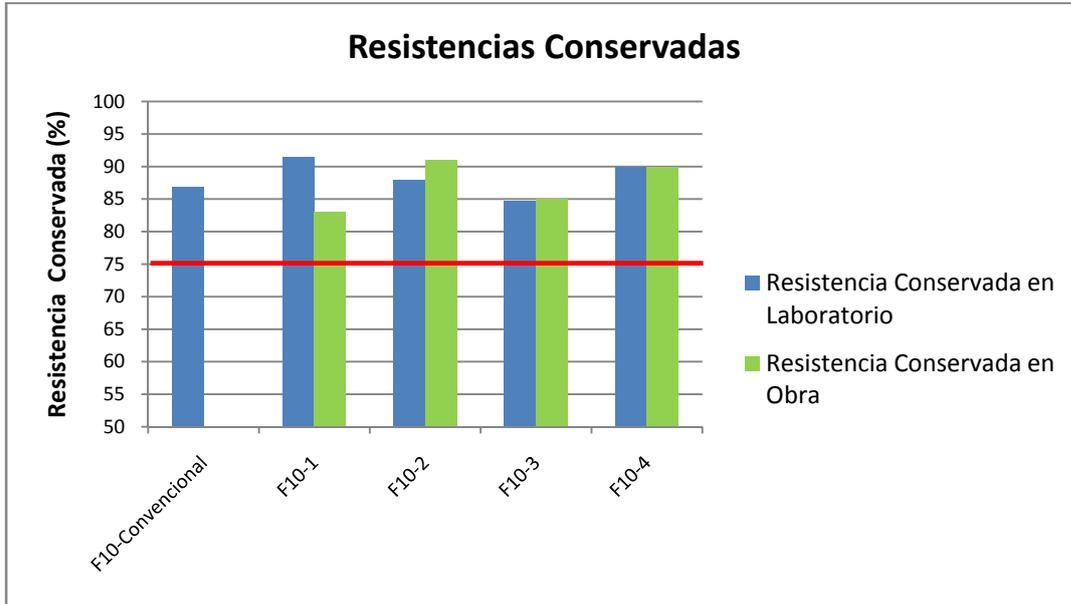


Gráfico 34. Comparativa de las resistencias conservadas de las mezclas diseñadas en laboratorio y extendidas en obra.

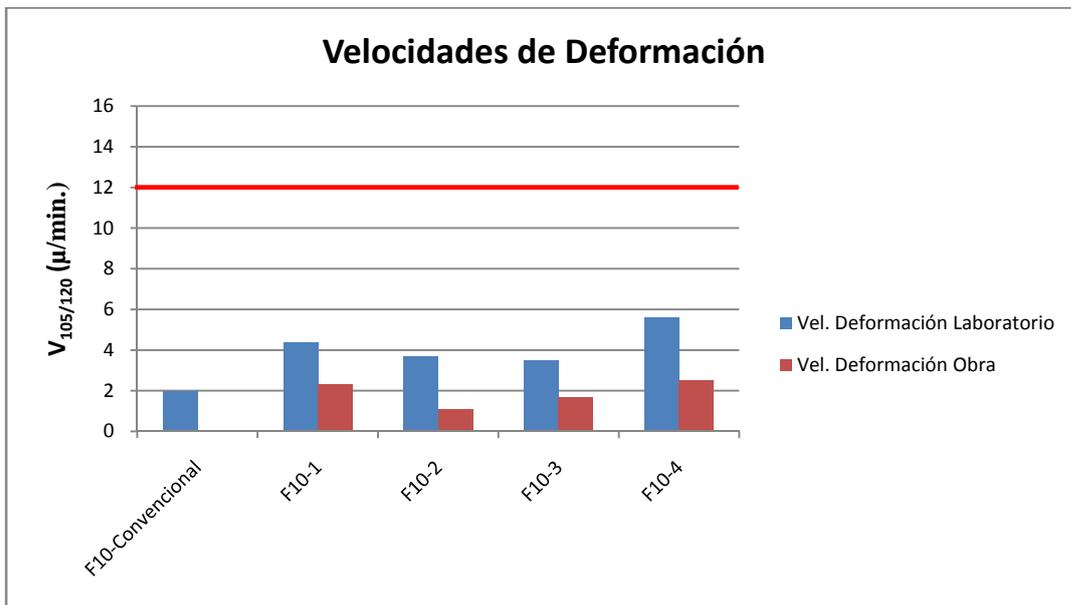


Gráfico 35. Comparativa de las velocidades de deformación de las mezclas diseñadas en laboratorio y extendidas en obra.

Como podemos ver, exceptuando el valor obtenido para la mezcla F10-1 en inmersión-compresión, existe una buena correlación en el comportamiento de las mezclas ante los ensayos de caracterización.

Además, tras el extendido del tramo de prueba, se realizó un ensayo de control de macrotextura superficial en cada tramo. Los resultados de dichos ensayos fueron:

Mezclas	F10-Convencional	F10-1	F10-2	F10-3	F10-4	Límite Normativa
Profundidad media de Macrotextura	1,4 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,2 mm	1,1 mm	$\geq 1,1$ mm

Tabla 66. Resultados de los ensayos de Macrotextura.



Foto 35. Ensayo de círculo de arena para la medida de la macrotextura.

Los ensayos realizados en este sentido también verificaron la buena puesta en obra de las mezclas, cumpliendo con la normativa existente al respecto.

Días después de la puesta en servicio de las mezclas, se volvió a establecer un ensayo de control de regularidad superficial (IRI). Los resultados obtenidos en esta ocasión, a diferencia de los obtenidos sobre la mezcla existente, sí fueron satisfactorios:

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

Vía	Capa	Valores de IRI			Criterio de Aceptación	IRI Medio	Desv.
		% Obtenido	%Exigido	Cumple			
Carril Derecho	Mezcla F10-Convencional y F10-2	60,00%	50<1,8	SI	P.P.T.G. ADAR	1,577	0,567
		100%	80<2,5				
		100%	100<3,0				
Carril Izquierdo	Mezclas F10-1, F10-3 y F10-4	60,00%	50<1,8	SI	P.P.T.G. ADAR	1,643	0,267
		100%	80<2,5				
		100%	100<3,0				

Tabla 67. Resultados del ensayo IRI tras el extendido de las mezclas.

