



Universidade da Coruña

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL

TESIS DOCTORAL

DESARROLLO DE UN TRATAMIENTO DE ESTABILIZACIÓN SOBRE LOS
RESIDUOS DE FUEL DEL PRESTIGE. POSIBILIDADES DE ALMACENAMIENTO
DEFINITIVO DEL RESIDUO ESTABILIZADO Y POTENCIAL USO COMO
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

Doctorando:

Diego Carro López

Directores:

Dr. Jordi Delgado Martín

Dr. Fernando Martínez Abella

Resumen

El Prestige vertió 63.000 t de fuel pesado frente a las costas gallegas en una de las peores mareas negras acaecidas en Europa. Las tareas de recuperación de residuos se realizaron de manera diferente en el mar y en la costa. En el mar se recuperó una emulsión de agua y fuel, sin embargo en el litoral, dada la extensión del vertido y la necesidad de trabajo manual, el residuo producido era una mezcla de fuel, agua, arena, rocas, bolsas plásticas, herramientas de limpieza, etc. De este modo, aunque sólo se recuperaron 45.000 t de fuel, la cantidad de residuos generada fue de aproximadamente 171.000 t.

El objetivo de esta investigación es encontrar soluciones para el tratamiento y gestión del residuo generado por el vertido del Prestige. Se trata de un residuo muy heterogéneo que presenta, además, una textura líquido-viscosa. Esta última propiedad imposibilita su vertido directo por prohibición expresa de la Directiva 1999/31, de vertederos.

Las técnicas de tratamiento de un residuo tan heterogéneo son limitadas, aunque existían unas pruebas satisfactorias de aplicación de una técnica de estabilización/solidificación con cal viva. Por estas razones se planteó el tratamiento de los residuos mediante estabilización, en este sentido se ha desarrollado una metodología de estabilización que utiliza no sólo cal viva, sino también serrín de granito, un subproducto del corte de piedra. Gracias a la sustitución de parte de la cal por serrín de granito se mejora el proceso de mezcla y se abaratan significativamente los costes de estabilización. La proporción de mezcla más adecuada es una de 30 % de residuo de fuel, 35 % de cal viva y 35 % serrín de granito. Con estas proporciones se obtiene un residuo sólido de textura pulverulenta que puede ser fácilmente manipulado.

Tras el proceso de estabilización el residuo es sólido y presenta unas características geotécnicas aceptables. Además, en virtud de los ensayos de lixiviación podría recibir la clasificación de residuo no peligroso, según la legislación vigente. Por tanto, sería posible construir un vertedero para el depósito definitivo del residuo estabilizado.

Se ha considerado también la utilización del residuo estabilizado como árido para mortero de cemento. No por que el fuel mejore sus propiedades, sino como una vía para el reciclaje del residuo. En el contexto de este trabajo hemos conseguido fabricar morteros con residuo estabilizado como árido, incorporando hasta un 12 % de fuel en masa. La inclusión del fuel perjudica los parámetros resistentes, aunque mejora su resistencia al hielo-deshielo. La calidad de los morteros con fuel es aceptable para diversas aplicaciones. Esto combinado con una buena resistencia a la helada posibilitaría su utilización en elementos prefabricados no estructurales, como por ejemplo, los destinados a tráfico ligero, tales como adoquines prefabricados.

Resumo

O Prestige verteu 63.000 t de fuel pesado fronte ás costas galegas nunha das peores mareas negras acaecidas en Europa. As tarefas de recuperación de residuos realizáronse de maneira diferente no mar e na costa. No mar recuperouse unha emulsión de auga e fuel, sen embargo no litoral, dada a extensión do vertido e a necesidade de traballo manual, o residuo producido era una mestura de fuel, auga, area, rocas, bolsas plásticas, ferramentas de limpeza, etc. Deste modo, aínda que só se recuperaron 45.000 t de fuel, a cantidade de residuos xerada foi de aproximadamente 171.000 t.

O obxectivo desta investigación é encontrar solucións para o tratamento e xestión do residuo xerado polo vertido do Prestige. Trátase dun residuo moi heteroxéneo que presenta, ademais, unha textura líquido-viscosa. Esta última propiedade imposibilita o seu vertido directo por prohibición expresa da Directiva 1999/31, de vertedoiros.

As técnicas de tratamento dun residuo tan heteroxéneo son limitadas, aínda que existían unhas probas satisfactorias de aplicación de unha técnica de estabilización/solidificación con cal viva. Por estas razóns planeouse o tratamento dos residuos mediante estabilización, en este sentido desenvolveuse unha metodoloxía de estabilización que utiliza non só cal viva, senón tamén serraduras de granito, un subproduto do corte da pedra. Gracias á substitución de parte da cal por serraduras de granito mellorase o proceso de mestura e abarátanse significativamente os custos de estabilización. A proporción de mestura máis adecuada é unha de 30 % de residuo de fuel, 35 % de cal viva e 35 % serraduras de granito. Con estas proporcións obtense un residuo sólido de textura pulverulenta que pode ser facilmente manipulado.

Tralo proceso de estabilización o residuo é sólido e presenta unhas características xeotécnicas aceptables. Ademais, en virtude dos ensaios de lixiviación podería recibir a clasificación de residuo non perigoso, segundo a lexislación vixente. Por tanto, sería posible construír un vertedoiro para o depósito definitivo do residuo estabilizado.

Considerouse tamén a utilización do residuo estabilizado como árido para morteiro de cemento. Non por que o fuel mellore as súas propiedades, senón como unha vía para a reciclaxe do residuo. No contexto de este traballo temos conseguido fabricar morteiros con residuo estabilizado como árido, incorporando ata un 12 % de fuel en masa. A inclusión do fuel prexudica os parámetros resistentes, aínda que mellora a súa resistencia ó xeo-desxeo. A calidade dos morteiros con fuel é aceptable para diversas aplicacións. Isto combinado con unha boa resistencia á xeadas posibilitaría a súa utilización en elementos prefabricados non estruturais, como por exemplo, os destinados a tráfico lixeiros, tales como adoquíns prefabricados.

Summary

The tanker Prestige spilled 63,000 tonnes of heavy fuel oil off the Galician coast in one of the worst black tides ever happened in Europe. The waste recovery tasks were performed in the sea and over hundreds of kilometres of the coast. The waste fraction recovered at sea was an emulsion of water and fuel, however, on the coast, given the size of the spill and the need for manual labour, the waste produced was a mixture of fuel, water, sand, rocks, plastic bags, cleaning tools, etc. Thus, while the net amount of fuel recovered was of about 45,000 tonnes, the total amount of waste generated was about 171,000 t.

The objective of this research was to find solutions for the treatment and management of waste generated by the Prestige's oil spill, which is a very heterogeneous residue that presents also a liquid-viscous texture. Due to that, the direct disposal of oily wastes is forbidden by the Directive 1999/31, about landfilling.

The techniques for treating heterogeneous waste are limited, although there was some evidence of satisfactory implementation of a technique for stabilization/solidification with quicklime. Taking this as starting point, we developed a method of stabilization using not only quicklime, but also with granite fines, a sub-product of the dimension stone industry. The partial replacement of quicklime with granite fines improved the process of mixing and reduced significantly the costs of stabilization. The most appropriate mix proportion was 30% waste of fuel, 35% quicklime and 35% granite fines. Using these proportions makes possible to yield a solid residue of powdery texture that can be easily manipulated.

The stabilization process transforms the liquid waste into an earth-like material amenable of compaction and acceptable geotechnical properties. Furthermore, leaching tests performed with the stabilized products show that it can be classified as a non-hazardous waste according to the existing legislation. Therefore, it would be possible to construct a landfill for the deposit of the final stabilized waste.

In the research we have also considered the use of the stabilized waste as aggregate for cement mortar. The fuel does not improve the mechanical properties of the mortar and must be considered as an alternative pathway for the recycling of the waste. In the context of this work we have succeeded in manufacturing mortars including waste as aggregate, reaching up to 12% of fuel (mass). The inclusion of fuel lowers the strength parameters, while the resistance to freezing-thawing is improved. The quality of the mortars with fuel is acceptable for many applications. This, combined with good resistance to frost, opens a possible use in non-structural pre-cast elements, such as pavements used in low traffic scenarios.

Agradecimientos

El desarrollo de las actividades recogidas en la presente memoria no habría sido posible sin la cooperación de un gran número de personas, asociaciones y empresas. Sirva esta breve mención para agradecer su disposición y profesionalidad y trasladarles mi aprecio.

En primer lugar tengo que agradecer a los directores de esta tesis doctoral, *Fernando Martínez Abella* y *Jordi Delgado Martín*, su trabajo, apoyo y esfuerzo.

También es imprescindible agradecer la colaboración de las siguientes personas que de una u otra manera han hecho posible la realización de esta tesis: *Natividad Castelos*, *Tamara Costoya Rodríguez*, *Javier Fernández*, *Iago Veiga Noriega*, *Gonzalo Diéguez Sanmartín*, *Cesar Añón Teijido*, *María Recarey Buño*, *Victor Barrientos Rodríguez*, *Ana M^a Vázquez*, *Belén González Fonteboa*, *Ricardo Juncosa Rivera*, *Isabel Martínez Lage*, *Cristina Vázquez Herrero*, *Manuel Herrador Barrios*, *Miren Etxeberría Larrañaga*, *Patricia Pardo Trafach*, *Enric Vázquez i Ramonich*, *Susanna Valls i del Barrio*, *Marilda Barra Bizinotto*.

La financiación del proyecto “*Almacenamento dos residuos de fuel do Prestige e a sua reciclaxe como elemento de construción*”, que ha servido como base para la presente tesis doctoral, corresponde a la Fundación Arao. También ha colaborado de manera intensa la empresa SOGARISA, aportando muestras del fuel y sus experiencias, personalizando mi agradecimiento en la persona de *Ramón Blanco*.

Los distintos análisis y ensayos desarrollados en el transcurso del trabajo se han realizado en las siguientes instalaciones: Universidade da Coruña, Laboratorio de Ingeniería del Terreno *Gonzalo Vaamonde*, Laboratorio de Ingeniería de la Construcción *Juan Ignacio Vazquez Peña*, Laboratorio de Ciencia de Materiales, Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Enxeñaría Civil, Servicios Xerais de Apoio á Investigación y Universitat Politècnica de Catalunya (Laboratorio de Materiales de Construcción).

Los materiales empleados en el estudio han sido amablemente suministrados por las siguientes empresas y asociaciones: Sociedade Galega de Residuos Industriais, S.A. – SOGARISA, Asociación Galega de Graniteiros, Graninter, S.A., Cementos Cosmos, S.A., Compañía Española de Industrias Electroquímicas S.A. – CEDIE, BASF Chemical y Calcinor, S.A.

Asimismo, es necesario hacer constar nuestro reconocimiento por el apoyo dado a las siguientes personas: *Victor Vázquez-Portomeñe Seijas* (Fundación Arao), *José Ángel Lorenzo Ramírez* (Asociación Galega de Graniteiros), *Ramón Blanco López* (SOGARISA), *Ángel Méndez* (CEDIE), *José Luis Armayor* (CALCINOR).

Los últimos agradecimientos son más personales, y por ello los ubico en el tramo final de estas líneas. En primer lugar, destacar el apoyo que mi familia siempre me ha dado, ayudándome y animándome a progresar en mis estudios.

Otras personas de las que no me puedo olvidar son mis compañeros y amigos de la Escuela de Caminos, algunos doctorandos, otros ya doctores, que teniendo como punto de encuentro la sala de becarios, "*china-town*", me empujaron a finalizar esta tesis.

También tengo que agradecer a *Ro* que me apoyase y compartiera conmigo todos esos buenos momentos.

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. OBJETIVOS GENERALES	2
1.3. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	2

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES Y CONTEXTO

2.1. INTRODUCCIÓN	5
2.2. EL HUNDIMIENTO DEL PRESTIGE	6
2.2.1. Características técnicas del buque Prestige.....	7
2.2.2. Cronología del desastre	8
2.3. LA RECOGIDA DE LOS RESIDUOS DEL PRESTIGE	23
2.3.1. Fuel vertido	24
2.3.2. Balance de fuel del Comité Científico Asesor	24
2.3.3. Balance de fuel tras la inspección de los restos del Prestige.....	25
2.3.4. Balance de fuel del CEDRE.....	26
2.3.5. Síntesis de los balances de masa	28
2.4. CONTAMINACIÓN MARINA POR HIDROCARBUROS.....	28
2.4.1. Transporte mundial de hidrocarburos	29
2.4.2. Estadísticas mundiales de hidrocarburos vertidos.....	31
2.4.3. Principales mareas negras mundiales.....	34
2.4.4. Histórico de vertidos de fuel pesado	40
2.4.5. Localización de los vertidos de hidrocarburos en Europa.....	41
2.4.6. Transporte de hidrocarburos en puertos españoles	42
2.4.7. Localización de los accidentes marítimos en la Península Ibérica.....	44
2.4.8. Cuatro grandes mareas negras en Galicia antes del Prestige.....	45
2.4.9. Vertidos por limpieza ilegal de depósitos	51

2.5. ACTIVIDAD INVESTIGADORA ORIGINADA POR LA TRAGEDIA DEL PRESTIGE.....	51
2.5.1. Fundación Arao.....	52
2.5.2. Colaboración con la empresa Sogarisa.....	54
2.5.3. Proyectos financiados por la administración española.....	54
2.5.4. Publicaciones relacionadas con el Prestige	55

CAPÍTULO 3. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

3.1. INTRODUCCIÓN.....	59
3.2. EXPERIENCIAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS DEL PRESTIGE	61
3.2.1. Experiencias desarrolladas por el Ciemat	61
3.2.2. Experiencias desarrolladas por la Universidade de Santiago de Compostela	63
3.2.3. Experiencias desarrolladas por Sogarisa	64
3.3. TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN DE RESIDUOS.....	65
3.3.1. Principios del tratamiento de estabilización/solidificación con cemento.....	66
3.3.2. Experiencias de la Environmental Protection Agency	68
3.3.3. Experiencia Valls, de la Universitat Politècnica de Catalunya	69
3.4. ESTABILIZACIÓN DE RESIDUOS DE CRUDO	70
3.4.1. Técnicas de E/S en protocolos de gestión de residuos.	71
3.4.5. Experiencias de la empresa Bmt Cordah Limited	72
3.4.6. Experiencias de la empresa Moffatt & Nichol Engineers	74
3.5. RECICLAJE DE RESIDUOS DE HIDROCARBUROS MEDIANTE INCLUSIÓN EN MATERIALES DE BASE CEMENTICIA.....	75
3.5.1. Efecto de componentes orgánicos en materiales de base cemento.....	76
3.5.2. Reciclaje de lodos de depuradora mediante inclusión en morteros de cemento	77
3.5.3. Inclusión de aceite usado como aditivo en hormigones	77
3.5.4. Conclusión.....	78
3.6. PROTOCOLO DE GESTIÓN DE LOS RESIDUOS DE FUEL	78
3.6.1. Consideraciones generales	78
3.6.2. Jerarquización de los residuos.....	80
3.6.3. La clasificación y la separación	81
3.6.4. La minimización de residuos.....	81
3.6.5. Reducción de la contaminación secundaria.....	82

3.6.6. Preservación de la salud y la seguridad.....	83
3.6.7. Residuos generados por los distintos métodos de limpieza	83
3.6.8. Almacenamiento in situ temporal	84
3.6.9. Almacenamiento temporal, final y transporte	85
3.6.10. Reciclado y almacenamiento final de residuos petroleados	88