Posteriormente, a los 6 meses de la puesta en servicio de las mezclas, se repitió el ensayo como el primero de los de control a largo plazo, obteniéndose los siguientes resultados:

Vía	Capa	Valores de IRI			Criterio de Aceptación	IRI Medio	Desv.
		% Obtenido	%Exigido	Cumple			
Carril Derecho	Mezcla F10-Convencional y F10-2	60,00%	50<1,8	SI	P.P.T.G. ADAR	1,670	0,694
		100%	80<2,5				
		100%	100<3,0				
Carril Izquierdo	Mezclas F10-1, F10-3 y F10-4	80,00%	50<1,8	SI	P.P.T.G. ADAR	1,656	0,267
		100%	80<2,5				
		100%	100<3,0				

Tabla 68. Resultados del ensayo IRI tras a los seis meses del extendido de las mezclas.

Realizando un análisis comparativo entre los valores obtenidos justo después de la puesta en obra, y una vez transcurridos seis meses, tenemos que:

Carril Derecho					
Control	Valores de IRI			% Incremento	Incremento Total
	% Obtenido	%Exigido	IRI Medio		
Tras extendido	60,00%	50<1,8	1,577	-	-
	100%	80<2,5			
	100%	100<3,0			
A los 6 meses	60,00%	50<1,8	1,670	5,89%	5,89%
	100%	80<2,5			
	100%	100<3,0			
Carril Izquierdo					
Control	Valores de IRI			% Incremento	Incremento Total
	% Obtenido	%Exigido	IRI Medio		
Tras extendido	60,00%	50<1,8	1,643	-	-
	100%	80<2,5			
	100%	100<3,0			
A los 6 meses	60,00%	50<1,8	1,656	0,79%	0,79%
	100%	80<2,5			
	100%	100<3,0			

Tabla 69. Comparativa de los resultados de los ensayos IRI de las mezclas estudiadas.

Se comprueba por tanto que la regularidad superficial ha mantenido los valores iniciales, lo que denota una escasa deformación de las mezclas extendidas.

5.4.3. Análisis económico

Como conclusión a este estudio de investigación, se realiza un análisis económico del proceso de fabricación y puesta en servicio de las mezclas estudiadas. Dicho análisis engloba todos los aspectos económicos desde la recogida del residuo, hasta la puesta en obra de las mezclas fabricadas con él. Además, se realizará un análisis comparativo de los costes asociados a la puesta en servicio de cada una de las mezclas estudiadas.

En primer lugar, se llevó a cabo el estudio económico del precio de los materiales utilizados en la fabricación de las mezclas:

**Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la
Fabricación de Mezclas Bituminosas**

Material	Coste (Incluido Transporte a planta)
Árido calizo (distancia 32 km)	5,23 €/tn
Árido ofítico suministrado (distancia 155 km)	18,42 €/tn
Residuo Silestone® *	8,7 €/tn
Cemento	65 €/tn
Betún BM3b	461 €/tn

Tabla 70. Costes de las materias primas de fabricación de la mezcla.

* material sin coste en obra, coste asociado solo al machaqueo.

Como podemos observar, el ahorro debido a la sustitución del árido grueso por residuos de Silestone® sería en torno a un 50% para esta fracción. Si bien, en la fracción fina no ocurre lo mismo, puesto que el precio de la tonelada de árido calizo es más barato que el coste de tratamiento del residuo para su incorporación a las mezclas.

Al utilizarse la misma maquinaria, mismo personal, y mismas temperaturas de fabricación y puesta en obra, los gastos asociados en estos términos son los mismos para todas las mezclas estudiadas. Así, el conjunto de gastos concernientes a la puesta en servicio de las mezclas sería:

Fabricación y Gestión de Acopio	
Planta Intrame 260, báscula, compresor, grupos y personal	2,1 €/tn
2 palas en acopio	0,43 €/tn
camión filler	0,15 €/tn
vigilancia	0,1 €/tn
consumo fuel	1,1 €/tn
consumo gasoil	0,6 €/tn
personal auxiliar	0,6 €/tn
TOTAL	5,08 €/tn

Tabla 71. Costes de fabricación y gestión de acopio.

Transporte	
Distancia media 3 km	1,4 €/tn

Tabla 72. Costes de transporte.

Extendido	
Maquinaria y personal extendido	2,8 €/tn
Emulsión ECR-1m: 292 €/tn, con dotación 0,5 kg/m ²	1,8 €/tn
Vigilancia:	0,1 €/tn
Consumo gasoil y butano	0,2 €/tn
TOTAL	4,9 €/tn

Tabla 73. Costes de extendido.

En base a este conjunto de valores, se calculan los precios de ejecución de cada una de las mezclas estudiadas:

Mezcla	6/12 Ofita (18,42 €/tn)	6/12 Silestone® (8,7 €/tn)	0/3 Caliza (5,23 €/tn)	0/3 Silestone® (8,7 €/tn)	Cemento (65 €/tn)	Betún BM3b (461 €/tn)	Total Mezcla	Fabricación, Transporte y Extendido	TOTAL
F10-Convencional	70%	0%	22,9%	0%	7%	5% s/a	41,69 €/tn	11,38 €/tn	53,07 €/tn
F10-1	33%	34%	14%	14%	5%	5% s/a	37,29 €/tn	11,38 €/tn	48,67 €/tn
F10-2	34%	35%	27%	0%	4%	5,3% s/a	37,75 €/tn	11,38 €/tn	49,13 €/tn
F10-3	0%	70%	25%	0%	5%	5,3% s/a	35,08 €/tn	11,38 €/tn	46,46 €/tn
F10-4	0%	70%	0%	23%	7%	5,5% s/a	37,99 €/tn	11,38 €/tn	49,37 €/tn

Tabla 74. Costes totales de la puesta en obra de las mezclas.