CAPÍTULO 4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO PRINCIPAL	93
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	94

CAPÍTULO 5. PLANIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. INTRODUCCIÓN	97
5.2. MATERIALES	98
5.2.1. Residuo de fuel del Prestige.....	98
5.2.2. Cal viva	107
5.2.3. Serrines de granito	108
5.2.4. Materiales empleados en morteros.....	112
5.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	113
5.3.1. Estabilización / solidificación	113
5.3.2. Caracterización básica.....	114
5.3.3. Caracterización geotécnica.....	114
5.3.4. Fabricación y ensayo de morteros	116

CAPÍTULO 6. PROCESO DE ESTABILIZACIÓN

6.1. INTRODUCCIÓN	121
6.2. PROCESO DE ESTABILIZACIÓN.....	121
6.2.1. Estabilización de residuo puro del Prestige.....	122
6.2.2. Experiencia a escala media con residuo impuro	128
6.2.3. Ajuste de la dosificación en residuo impuro	131
6.3. PROPIEDADES DEL RESIDUO ESTABILIZADO	132
6.3.1. Textura de los residuos estabilizados.....	133
6.3.2. Contenido de humedad.....	134

6.3.3. Densidad.....	135
6.3.4. Análisis termogravimétrico.....	136
6.4. CONCLUSIONES.....	139

CAPÍTULO 7. ALMACENAMIENTO DEFINITIVO

7.1. INTRODUCCIÓN.....	143
7.2. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....	144
7.2.1. Mezclas ensayadas	144
7.2.2. Corte directo en seco	145
7.2.3. Ensayos edométricos en seco	147
7.2.4. Estabilidad frente al calentamiento	150
7.2.5. Ensayos de compactación.....	151
7.2.6. Ensayos CBR	153
7.3. ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN	154
7.4. CONCLUSIONES.....	156

CAPÍTULO 8. RECICLAJE DEL RESIDUO DE FUEL POR INCLUSIÓN EN MORTEROS DE CEMENTO

8.1. INTRODUCCIÓN.....	157
8.2. FABRICACIÓN Y ENSAYOS DE MORTEROS.....	158
8.2.1. Ajuste inicial de dosificaciones.....	158
8.2.2. Dosificación de morteros con fuel	159
8.2.3. Ensayos sobre morteros con residuo de fuel	163
8.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SOBRE MORTEROS	164
8.3.1. Evolución de resistencias	166
8.3.2. Determinación del módulo elástico.....	169
8.3.3. Densidad, porosidad y coeficiente de absorción	169
8.3.4. Energía de compactación	171
8.3.5. Ensayos de hielo/deshielo	173
8.3.6. Ensayos de desgaste	174
8.3.7. Ensayos de lixiviación.....	176
8.3.8. Fabricación de elementos constructivos.....	177

8.4. CONCLUSIONES 178

CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES

9.1. CONCLUSIONES GENERALES 181

9.2. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS 184

 9.2.1. Proceso de estabilización 184

 9.2.2. Almacenamiento definitivo 186

 9.2.3. Reciclaje mediante fabricación de materiales de base cemento 187

9.3. TRATAMIENTO REALIZADO SOBRE LOS RESIDUOS DEL PRESTIGE POR LA EMPRESA GESTORA 189

9.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN 189

BIBLIOGRAFÍA

ANEXO A. PROPUESTA DE PLANTA PILOTO DE ESTABILIZACIÓN

ANEXO B. RESULTADOS ANALÍTICOS Y DE ENSAYO

Capítulo 1. Introducción

1.1. ANTECEDENTES

El 13 de noviembre de 2002 el buque Prestige, cargado con 77.000 t de fuel pesado, lanzó un S.O.S. cuando navegaba frente a la costa occidental gallega. El navío presentaba una brecha en el casco y había vertido una parte de su carga. En los días posteriores al accidente se llevó a cabo un controvertido plan de rescate que acabó, trágicamente, con el hundimiento del petrolero a 230 kilómetros de la costa gallega. El accidente provocó que, según estimaciones, un total de 63.000 toneladas de fuel contaminaran casi toda la costa gallega y, en menor medida, la cantábrica y la del sur de Francia.

El accidente del Prestige es uno de los vertidos de fuel pesado más graves sucedidos en Europa en los últimos años, y tuvo lugar estando aún reciente el desastre del Erika en 1999. Tristemente, este tipo de desastres afectan frecuentemente a los mares. A estos focos de contaminación puntual y de gran magnitud hay que añadir un gran número de accidentes sufridos por buques de gran envergadura que utilizan fuel pesado como combustible.

El vertido de hidrocarburos del Prestige contaminó el litoral de una manera alarmante, lo que provocó una gran respuesta social que se materializó en forma de decenas de miles de voluntarios acudiendo a las costas gallegas para colaborar en la limpieza de playas y acantilados. Dada la enorme extensión de costa a limpiar y la ingente cantidad de trabajadores, las administraciones se vieron rápidamente desbordadas, con importantes fallos de coordinación que duraron semanas. Quedó patente que Galicia no estaba preparada para una catástrofe de tal magnitud.

Esta descoordinación en la gestión de las tareas de limpieza se vio reflejada en los residuos recogidos. Se utilizaba un único contenedor para todo, incluyendo los sistemas de protección personal de los voluntarios. Además, no se realizó una clasificación de las partidas de residuo en función de su contenido en fuel, lo cual habría facilitado la gestión posterior. En resumen, en el

caso del Prestige del total de 172.000 t de residuo, sólo unas 45.000 t eran de fuel, dando un ratio de fuel/residuo total de 0,20. O lo que es lo mismo: por cada tonelada de fuel vertido se han generado cerca de 5 toneladas de residuos contaminados cuya gestión hay que resolver.

1.2. OBJETIVOS GENERALES

La presente tesis tiene como objetivo principal la búsqueda de soluciones para la gestión de los residuos de fuel del Prestige. Este residuo se compone de una emulsión de fuel, arena y agua que forman un líquido viscoso que contiene además plásticos, rocas, y muchos otros elementos espurios. Estos residuos, tal y como se encuentran, no son admisibles en vertedero por causa de su naturaleza líquida, por lo que es necesario aplicarles algún tratamiento.

En esta investigación se ha trabajado en un proceso de estabilización que permite solidificar el residuo de fuel del Prestige de forma que pueda ir a vertedero. Una vez conseguido esto se abrieron dos ramas en la investigación. Por un lado determinar la viabilidad del depósito definitivo en vertedero del residuo estabilizado y, por otro, el reciclaje del residuo estabilizado mediante su inclusión en materiales de base cemento.

1.3. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

La memoria de la tesis se compone de nueve capítulos y dos anexos, además de la correspondiente bibliografía. De todos ellos se presenta una breve descripción a continuación:

Capítulo 1. Introducción. Se realiza una aproximación a los contenidos del documento de la tesis doctoral.

Capítulo 2. Antecedentes y Contexto. En esta parte se presenta el contexto que rodea al accidente del Prestige y a la recogida de sus residuos. También se sitúa el accidente del Prestige en el contexto de los accidentes marítimos y por último, se enmarca el trabajo desarrollado dentro de la ingente actividad investigadora realizada a partir del accidente del Prestige.

Capítulo 3. Estado del Conocimiento. En este capítulo se detalla el estado del arte en el tratamiento de residuos de petróleo y fuel, centrándose en las técnicas de estabilización/solidificación. Adicionalmente se trata el reciclaje de materiales de base orgánica mediante su inclusión en materiales de base cemento, aunque en este apartado destaca la escasez de referencias. Por último, se incluyen datos sobre los protocolos de actuación en caso de contaminación marítima incidiendo en la vinculación entre estos procedimientos y las propiedades de los residuos recogidos.