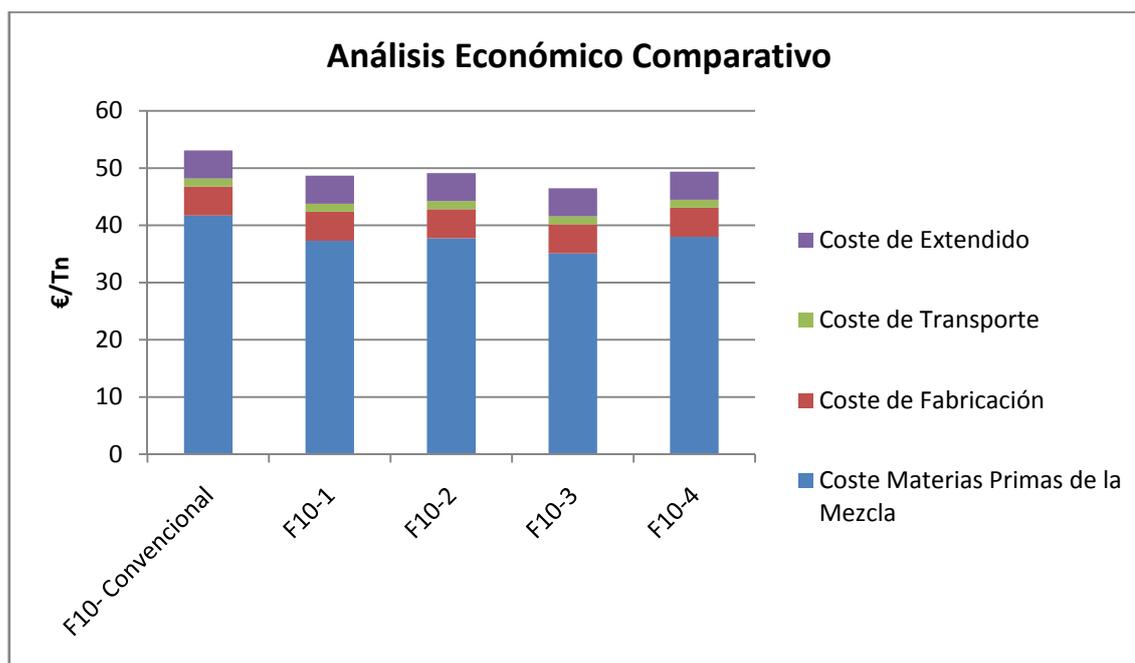


Gráfico 36. Análisis comparativos de los costes de las mezclas estudiadas.

Los resultados obtenidos muestran un ahorro económico en la utilización de cualquiera de las mezclas con residuo Silestone® en detrimento de la mezcla convencional. Como se puede apreciar en el gráfico, los mayores costes de puesta en servicio de una mezcla bituminosa repercuten sobre las materias primas utilizadas en

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

su fabricación. Así, la utilización de unas u otras será clave en el presupuesto final del proyecto. En este sentido, el verdadero ahorro económico de las mezclas estudiadas viene vinculado a la sustitución de la fracción gruesa del árido por los residuos de Silestone®, lo cual supone en el caso más favorable (sustitución del 100% de las ofitas por residuos de Silestone®) un ahorro final en la mezcla en torno al 14% (unos 7 € por tonelada).

En base a estos resultados podemos concluir que la utilización de residuos de Silestone® en la fabricación de mezclas bituminosas para la construcción de firmes, además de ser técnicamente viable, es económicamente rentable, y por tanto se muestra como una actividad eficiente de valorización de estos residuos.

6. CONCLUSIONES

6.1. Introducción

El objetivo general de la presente investigación era estudiar la posibilidad de reutilización de los residuos procedentes de la industria de Silestone® como áridos en la fabricación de mezclas bituminosas para la construcción de firmes de carreteras. Para ello, se establecieron una serie de objetivos principales y secundarios a cumplir, que permitieron guiar el desarrollo de todo el proceso de estudio. Dichos objetivos quedaron plasmados en la definición de una metodología de trabajo que posibilitó la estructuración de la investigación en diferentes etapas.

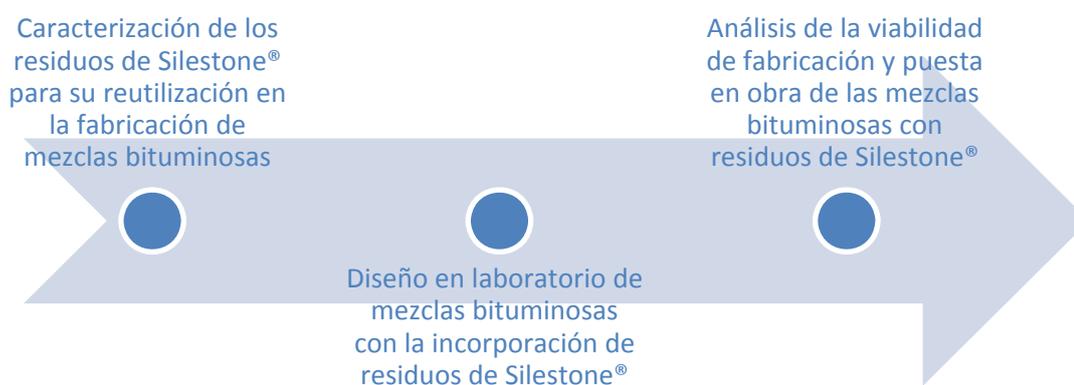


Gráfico 37. Proceso de la Investigación.

Durante el desarrollo de este capítulo se llevará a cabo un primer análisis a modo resumen del desarrollo de los trabajos realizados durante la investigación, así como de los resultados obtenidos en éstos, y posteriormente, se terminará con la exposición de las principales conclusiones extraídas del estudio realizado.

6.2. Caracterización de los residuos de Silestone® para su reutilización en la fabricación de mezclas bituminosas

El primer paso a seguir para poder reutilizar los residuos de Silestone® en la fabricación de mezclas bituminosas consiste en la validación del cumplimiento de todas las exigencias establecidas por la normativa concerniente a este tema. Tras someter el residuo a un proceso de machaqueo previo para reducirlos a un tamaño adecuado de aplicación, se realizaron los ensayos prescritos por el PG-3 para la caracterización de las propiedades de los áridos (forma, resistencia, limpieza)

El cómputo global de los resultados obtenidos en estos ensayos mostraron características muy favorables, propias de áridos naturales tan empleados en la construcción de carreteras como las ofitas o las calizas. Así, entre otros resultados, han de destacarse el buen comportamiento del residuo ante los ensayos de resistencia a la fragmentación (coeficiente de desgaste Los Ángeles) y resistencia al pulimento (coeficiente de pulimento acelerado), cuyos valores superaron las exigencias más altas establecidas por la normativa. Ambos ensayos pusieron de manifiesto la dureza del material, propiedad que resulta fundamental en un árido de carretera. Por otra parte, la procedencia industrial del residuo hace que su composición sea bastante homogénea y carente de impurezas, lo que se tradujo en un buen comportamiento ante los ensayos de equivalente de arena y coeficiente de limpieza.

En cuanto a las características propias del residuo, cabe destacar la baja densidad que éste presenta en comparación con los áridos naturales de común empleo en carreteras (en torno a un 24% menos que las ofitas, o a un 17% menos que las calizas), así como la buena adhesividad que presenta con el ligante, obteniendo valores superiores que los de los áridos naturales.

Respecto a la posible susceptibilidad del residuo ante las altas temperaturas, los ensayos realizados pusieron de manifiesto que las temperaturas de fabricación y

puesta en obra de las mezclas bituminosas no producen ningún tipo de alteración en las propiedades del material.

6.3. Diseño en laboratorio de mezclas bituminosas con la incorporación de residuos de Silestone®

Una vez verificada la aptitud del residuo para poder ser reutilizado en la fabricación de mezclas bituminosas, se procedió al diseño de éstas en laboratorio. Para ello, se estudiaron cuatro fórmulas de trabajo en las que se incorporaban residuos de Silestone® en diferentes proporciones como sustitutivos de los áridos naturales, y una fórmula de trabajo convencional, únicamente compuesta por áridos comunes. Esta fase de diseño se llevó a cabo en base a los ensayos prescritos para esta tarea por el PG-3 (Marshall, Inmersión-Compresión y Pista), los cuales se repitieron para cada una de las cinco fórmulas de trabajo estudiadas. Los resultados obtenidos en dichos ensayos cumplen con las especificaciones establecidas por la normativa, poniendo de manifiesto la posibilidad de utilizar mezclas fabricadas con residuos de Silestone® para la construcción de capas de rodadura de firmes de carreteras.

Además del control del cumplimiento de estos valores límite, en cada uno de los ensayos realizados se llevó a cabo un análisis de los resultados obtenidos:

- **Marshall (NLT 159):**

En primer lugar podemos decir que este ensayo muestra una clara tendencia en el comportamiento de las mezclas que contienen residuos de Silestone®, presentando en los parámetros medidos curvas con la misma forma, que varían únicamente en los valores obtenidos, debido a que poseen diferentes cantidades de residuo. Destacar que la forma de estas curvas es mucho más aplanada en el caso de las mezclas con residuos que en la convencional.

Por otra parte, se observa que a medida que se incrementa el contenido de residuo en la mezcla, disminuye la densidad Marshall y aumentan el contenido

Análisis de la Reutilización de Residuos procedentes de la Industria de Silestone® en la Fabricación de Mezclas Bituminosas

de huecos en mezcla, la cantidad de ligante requerida, y los valores de estabilidad Marshall.

Residuo Silestone® en mezcla	Densidad Marshall de la mezcla	% de Huecos/Mezcla	Estabilidad Marshall	% Óptimo de ligante
Aumenta	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Aumenta

Tabla 75. Tendencia del aumento del residuo en mezcla ante el ensayo Marshall.

Estos resultados vienen a contrastar los valores obtenidos durante el proceso de caracterización del residuo:

- La disminución de la densidad Marshall del residuo con respecto a los áridos convencionales, repercute en la disminución de la densidad final de mezcla.
- El incremento de los valores de estabilidad pueden ser debidos a la mejor adhesividad residuo-ligante que presentan los residuos frente a los áridos naturales, la cual implica una mejora de la cohesión de la mezcla.
- La mayor absorción presentada por los residuos frente a los áridos naturales, muestran la necesidad aumentar la cantidad de betún para garantizar la envuelta que garantice el buen comportamiento de la mezcla.

- **Inmersión-Compresión (NLT 162):**

Por su parte, el ensayo de inmersión-compresión mostró que conforme se aumenta la cantidad de residuo en la mezcla, la densidad de las probetas fabricadas y los valores de resistencia a compresión disminuyen, mientras que los de resistencia conservada aumentan, presentando un mejor comportamiento ante la acción del agua.

Residuo Silestone® en mezcla	Densidad de las probetas	Resistencia a Compresión simple	Resistencia Conservada
Aumenta	Disminuye	Disminuye	Aumenta

Tabla 76. Tendencia del aumento del residuo en mezcla ante el ensayo de inmersión-compresión.

El hecho de que la densidad de las probetas disminuya con el aumento del contenido de residuo vuelve a demostrar la influencia de la densidad de los áridos sobre el conjunto de la mezcla. La disminución de la resistencia a compresión se hace más acusada cuando la proporción de árido grueso (ofitas) sustituido es mayor, este hecho es debido a que esta fracción es la que proporciona mayor resistencia a compresión en las mezclas, y el árido ofítico tiene mayor resistencia que el residuo Silestone®. Por su parte, la mejora en el comportamiento ante la acción del agua de las mezclas a medida que aumenta el contenido de residuo incorporado (sobre todo cuando existe parte de residuo en la fracción fina de la mezcla), puede ser debido a la buena adhesividad betún-residuo que proporciona una cohesión interna más estable.