Capítulo 4. Objetivos. Se exponen los objetivos que rigen el desarrollo de la investigación.

Capítulo 5. Planificación de la Investigación. En este capítulo se describen los materiales y las técnicas empleadas en el transcurso de la investigación.

Capítulo 6. Proceso de Estabilización. Se detalla el proceso de estabilización/solidificación que se ha aplicado sobre los residuos de fuel, concretando las dosificaciones y las propiedades básicas del residuo estabilizado.

Capítulo 7. Almacenamiento Definitivo. Se expone la línea de investigación que estaba destinada a determinar las posibilidades de un almacenamiento definitivo en vertedero del residuo estabilizado.

Capítulo 8. Reciclaje del residuo de fuel por inclusión en morteros de cemento. En este capítulo se presentan los resultados de la fabricación de morteros de cemento que incluyen el residuo estabilizado de fuel del Prestige.

Capítulo 9. Conclusiones. En este último apartado del documento central se desarrollan unas conclusiones generales sobre los avances realizados en la investigación, que además se detallan de manera separada en cada una de las líneas de investigación seguidas. Adicionalmente se describe brevemente el tratamiento que finalmente ha realizado la empresa gestora de los residuos del Prestige. Por último se indican las líneas futuras de investigación que surgen del presente estudio.

Anexo A. Propuesta de Planta Piloto de Estabilización. En este anexo se detalla una propuesta de planta piloto de estabilización que permitiría avanzar en la investigación del almacenamiento definitivo en vertedero.

Anexo B. Resultados Analíticos y de Ensayo. Se incluyen los resultados de todos los ensayos para completar lo expuesto en los capítulos correspondientes.

Además, en la *Bibliografía* se detallan las referencias bibliográficas y también se incluyen los enlaces web más interesantes en relación con la investigación.

Capítulo 2. Antecedentes y Contexto

2.1. INTRODUCCIÓN

El vertido provocado por el petrolero *Prestige* frente a las costas gallegas supuso una de las mayores catástrofes ecológicas acontecidas en Europa en los últimos años. Este petrolero navegaba en Noviembre de 2002 frente a la costa cuando sufrió un accidente, que le provocó una vía de agua y un vertido de parte de su carga. Dada la situación de emergencia, se desarrolló un controvertido plan de rescate que acabó, trágicamente, con el hundimiento del petrolero a 230 kilómetros de la costa gallega. El resultado fue el vertido de unas 63.000 toneladas de fuel.

El hundimiento se desarrolló en varios actos que provocaron sucesivas mareas negras que azotaron las costas gallegas, afectando a los ecosistemas marinos en un tramo de costa que abarca desde las rías Baixas hasta el cabo Ortegal. Debido a la dispersión del vertido, la falta de preparación y la práctica inexistencia de medios, la recogida de residuos no fue selectiva, multiplicándose el volumen de vertido por la inclusión de distintos materiales (agua, arena, plantas, etc) junto con el fuel.

No es ésta la primera marea negra sufrida por el litoral gallego. A lo largo de las pasadas tres décadas, Galicia se ha visto afectada por vertidos de otros cuatro grandes petroleros. Vale la pena señalar dos vertidos sucedidos en la ría de A Coruña, y que se encuentran entre los más graves de la historia: el del *Urquiola*, en 1976, de 100.000 t crudo, y el del *Mar Egeo*, en 1992, que liberó 67.000 t de petróleo.

La frecuencia de accidentes en las costas gallegas se debe a la convergencia de varias circunstancias: a) la ruta de transporte de hidrocarburos hacia el norte de Europa, que pasa frente a las costas gallegas; b) el puerto de A Coruña que da servicio a una importante refinería y, por último, c) las duras condiciones climatológicas que imperan en la costa atlántica gallega durante una buena parte del año.

La contaminación del mar por hidrocarburos es crónica, es decir, es un proceso global que supone la llegada al océano de millones de toneladas de estos productos cada año. Aunque las alarmas se centran en las mareas negras provocadas por los grandes accidentes de buques petroleros (vertido puntual), existe un aporte crónico de estas sustancias tóxicas al océano: desde ciudades, en pequeños accidentes de buques y, también, en la limpieza ilegal de sentinas y depósitos (vertido difuso).

La marea negra del Prestige provocó una fuerte respuesta social que ha desembocado en actuaciones para incrementar los medios para la lucha contra la contaminación marítima y para la mejora de los sistemas de control de forma que no se repitan episodios similares. Esto se ha materializado en un esfuerzo inversor en materia de I+D para potenciar la investigación en distintos aspectos de la contaminación marítima por hidrocarburos. Dentro de este contexto surgió un proyecto investigador financiado por la Fundación Arao y que tenía por objetivo el estudio de alternativas de gestión de los residuos de fuel del Prestige. De ese mismo estudio ha surgido también la presente tesis doctoral.

2.2. EL HUNDIMIENTO DEL PRESTIGE

El *Prestige* era un petrolero monocasco que transportaba 77.000 t de fuel pesado, un hidrocarburo muy denso empleado como combustible para barcos y centrales térmicas. El día 13 de noviembre de 2002, cuando navegaba frente a las costas gallegas, sufrió la rotura de un mamparo interior que provocó una brecha en el casco. Esto dio lugar al primer vertido de su carga, tras lo cual el buque emitió una llamada de emergencia. Después de evaluar la situación del buque, el fuerte temporal reinante y los medios de salvamento disponibles, las autoridades competentes decidieron alejar el petrolero de la costa, lo cual marcó definitivamente el desarrollo de los acontecimientos. Finalmente, el día 19 de noviembre, el *Prestige* se partió en dos y se hundió a 234 km de la costa gallega, generando una nueva marea negra. En conjunto, se vertieron unas 63.000 t de fuel que contaminaron intensamente más de 200 km de litoral, llegando incluso a la costa Cantábrica y al litoral francés. Este accidente ha sido una de las mayores catástrofes ecológicas europeas de los últimos decenios.

El proceso judicial del *Prestige* aún está en desarrollo, pues se trata de un proceso internacional muy complejo. Sin embargo, este caso se diferencia de otros por el hecho de que el Gobierno de España ha demandado a la American Bureau of Shipping (ABS) por permitir que el buque *Prestige* pudiera seguir operando pese a presentar unas condiciones de seguridad inadecuadas.

2.2.1. Características técnicas del buque *Prestige*

El buque *Prestige* era un petrolero monocasco, de 243,5 metros de eslora, 34,40 de manga y 18,7 m de calado, construido en el año 1976 por la factoría de Maizuru de los astilleros Hitachi Shipbuilding & Engineering Co. Ltd. de Japón. Su construcción se realizó siguiendo los parámetros reglamentarios de esa época y bajo la supervisión de la sociedad de clasificación American Bureau of Shipping (ABS). Era el tercer buque de una serie de seis petroleros de casco sencillo del tipo anterior a la reglamentación MARPOL de seguridad marítima. En el momento del accidente no quedaba en servicio más que éste. El buque, gracias a ciertas reformas recibidas, estaba autorizado para operar como petrolero para transporte de crudo según el esquema de “carga equilibrada hidrostáticamente” (HBL) o como petrolero para transporte de productos en la modalidad “con tanques de lastre limpio” (CBT) hasta el 11 de marzo de 2005, según la regla 13G del MARPOL.

Este buque, con un peso muerto de 81.589 t poseía un motor diesel B&W de 14.711 kilovatios de potencia, acoplado a una hélice de palas fijas que le permitía desarrollar una velocidad de 12 nudos (22,2 km/h).