- **Resistencia a Deformaciones Plásticas en Pista (NLT 173):**

Los resultados obtenidos en este ensayo mostraron que a mayor cantidad de residuo incorporado en la mezcla, mayores son las deformaciones producidas. Como ocurriera con el ensayo de inmersión-compresión, la reducción del porcentaje de ofitas de la mezcla, aumenta las deformaciones plásticas producidas en ésta. Además, las velocidades de deformación obtenidas en las mezclas con residuos son sustancialmente superiores a las de la mezcla convencional. A pesar de ello, todas cumplen con los valores exigidos por el PG-3, demostrando la aptitud de las mezcla para poder ser utilizadas en la construcción de capas de rodaduras de firmes.

6.4. Análisis de la viabilidad de fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas con residuos de Silestone®

Habiendo resultado satisfactorios los diferentes ensayos realizados en laboratorio, para poder validar la posibilidad de empleo de las mezclas diseñadas, se llevó a cabo la

ejecución de un tramo de prueba. Durante esta última etapa de la investigación, se realizó un control de calidad sobre el proceso de fabricación de las mezclas, que consistió en un análisis del comportamiento del residuo en planta (amasada en blanco), así como de las características de las mezclas fabricadas (amasada de prueba). Además, se realizaron ensayos de control sobre la puesta en obra de las mezclas (se tomaron muestras durante el extendido, y se realizaron ensayos de macrotextura y regularidad superficial) y sobre su comportamiento a largo plazo (ensayo de regularidad superficial). Finalmente, se llevó a cabo un análisis económico sobre los costes de puesta en servicio de las mezclas diseñadas, que permitió determinar la viabilidad de valorización de los residuos de Silestone® en la fabricación de mezclas bituminosas.

Los ensayos de control realizados durante el proceso de fabricación de la mezcla muestran que el residuo no sufre ninguna alteración en sus propiedades durante el proceso de fabricación de ésta. Además, las características de las mezclas fabricadas en planta resultan similares a las diseñadas en laboratorio, y por tanto, validan la aptitud del proceso de fabricación.

Por otra parte, los ensayos de control sobre la puesta en obra de las mezclas comprobaron la calidad de las mezclas fabricadas. Los resultados obtenidos en los ensayos de inmersión-compresión y deformación en pista sobre las muestras de mezcla recogidas a la salida de la extendidora dieron valores muy similares a los obtenidos durante la fase de estudio en laboratorio, cumpliendo todos ellos con las exigencias de la normativa. Asimismo, los valores obtenidos tras la puesta en obra de las mezclas para los ensayos de macrotextura (círculo de arena) y regularidad superficial (IRI) también cumplen con los límites establecidos.

El primer análisis del comportamiento de las mezclas a largo plazo se llevó a cabo a los seis meses de la puesta en servicio del tramo, y consistió en una nueva medida de su regularidad superficial. Los valores de IRI obtenidos apenas variaron con respecto a la

medición realizada tras la puesta en obra, lo que denota un buen comportamiento de las mezclas diseñadas ante las deformaciones producidas por el tráfico.

Finalmente, el análisis económico de la puesta en servicio del tramo pone de manifiesto la rentabilidad de la utilización de los residuos de Silestone® en la fabricación de mezclas bituminosas. Al utilizarse la misma maquinaria y personal para la ejecución de las obras (no fue necesario modificar la maquinaria para las mezclas con residuos, lo cual ya de por sí supone una ventaja), esta rentabilidad económica viene repercutida sobre la diferencia de costes entre el residuo y los áridos naturales. A pesar de que el precio final de todas las mezclas estudiadas que contienen residuo es inferior al de la mezcla convencional, ha de matizarse que el verdadero ahorro económico se produce por la sustitución de la fracción gruesa del árido, donde el coste de las ofitas resulta en torno al doble del de los residuos de Silestone®. En el caso de la fracción fina, no ocurre lo mismo puesto que los costes de machaqueo de los residuos son superiores a los del árido calizo, y no resulta rentable su sustitución. Como dato podemos decir que la mezcla estudiada con la combinación de áridos más favorable (F10-3) resulta un 14% más económica que la mezcla convencional.

6.5. Conclusiones Finales

Tras el análisis del conjunto de resultados obtenidos durante toda la investigación, como conclusiones principales podemos citar las siguientes:

- Las propiedades mostradas por los residuos de Silestone® durante los ensayos de caracterización lo convierten en un material muy interesante para ser reutilizado como sustitutivo de áridos naturales en la fabricación de mezclas bituminosas para capas de rodadura en firmes de carretera.
- Las mezclas diseñadas en laboratorio con residuos de Silestone® como sustitutivos, totales o parciales, de áridos naturales cumplen con todas las

especificaciones exigidas por la normativa de carreteras, y por tanto son aptas para su utilización en la capa de rodadura de firmes de carretera.

- El comportamiento durante la fabricación y la puesta en servicio de las mezclas con residuos de Silestone® demuestra la viabilidad de su utilización en la construcción de carreteras.
- La fabricación y puesta en obra de las mezclas con residuos de Silestone® puede ejecutarse con la misma maquinaria de las mezclas convencionales, lo que supone una ventaja frente a otros residuos que necesitan modificaciones en la maquinaria utilizada.
- La reutilización de residuos de Silestone® en la fracción gruesa de la granulometría de la mezcla en lugar de los áridos naturales supone un ahorro económico considerable.
- La disminución de densidad mostrada por las mezclas que incorporan residuos de Silestone® suponen un ahorro económico en los costes de construcción de la carretera (menores costes en la producción y menores costes en el transporte).
- Las mezclas que incorporan residuos de Silestone® son más estables a las variaciones de betún que las mezclas convencionales. Este hecho supone una ventaja en caso de fallo en la dosificación de betún en planta, puesto que sus propiedades no variarán demasiado.
- Aunque la resistencia ofrecida es menor, el comportamiento de las mezclas con residuos de Silestone® ante la acción del agua es sustancialmente mejor que el de las mezclas convencionales.

En vista a estas conclusiones podemos terminar diciendo que la reutilización de residuos de Silestone como áridos de carreteras supone una opción seria para la valorización del material, mediante la cual, además de eliminar la producción de un residuo, se ayuda a reducir el consumo de un recurso natural cada vez más escaso.

7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La investigación aquí presentada ha permitido ofrecer una solución eficiente a las problemáticas planteadas por la generación de residuos en la industria de Silestone®, y la cada vez mayor escasez de áridos para la construcción de carreteras. A pesar de haber definido un camino muy concreto de valorización del residuo, también se han abierto nuevas puertas que pueden marcar futuras líneas de investigación en torno al tema.

Con el fin de ampliar las posibilidades de valorización de los residuos generados por esta industria, desde aquí, se sugieren algunas de estas posibles líneas de estudio:

- Estudio del comportamiento dinámico y a flexotracción de las mezclas fabricadas con residuos de Silestone®.
- Estudio de la posibilidad de reutilización de los residuos tipo lodos de Silestone® como filler en la fabricación de mezclas bituminosas.
- Estudio de la posibilidad de reutilización de los residuos de Silestone® como áridos para la fabricación de hormigones.
- Estudio de la posibilidad de reutilización de los residuos de Silestone® como áridos para capas granulares de base en carreteras.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] UMTC. Use of recycled materials and recycled products in highway construction. University of Massachusetts Transportation Center Report. UMTC- 95- 1. US, 1995.
- [2] OECD. Road Transport research: recycling strategies of roads works. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, France, 1997.
- [3] Pérez, I; Toledano, M; Gallego, J; Taibo, J. Mechanical properties of hot mix asphalt made with recycled aggregates from reclaimed construction and demolition debris. *Materiales de Construcción*, 2007. Vol. 57, 285, 17-29.
- [4] Hüseyin Akbulut; Cahit Gürer. Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. *Building and Environment*, 2007. Vol. 42, 5, 1921-1930.
- [5] Velasquez, R; Turos, M; Moon, KH; Zanko, L; Marasteanu, M .Using recycled taconite as alternative aggregate in asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 2009. 23, 3070-3078.
- [6] De Rezende, RL; De Carvalho JC. The use of quarry waste in pavement construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 2003. Vol. 39, 91-105.
- [7] Snyder, MB. Use of crushed concrete products in Minnesota pavement foundations. Minnesota Department of Transportation, St. Paul, MN, 1995.
- [8] Çetin, A. Assessment of industrial wastes on asphalt concrete pavement mixtures. M Sc Thesis, Anadolu University, Natural Science Institute, Department of Civil Engineering, Eskisehir, 1997. (In Turkish).
- [9] Putman, BJ; Amirkhanian SN. Utilization of waster fibers in stone matrix mixtures. *Resources, Conservation and Recycling*, 2004. 42: 265-275.
- [10] Bairagi, NK; Vidyadhara, HS; Ravande K. Mix desing procedure for recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 1990. Vol. 42, 4, 188-193.

- [11] Al-Sayed, M H; Madany, I D. Use of copper blasting grit waste in asphalt mixes in Bahrain. *Construction and Building Materials*, 1992. Vol. 6, No. 2, 113-116.
- [12] Su, N; Chen, J.S. Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass. *Resources, Conservation and Recycling*, 2002. No. 35, 259-274.
- [13] Anurag, K; Xiao, F; Amirkhanian, S N. Laboratory investigation of indirect tensile strength using roofing polyester waste fibers in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 2009. 23, 2035-2040.
- [14] Organisation for Economic Co-operational and Development (OECD). www.oecd.org
- [15] Unión Europea. Europa- El portal de la Unión Europea. europa.eu/index_es.htm
- [16] Instituto Nacional de Estadística (INE): “Encuestas sobre la Generación de Residuos. Año 2007”. Notas de Prensa, 29 de Julio de 2009.
- [17] Boletín Oficial del Estado (BOE). Legislación (Iberlex). www.boe.es/aeboe/consultas/bases_datos/iberlex.php
- [18]: Sherwood P T: “Alternative materials in road construction- a guide to the use of waste, recycles materials and by-product”. Telford, T. London, 1995.
- [19] Hosking, R.: “Road aggregate and skidding”. TRL State of the art review-4. HMSO,1992.
- [20] Lee, J. M.; Salgado, R.; Benal, A.; Novell, C. W.: “Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1999. Vol. 25; nº2; pag. 132-141.
- [21] Poon, C. S.; Chan, D.: “Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base”. *Construction and Building Materials*, 2006. 20; pag. 578-585.

- [22] Cadenas, J. M.; Romero, B.; Ainchil, J.: “Innovaciones en los modernos tratamientos in situ o en capas granulares de firme con empleo de residuos y subproductos como herramientas de gestión eficiente y sostenible de las infraestructuras viarias”. V Congreso Nacional de Ing. Civil. Sevilla 26, 27 y 28 de Nov. 2007.
- [23] TRL. “Development of new materials for secondary and recycled aggregates in highway infrastructure”. 2004.
- [24] FHWA. “User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction”. 1997.
- [25] European Asphalt Pavement Association (EAPA). “Asphalt in Figures 2007”. www.eapa.org
- [26] Huang, Y.; Bird, R.N.; Heidrich, O.: “A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements”. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 52; pág. 58-73.
- [27] Elvira, J.L.; Del Val, M.A.: “Los residuos sólidos y su aplicación en la construcción de carreteras”. Revista Carreteras, 1982, nº2, pág. 8-17.
- [28] Kandhal, P.S.: “Waste materials in hot mix asphalt- An overview”. National Center for Asphalt Technology (NCAT) Report nº 92-6, 1992.
- [29] Decker, D.S.: “Evaluating the use of waste materials in hot mix asphalt”. Special Report 165, National Asphalt Pavement Association, Lanham (Maryland), 1993.
- [30] Dirección General de Carreteras: “PG-4, Orden 8/2001 sobre reciclado de firmes”, Ministerio de Fomento, Ediciones Liteam, Madrid, 2004.
- [31] Dirección General de Carreteras: “Orden 21/2007 sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso”, Ministerio de Fomento, Madrid, 2007.