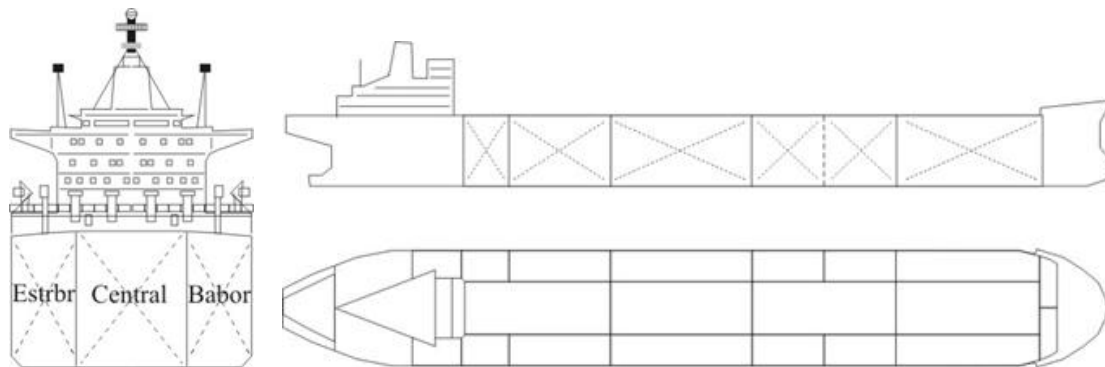


Figura 2.1. Sección transversal y longitudinal del buque *Prestige*. (Montes, 2008)

La capacidad de carga del *Prestige* giraba en torno a 14 tanques de carga con un volumen total de 100.813,36 metros cúbicos distribuidos en:

- 4 tanques centrales
- 8 tanques laterales (de los cuales 6 estaban destinados a la carga).
- 2 "slop tanks" (tanques de residuos) laterales utilizados para la carga.

Disponía, además, de una capacidad de lastre de 26.393,46 metros cúbicos repartida en:

- 2 tanques laterales de lastre (números 2 popa), más el peak de proa y el peak de popa, con un volumen total de 11.229 m³.
- A estos tanques hay que añadir los dos tanques laterales número 3 convertidos en tanques de lastre limpio (Clean Ballast Tank - CBT), en 1982, para satisfacer las prescripciones reguladas en esa época por el Convenio MARPOL.

El 7 de marzo de 2001, el buque había adoptado las disposiciones complementarias para cumplir los requerimientos de la regla 13 G del Convenio MARPOL sobre Carga Hidroestáticamente Equilibrada (HBL, Hydrostatically Balanced Loading).

El Prestige estaba equipado también con:

- Un sistema de lavado con crudo (COW - Crude Oil Washing)
- Un sistema de gas inerte
- Un circuito de calefacción de los tanques de carga
- Un programa informático de carga, de un tipo aprobado por ABS (que el Prestige no estaba obligado a llevar).

La última inspección del estado del buque tuvo lugar en el puerto de Róterdam, el 01/09/1999, en la cual se encontraron tres deficiencias: dos en los dispositivos de seguridad y otra relativa a aspectos de seguridad general. A pesar de ello, las autoridades holandesas permitieron que el barco siguiese operando con la condición de subsanar las deficiencias.

2.2.2. Cronología del desastre

El desastre del *Prestige* es una de las mayores tragedias acaecidas en las costas españolas, pero además, en este caso, el proceso de rescate tuvo una influencia importante en la magnitud del desastre ecológico y en la cantidad y propiedades de los residuos petrolados. Para comprender el desarrollo de los acontecimientos, a continuación se detallan los principales sucesos que ocurrieron desde que el petrolero *Prestige* se declaró en emergencia hasta que comenzaron las sucesivas mareas negras (La Voz de Galicia, 2003).

Emergencia del Prestige

A principios de noviembre de 2002 el petrolero Prestige, con bandera de Bahamas, cargó 77.000 t de fuel pesado en los terminales de Ventspills (Letonia), con destino a Singapur y con una escala prevista en Gibraltar.

El 13 de noviembre 2002 el buque navegaba frente a las costas gallegas cuando sufrió un fallo estructural que le provocó una brecha en el casco. A causa de esta situación, el navío lanzó una llamada de emergencia a las 15.15 horas del mismo día.

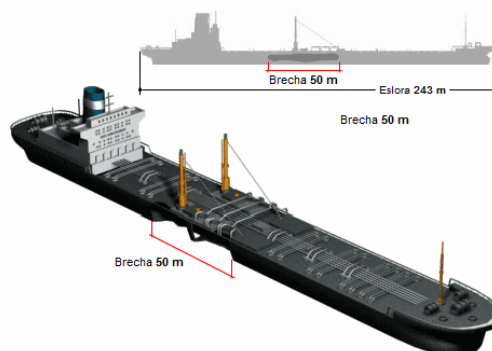


Figura 2.2. Esquema del Prestige tras sufrir una brecha en su casco. Fuente: Gráficos el País

El barco se encontraba a 50 km de Fisterra, lugar al que acudieron los servicios de salvamento. Ellos observaron que el petrolero presentaba una brecha que había afectado a dos de los tanques del petrolero, por lo que éste había vertido una parte de su carga (Figura 2.3). Además de esto, y debido a la combinación de la pérdida de carga y la entrada de agua marina, el buque presentaba una escora de 45 grados a estribor. Para corregir esta escora el capitán había ordenado el llenado de los tanques de lastre del lado contrario, lo cual aumentó significativamente las tensiones en la estructura del navío.



Figura 2.3. *El Prestige dañado perdiendo una parte de la carga. (La Voz de Galicia, 2003)*

El fuerte temporal reinante ese día dificultó las tareas de rescate de los 27 tripulantes, aunque éstos salieron indemnes. La evaluación de la situación del buque indicó que el buque corría grave riesgo de hundimiento.

Al día siguiente, 14 de noviembre, se tomó una decisión trascendental: *Trasladar el buque lo más lejos posible de las costas gallegas ante la posibilidad del hundimiento*. El tiempo no ayudaba al desarrollo seguro de esta operación, ya que se repitió el anuncio de temporal con vientos del oeste.

Tras la decisión de alejar el buque de la costa, al día siguiente, 15 de noviembre, el petrolero fue escoltado por la Armada a 120 millas de la costa, con la prohibición expresa de atracar en cualquier puerto español. Ese mismo día, una gran mancha de fuel, de unas 3.000 t, estaba ya muy cerca de la Costa da Morte. La empresa holandesa Smit Tak, que en su día reflató el submarino ruso 'Kursk', se hizo cargo del rescate del petrolero en alta mar.

El 16 de noviembre el fuel vertido alcanzó por primera vez sobre las costas gallegas, llegando a las playas de la Costa da Morte, entre Fisterra y Touriñán. Asimismo, creció el riesgo de que el buque se partiera en dos tras haberse producido una nueva grieta de unos cuarenta metros en su casco, provocada, según los informes técnicos, por la vibración de los motores. Un día después, el día 17, los vertidos ya afectaban a unos 190 kilómetros del litoral. En la Costa da Morte se hablaba ya de catástrofe ecológica y económica. Los restos de fuel se extendían desde Fisterra hasta Suevos, en Arteixo, y parte del fuel derramado alcanzó la entrada de la ría de A Coruña.

El Hundimiento del Prestige

Tras varios días de vertidos, el 19 de noviembre de 2002, el Prestige se partió en dos y se hundió a 234 km de Fisterra, en la latitud de las Islas Cíes. La estructura del navío se quebró en dos partes (Figura 2.4) llevándose por delante otros tres tanques que aún almacenaban combustible. En este vertido se liberaron aproximadamente 10.000 t de fuel. El viento reinante del suroeste y un fuerte oleaje empujaron este vertido, de nuevo, hacia las costas gallegas.