- [32] Booci, M.; Colagrande, S.; Montepara, A.: "PVC and PET plastics taken from solid urban waste in Bituminous Concrete". Waste Materials in Construction, 2000, pág. 186-195.
- [33] Zoorob, S.E.; Cabrera, J.G.: "Design and Construction of a road pavement using fly ash in hot rolled asphalt". Waste Materials in Construction, 1997. Pag. 149-165.
- [34] Kouda, M.: "Experimental pavement using household waste slag". Waste Management, 1996. Vol.16. nº 5/6. Pag. 461-474.
- [35] Sengoz, B.; Topal, A.: "Use of asphalt roofing shingle waste in HMA". Construction and Building Materials, 2005. 19; Pag. 337-346.
- [36] Anurag, K.; Xiao, F.; Amirkhanian, S. N.: "Laboratory investigation of indirect tensile strength using roofing polyester waste fibers in hot mix asphalt". Construction and Building Materials, 2009. 23; Pag. 2035-2040.
- [37] Dirección General de Carreteras: "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3", Ministerio de Fomento, Ediciones Liteam, Madrid, 2002.
- [38] "Instrucción de carreteras 6.1-IC Secciones de firmes", Ministerio de Fomento.
- [39] "Instrucción de Carreteras 6.3-IC de Rehabilitación de Firmes", Ministerio de Fomento Madrid.
- [40] Dirección General de Carreteras: "Orden Circular 5 bis/02 sobre las condiciones para la adición de polvo neumáticos usados en las mezclas bituminosas", Ministerio de Fomento, Madrid, 2002.
- [41] "Orden FOM/891/2004 por la que se actualizan determinados artículos del PG-3", Ministerio de Fomento, Madrid, 2004.
- [42] Dirección General de Carreteras "Orden Circular 24/2008 sobre el PG-3. Artículos 542 y 543", Madrid, 2008.

[43] Dirección General de Carreteras: “Orden Circular 21bis/2009 sobre betunes mejorados y betunes modificados de alta viscosidad con caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) y criterios a tener en cuenta para su fabricación in situ y almacenamiento en obra”, Ministerio de Fomento, Madrid, 2009.

[44] CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas: “Manual de Empleo de Caucho de Polvo de NFU en Mezclas Bituminosas”. Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente. Mayo 2007.

[45] GIASA: “Manual ICAFIR, Instrucción para el diseño de firmes en la red de carreteras de Andalucía”. Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía, 2006.

[46] GIASA: “Pliego para reciclado de capas de MBC en frío “in situ” con emulsión bituminosa”. Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía, 2004.

[47] Reyes, F.; Reyes, O.; Figueroa, A.S.: “Study of the rutting in asphalt mixtures by addition of plastic waste”. Proceedings of the International Symposium on Pavement Recycling, 2005.

[48] Selim, A.A.; Muniandy, R.; Abdelrahman, M.: “Potential use of ground tyre rubber in stone matrix asphalt (SMA)- A laboratory evaluation”. Proceedings of the International Symposium on Pavement Recycling, 2005.

[49] Sacramento County: “Report on the status of rubberized asphalt traffic noise reduction in sacramento county”. Sacramento County and Bollard & Brennan Inc. 1999.

[50] Hicks, R.G.: “Asphalt rubber design and construction guidelines- Volume 1- Design Guidelines”, 2002.

- [51] Lorenzo, C.; García, A.; Soto, J.A.; París, A.: “Reciclado en caliente con altas tasas en la provincia de Cáceres”. IV Jornada Nacional de Asefma, 25 y 26 de Marzo de 2009, Madrid.
- [52] Querol, N.; Buisson, J.; Ortiz, J.; Mañas, P.: “Mezclas Bituminosas en caliente con muy altas tasas de reciclado”. III Jornada Nacional Asefma, Madrid, 2008.
- [53] Bagampadde, U.; Wahhab, H.A.; Aiban, S.A.: “Optimization of steel slag aggregates for bituminous mixes in Saudi Arab”. J Mater Civil Eng 1998;1999: 30-5.
- [54] Wa, S.; Xue, Y.; Ye, Q.; Chen, Y.: “Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt mixtures”. Building and Environment, 2007. 42: 2580-2585.
- [55] Ahmedzade, P.; Sengoz, B.: “Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete”. Journal of Hazardous Materials, 2009; 165. 300-305.
- [56] Buisson, J.; Vergel, P.; Ortiz, J.; Romero, J. A.: “Mezclas Bituminosas discontinuas con árido siderúrgico para capas de rodadura”. III Jornada Nacional de Asefma, Madrid, 2008.
- [57] Barral, M.; Montero, M.; Navarro, J.A.; Luzurriaga, S.: “Utilización de áridos siderúrgicos de acería de horno eléctrico en capas de rodadura”. IV Jornada Nacional de Asefma, 25 y 26 de Marzo de 2009, Madrid.
- [58] Zoorob, S.E.; Suparma, L. B.: “Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregates replacement (plastiphalt)”. Cement Concrete Composites, 2000; 22: 233-242.
- [59] Qadir, A.; Inam, M.: “Use of recycled plastic waste aggregate as a partial substitution material in pavement structure”. Proceedings of the International Symposium on Pavement Recycling, 2005.