Figura 2.4. Rotura del petrolero Prestige. 19 de Noviembre de 2002. (L a Voz de Galicia, 2004)

MIÉRCOLES, 20 DE NOVIEMBRE DEL 2002 | A CORUÑA

La Voz de Galicia

ESPECTÁCULOS  EL ACTOR NORTEAMERICANO JAMES COBURN FALLECE EN LOS 74 AÑOS | 47

El buque se partió en dos a las ocho de la mañana y vertió 10.000 toneladas más de fuel

El «Prestige» se hunde y lanza otra marea negra hacia Galicia

La nueva mancha se dirige a la costa y si el viento continúa impulsándola puede llegar en dos días

Rajoy anuncia que el viernes se declarará la Zona de Emergencia y promete una primera ayuda de 27 millones de euros

El Gobierno defiende su actuación y confía en que la carga se solidifique en el fondo



La proa del petrolero fue la última parte del buque en hundirse, mientras la carga de otros tres tanques forma una mancha de petróleo.

Figura 2.5. Hundimiento del Prestige. (Portada La Voz de Galicia 19 de Diciembre de 2002)

En los días posteriores al hundimiento el vertido llegó a las costas, afectando, de este modo a 260 kilómetros de litoral. Imágenes captadas por satélite muestran que Galicia se encuentra ante una de los mayores catástrofes ecológicas de la historia de España (Figura 2.6).

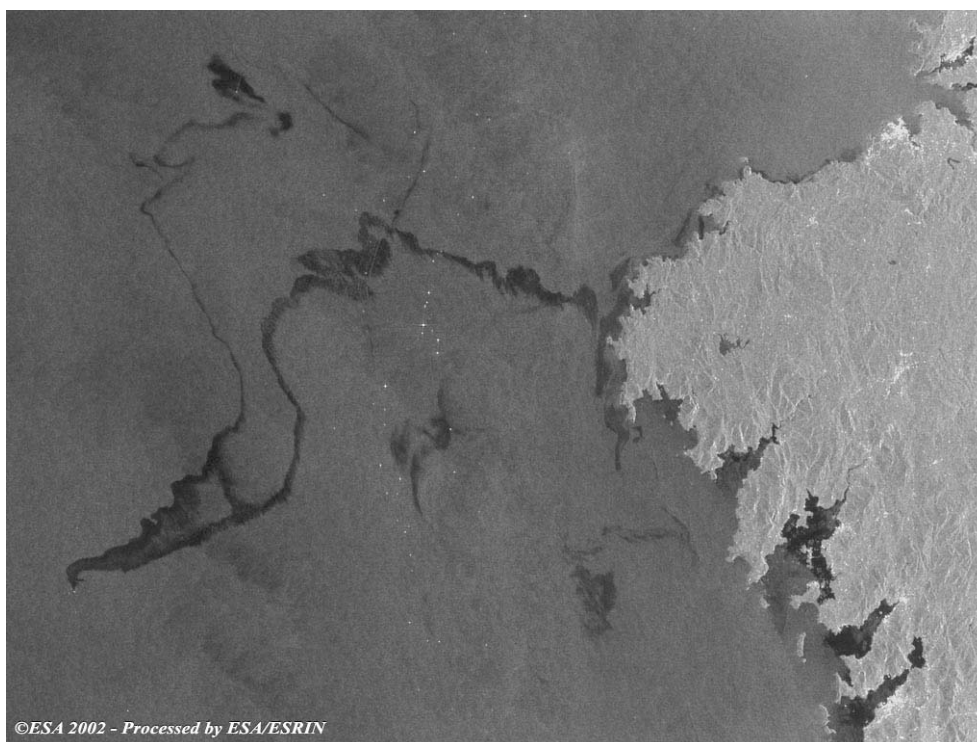


Figura 2.6. Foto por satélite del vertido de fuel del Prestige (Fuente: <http://earth.esa.int>)

En los días que siguieron al hundimiento aparecieron nuevas bolsas de fuel. Ante esta situación, los expertos temían que el combustible que permanecía en los tanques pudiera salir a la superficie. Se llegaron a hacer estimaciones de que, en los tanques, aún podían quedar más de 50.000 toneladas. Sin embargo, tras la inspección del pecio hundido (Repsol, 2004 y El País, 2005) se concluyó que en él quedaron retenidas sólo unas 16.700 toneladas, por lo que la cantidad de fuel vertido (desde la fractura del buque hasta su hundimiento) ascendía a unas 60.000 toneladas.

Desastre ecológico

El vertido del Prestige tuvo un altísimo impacto ecológico, ya que afectó a un tramo enorme de la costa gallega. Por ejemplo, el 22 de Noviembre, Medio Ambiente refuerza la protección de once espacios de alto valor natural, entre los que se encuentra el Complejo Dunar de Corrubedo. Ese mismo día la marea negra vuelve a invadir Muxía y sobrepasa también Cabo Ortegal.

Cuando el desastre ecológico ya afecta a gran parte de la costa, se acercó una nueva mancha de 50 km de longitud. A tenor de la amenaza, comienza una gran avalancha de voluntarios

que quieren ayudar a recoger el fuel, pero estos voluntarios se quejan de la falta de organización y de medios para realizar las tareas de limpieza en la costa. Esto se subsanó en días sucesivos.

Adicionalmente, se prohibió pescar en la costa gallega entre Ribeira y Cedeira, localidad esta última, a la que empezaron a llegar pequeños vertidos. Pronto se constató que las especies de los caladeros habituales se habían desplazado hacia aguas no contaminadas.

Innumerables playas y lugares de alto valor ecológico se vieron afectados por el vertido, miles de aves marinas fueron rescatadas y otras muchas murieron (Figura 2.7): el medio marino se encontraba completamente contaminado.



Figura 2.7. *Dos voluntarios intentan que una gaviota expulse el fuel que ha tragado. (Fuente: www.ecologistasenaccion.org)*

El 28 de noviembre de 2002 Galicia se encontraba en alerta máxima ante la llegada de una segunda marea negra a la costa. Se activó un protocolo de actuación urgente. Además, siete buques de succión procedentes de Holanda, Francia, Alemania, Bélgica y Reino Unido formaron una barrera costera para evitar la llegada del combustible a tierra. Al día siguiente, los peores temores se hicieron realidad y, una segunda marea negra, amenazó la Ría de Arousa, la más rica de Europa. Finalmente, el día 30, el vertido de unas 11.000 toneladas, alcanzó la costa. Ese mismo día el acuario coruñés preparó un plan de evacuación de los peces y los marineros de Arousa se prepararon para crear una barrera que minimizara la entrada de petróleo a la ría.

Nunca Más

El 1 de diciembre de 2002 decenas de miles de personas se manifiestan en Santiago bajo la proclama 'Nunca Más' mientras la mayor mancha asola, de nuevo, la Costa da Morte.

Amenaza sobre las Rías Baixas

En los primeros días de diciembre de 2002, la situación de los vientos y las corrientes, hicieron prever que el fuel podría llegar las Rías Baixas. Primero, aparecieron ‘galletas’ en Aguiño y se localizó parte del vertido cerca de la Isla de Sálvora. El fuel amenazó el único Parque Nacional de Galicia: el de las Illas Atlánticas.

Los marineros de Arousa se unieron para intentar frenar la entrada del fuel en las Rías Baixas. En esta operación participaron más de 7.000 personas y unos ochocientos barcos, sobre todo pesqueros que, empleando sus propias manos y muy pocos medios, consiguieron impedir la entrada del fuel en las Rías Baixas.



Figura 2.10. *Marineros luchando contra la marea negra que se aproxima a las Rías Baixas. (La Voz de Galicia, 2004)*

La Marea Blanca

Desde el principio de los vertidos del *Prestige*, miles de voluntarios comenzaron a acudir para colaborar en las tareas de limpieza. Pero, tras la segunda marea negra, a principios de Diciembre, esta respuesta solidaria se intensifica, llegando a contabilizarse más de 35.000 voluntarios trabajando simultáneamente en la limpieza de las playas. Estas personas acudieron desde todos los puntos de España y también de Europa constituyéndose de este modo una marea blanca de voluntarios para luchar contra la marea negra.



Figura 2.11. Recogida de residuos en Costa Cantadeira en el parque natural de las Islas Cíes. (Fuente: www.ecologistasenaccion.org)

Las tareas de recogida de los residuos del Prestige se prolongaron durante 6 meses en los que, cientos de miles de voluntarios, prestaron su colaboración en los trabajos necesarios. Cuando las mareas negras más intensas remitieron, se establecieron equipos de limpieza remunerados, seleccionados entre pescadores y mariscadores parados, que desarrollaron su labor durante 18 meses más, hasta finales de 2004.

El balance de residuos distintos del fuel y del agua, generados en las tareas de recogida y limpieza da una idea muy clara de la importancia de la planificación de dichas tareas. Como orientación, es interesante observar la Figura 2.12 y la Figura 2.13.

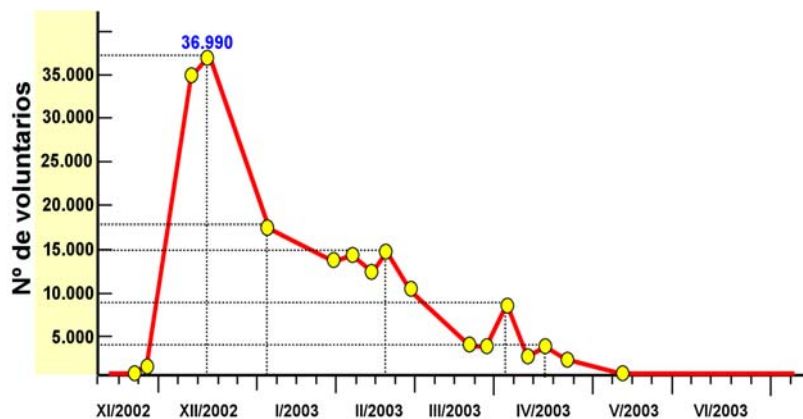


Figura 2.12. Evolución del nº de acciones voluntarias de recogida de fuel en las costas gallegas a lo largo del periodo noviembre de 2002 hasta mediados de julio de 2003. Fuente: Xunta de Galicia (2003)

Es muy difícil cuantificar el número total de personas que participaron en las tareas de limpieza de las costas gallegas. Pese a que, a partir del mes de diciembre de 2002, el seguimiento del censo de voluntariado fue relativamente preciso, es virtualmente imposible discriminar el nº de personas implicadas en el proceso. No obstante, en un informe editado por la Xunta de Galicia (2003) se ofrecen unas estadísticas muy interesantes y donde se define el concepto de “*acción voluntaria*”. Dicho concepto reconoce la realidad de que muchos voluntarios participaron en las tareas de limpieza de las playas a lo largo de más de un día por lo que lo relevante es el número de acciones de limpieza (que es a lo que se refiere el concepto) más que al número último de personas que limpiaron los arenales y acantilados.

Es de resaltar que el número de acciones voluntarias recogidas en dicho informe asciende a 327.476, un auténtico hito en la historia del voluntariado español. La evolución temporal de las acciones voluntarias se muestra en la Figura 2.12. Hay que decir que el voluntario no fue el único colectivo que participó en la limpieza de la costa. A sus efectivos cabe sumar de personal de las fuerzas armadas, de la empresa TRAGSA, así como miembros de Protección Civil.

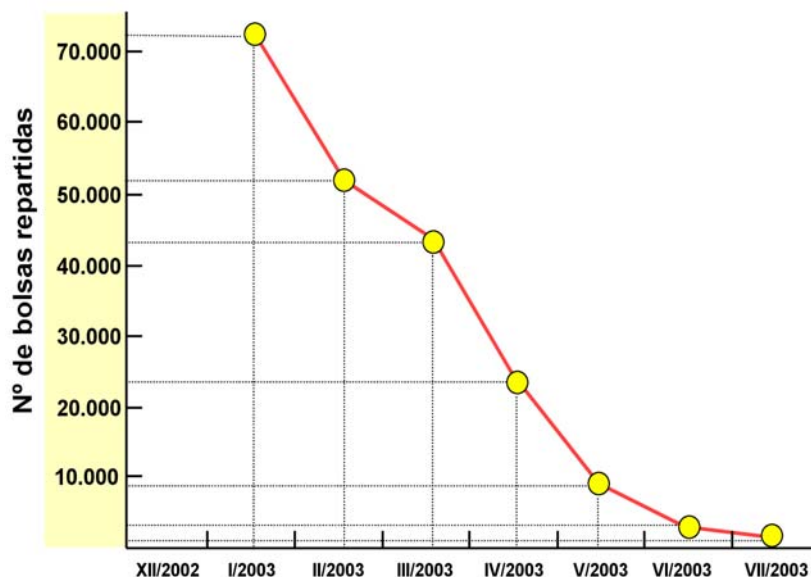


Figura 2.13. Evolución del nº de bolsas de alimento suministradas a los voluntarios en las tareas de limpieza de la costa a lo largo del periodo diciembre de 2002 hasta mediados de julio de 2003.
Fuente: Xunta de Galicia (2003)

Destacaremos ahora que tan ingente cantidad de personas desarrollando una actividad en un periodo de tiempo relativamente concentrado incrementa significativamente la masa de residuos. Para dar una idea de ello, en la Figura 2.13 mostramos una gráfica donde se recogen las unidades de bolsas de catering suministradas a los voluntarios en el mismo periodo de tiempo anterior. Asimismo, los voluntarios fueron dotados de un equipo mínimo de protección (mono de trabajo, guantes, gafas de protección, botas, herramientas, cubos, bolsas,...) que quedaron

contaminados, en mayor o menor medida, en las tareas de limpieza. Dichos elementos dan lugar a unos residuos contaminantes de origen secundario (Figura 2.14, Figura 2.15 y Figura 2.16).

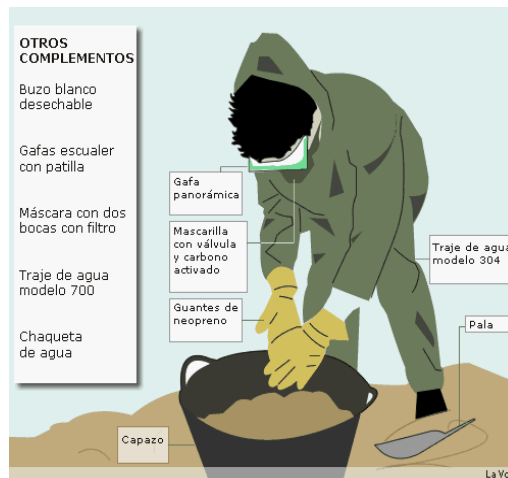


Figura 2.14. Elementos de limpieza y protección empleados por los voluntarios en las tareas de recogida de fuel del litoral gallego. (La Voz de Galicia, 2003)



Figura 2.15. Tareas de limpieza de la costa gallega. Observar la contaminación secundaria de los equipos de protección y recogida. (La Voz de Galicia, 2003)



Figura 2.16. *Voluntarios con la indumentaria de limpieza en el Paseo Marítimo de Muxia dispuestos a iniciar su labor. (La Voz de Galicia, 2003)*

A diferencia de los datos consignados con anterioridad, no se ha podido recopilar información relativa a la masa de residuos asociada a la actividad de limpieza o al inventario de material repartido y no recuperado tras las actuaciones en las playas.

Sería muy interesante realizar un balance de todo ello ya que proporcionaría unos datos de utilidad en situaciones análogas. A título de ejemplo, si suponemos que a cada una de las acciones voluntarias se le asocia un factor de generación de residuos de entre 1 y 3 kilogramos (sumando las masas aproximadas de los monos de trabajo, gafas, guantes, bolsas de comida con desperdicios, botellas de agua vacías,...) podríamos atribuir a las tareas de limpieza una masa de entre 330 y 1000 toneladas de residuos producto de la contaminación secundaria. A ellos cabría sumar la masa de las herramientas de todo tipo inutilizadas, los contenedores de basura no recuperados, etc. Es muy posible que la suma total constituya una masa no despreciable con lo que su gestión separada hubiera constituido una gran mejora por comparación a la situación sobrevenida.