- [60] Dembricki, M.: "Connecticut towns have hit the road in an effort to reduce the flow of glass waste into landfills". Waste Age Magazine, November 1992, 87-92.
- [61] Maupin, G.W.: "Effect of glass concentration on stripping of glassphalt" Virginia Transportation Research Council. Charlottesville, Virginia. March 1998.
- [63] Nong, Y.D.; Sun, D.D.; Lai, D.: "Value added utilization of recycled concrete in hot-mix asphalt". Waste Management, 2007. 27; 294-301.
- [63] Paravithana, I.; mohajerani, A.: "Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete". Resources, Conservation and Recycling, 2006. 48; 1-12.
- [64] Shen, D.H.; Du, J.C.: "Evaluation of building materials recycling on HMA permanent deformation". Construction and Buildings Materials, 2004. 18; 391-397.
- [65] Tertre, J. I.: "Sostenibilidad en Ingeniería Civil y Reciclaje de Residuos". GERD. Curso de Construcción Sostenible y Reciclaje de Residuos. Zaragoza, abril 2009.
- [66] Hassan, H.F.: "Recycling of municipal solid waste incinerator ash in hot mix asphalt concrete". Construction and Building Materials, 2005. 19; 91-98.
- [67] Huang, C.M.; Chiu, C. T.; Li, K.C.; Yang, W. F.: "Physical and environmental properties of asphalt mixtures incinerator bottom ash". Journal of Hazardous Materials, 2006. 137; 1742-1749.
- [68] Karasahin, M.; Terzi, S.: "Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete". Construction and Building Materials, 2007. 21; pag. 617-620.
- [69] Hassan, H. F.: "Recycling of municipal solid waste incinerator ash in hot mix asphalt concrete". Construction and Building Materials, 2005. 19; Pag. 91-98.
- [70] Xue, Y.; Hou, H.; Zhu, S.; Zha, J.: "Utilization of municipal solid waste incineration ash stone mastic asphalt mixture: Pavement performance and environment impact". Construction and Building Materials, 2009. 23; Pag. 989-996.

[71] Epps, J. A.; Paulsen, G.: "Use of roofing waste in asphalt pavement mixtures: economic construction". Report nº 6-331-709-2. Center for construction materials, Civil Engineering Department, University of Nevada-Reno, 1996.

[72] Oreskovich, J. A.; Patelke, M. M.; Zanko, L. M.: "Documenting the historical use of taconite by-products as construction aggregates in Minnesota- a GIS-based compilation of applications, locations, test data, and related construction information. Technical report NRRI/TR-2007/22, Natural Resources Research Institute, University of Minnesota Duluth; 2007. 43p.

[73] Oreskovich, J. A.: "A brief history of the use of taconite aggregates in Minnesota (1950s-2007). Technical Summary Report NRRI/TR-2007/05, Natural Resources Research Institute, University of Minnesota Duluth; 2007. 8p.

[74] Al-Shayed, M. H.; Madany, I. M.; Buali, R. M.: "Use of sewage sludge ash in asphaltic paving mixes in hot regions". Construction and Building Materials, 1995. Vol. 9, nº 1, 19-23.

[75] Do, H. S.; Mun, P. H.; Keun, R. S.: "A study on engineering characteristic of asphalt concrete using filler with recycled waste lime". Waste Management, 2008. 28, 191-199.

[76] Krummenauer, K.; De Oliveira, J. J.: "Incorporation of chromium-tanned leather residue to asphalt micro-surface layer". Construction and Building Materials, 2009. 23; 574-581.

[77] Azni, I.; Katayon, S.; Ratnasamy, M.: "Stabilization and utilization of hospital waste as road and asphalt aggregate". J Mater Cycles Waste Manag, 2005. 7; 33-37.

[78] "Guideline Specification for Hot In Place Recycling". Asphalt Reclaiming and Recycling Association, 1988.

- [79] Asphalt Institute: “Asphalt Cold-Mix Recycling”, Manual Series No. 21, Lexington, Kentucky, March 1983.
- [80] “Asphalt Rubber Usage Guide”. State of California Department Transportation, Division of Engineering Services, 2003.
- [81] Rubber Pavements Association. www.rubberpavements.org
- [82] Asphalt Rubber Information. www.asphaltrubber.org
- [83] Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA). www.arra.org
- [84] National Asphalt Pavement Association (NAPA). www.hotmix.org
- [85] Asociación Mundial de la Carretera. www.piarc.org/es
- [86] Oregon DOT: Steel Slag in hot mix asphalt concret- Final Report. 2002.
- [87] TRL: Basic Oxygen steel slag as surface course aggregate: an investigation of skid resistance. TRL Report 566.
- [88] Airey, G. D.; Collop, A. C., Thom, N. H.: “Mechanical performance of asphalt mixture incorporating slag and glass secondary aggregates. In: Proceedings of Eight Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa. South Africa: Sun City, 2004.
- [89] Querol, N.; Buisson, J.; Ortiz, J.; Mañas, P.: “Mezclas Bituminosas en caliente con muy altas tasas de reciclado”. III Jornada Nacional Asefma, Madrid, 2008.
- [90] Blanco, J. M.; Cabanillas, A.; Romo, J.: “Experiencias de reciclado de firmes en la red de carreteras del estado en Cáceres”. IV Jornada Nacional de Asefma, 25 y 26 de Marzo de 2009, Madrid.
- [91] Belmonte, A. “Técnicas de Reciclado de Materiales para capas de Firme. Experiencias en la A-92”. GIASA, Jornada 20 Noviembre de 2000.
- [92] Asfaltómeros S. A. www.asfaltómeros.com

[93] Payan de Tejada, F. J.: “Aprovechamiento del polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso en la fabricación de mezclas bituminosas”. VIII Congreso Nacional de Firmes, Valladolid, Octubre de 2008.

[94] Oliver, S.: “Empleo de Escorias de Acería Eléctrica y LD”. UNESID. Curso de Construcción Sostenible y Reciclaje de Residuos. Zaragoza, abril 2009.

[95] Grupo Cosentino. www.cosentinogroup.net

[96] Dirección General de Carreteras: “Normas NLT. Ensayos de Carreteras”, Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), 2ª Edición, Madrid, 1992.

[97] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): “Manual de normas técnicas UNE-EN”. Serie Construcción. Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, Madrid, 2001.

[98] Hoja de Datos de Seguridad de Silestone®. www.cosentinogroup.net

[99] Gordillo, Jaime. Panorama general de las mezclas bituminosas. Jornada sobre caracterización y control de calidad de mezclas bituminosas. Sevilla, 2001.