Extracción del fuel en el barco hundido

Tras el accidente del Prestige, el barco se partió en dos y se hundió a 260 km de la costa gallega a una profundidad de 3.850 m, en una zona de plataforma oceánica. En un primer momento se desconocía la situación del buque hundido, ya que se necesitaban robots submarinos especiales. En cuanto se dispuso de los medios, se realizaron los primeros reconocimientos de los restos del pecio, se corroboró que aún contenía fuel y que existía peligro de que éste se liberara provocando una nueva marea negra. Tras este primer análisis de la situación se trazó un plan para controlar el riesgo que los restos del petrolero representaban (CCA, 2003).

No fue hasta febrero de 2003 cuando se abordó el problema de la recuperación del fuel contenido en el buque hundido. Los primeros estudios hacían temer que, en cualquier momento, los tanques podrían romperse por causa de la presión, ocasionando una nueva marea negra sobre el litoral gallego. Existía, por tanto, incertidumbre sobre la situación de los restos del buque, aunque se sabía con certeza que aún contenía fuel, pero no la cantidad del mismo. En consecuencia, el primer paso fue tratar de obtener información directa de la situación de los restos del petrolero, tarea muy compleja dada la elevada profundidad, por lo cual fue necesario emplear robots submarinos adaptados a altas profundidades para poder fotografiar el buque.



Figura 2.17. *Labores de inspección del Prestige por el submarino robótico Nautilo. Fuente: Ministerio de Presidencia. Campaña de inspección del Prestige 2004*

Los robots que inspeccionaron los restos del pecio no solo obtuvieron fotografías, sino que adicionalmente realizaron pruebas geofísicas para determinar la cantidad de fuel existente en los tanques de la mitad de proa del buque. Las medidas realizadas permitieron establecer que en total quedaban unas 13.800 t de fuel en los restos del buque, unas 13.089 t en la mitad de proa y unas 711 t en la mitad de popa.

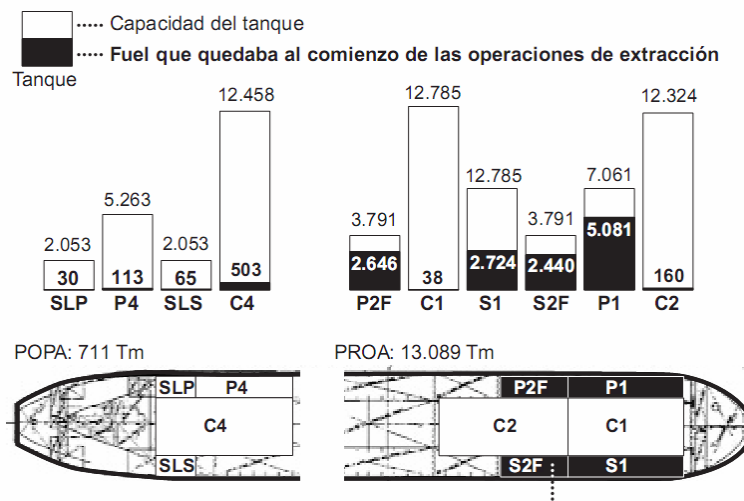


Figura 2.18. *Fuel remanente en los tanques de los restos del Prestige. (El País, 2005)*

Al poder medir directamente el volumen de fuel remanente en el barco se constató que el vertido había sido mayor de lo estimado hasta entonces, quedaban unas 14.000 t en el barco y, por tanto, el Prestige había vertido un total de 63.000 t de fuel, contradiciendo, de este modo, todas las estimaciones realizadas hasta ese momento por el Comité Científico Asesor (CCA) y el CEDRE, que consideraban que quedaban en torno a 37.000 – 40.000 t de fuel dentro del buque.

Con el objetivo de extraer el fuel que quedaba en los tanques del Prestige las autoridades españolas establecieron un convenio de colaboración con Repsol (Repsol, 2004). El plan consistía, en primer lugar, en realizar perforaciones en el casco para instalar válvulas. A éstas se acoplarían bolsas transitorias que recogerían el fuel bombeado y que, una vez llenas, se dejarían ascender por flotación hasta la superficie que después se vaciarían en un buque almacén (Figura 2.19). Existían dificultades ya que nunca se había empleado este procedimiento a una profundidad tan elevada y, además, el fuel, para ser bombeado, requería ser calentado previamente para disminuir su viscosidad (Repsol, 2004). Estas dificultades planteaban dudas sobre la viabilidad del plan de extracción. Por ello se planteó también un plan secundario, por si hiciera falta. Éste consistía en construir un sarcófago submarino de hormigón o acero que impidiese el ascenso del fuel en caso de fuga o rotura de algún tanque (CCA, 2003).



Figura 2.19. *Izquierda. Petrolero Odín, encargado de recibir el fuel extraído del Prestige. Derecha. Buque Polar Prince de inspección, encargado del bombeo del tratamiento de biorremediación. Fuente: Ministerio de Presidencia. Campaña de inspección del Prestige 2004*

Las operaciones de vaciado de los tanques se realizaron entre Junio y Octubre de 2004, recuperándose en total 13.000 t de fuel, esto es, el 95 % del total remanente, siendo imposible la eliminación total del fuel ya que se quedaba adherido a las paredes de los tanques. Para eliminar el peligro de esta pequeña cantidad de fuel remanente se decidió emplear técnicas de biorremediación. Esta técnica consiste en la siembra de bacterias que son capaces de degradar el hidrocarburo, inhibiendo de este modo su poder contaminante y su toxicidad. Para desarrollar la biorremediación se realizaron ensayos en el Instituto del Agua de la Universidad de Granada, por los que se estableció qué cepas eran las más adecuadas y los nutrientes necesarios. El tratamiento se aplicó en Octubre de 2004 y con él se inyectaron 60 toneladas de bacterias y nutrientes dentro de los restos del buque. Los expertos calculan que, transcurridos unos dos años, el petróleo remanente habría quedado degradado (Repsol, 2004).

Reflexiones

A posteriori, sin la presión de la urgencia en la toma de decisiones, siempre es sencillo emitir juicios sobre la gestión de la emergencia del Prestige. En aquel momento, la decisión adoptada fue la de alejar el petrolero de las costas españolas, lo que originó una marea negra sobre toda la costa gallega, dificultando sobremanera la recogida de los residuos.

La trayectoria del petrolero fue un tanto errática, ya que tras la emergencia declarada por el capitán, la administración española decidió alejar el petrolero con rumbo norte, y ello provocó una reacción de las autoridades francesas, dado el potencial peligro para sus costas. Tras descar-

tar el norte, se decidió llevar el buque a Cabo Verde, donde las conversaciones mantenidas por los armadores garantizaban el atraque. Sin embargo, a mitad de camino, el petrolero se partió en dos vertiendo en todo el proceso más del 80% de la carga que transportaba (Figura 2.20).



Figura 2.20. *Movimiento del fuel vertido durante el remolcado y posterior hundimiento del Prestige*

La decisión de alejar un petrolero dañado obedece a dos razones: a) evitar que el hidrocarburo vertido llegue concentrado a la costa y b) reduciría el riesgo que implican las maniobras de aproximación. Un antecedente de esta forma de actuar se dio en 1978, a 30 km de las islas Sargadas (A Coruña), cuando el petrolero Andros Patria, cargado con 220.000 toneladas de crudo, sufrió una brecha de 15 m en el casco y una explosión a causa de un golpe de mar. Tras extinguir el fuego y evaluar el estado del buque se decidió alejarlo de la costa tras haber vertido 47.000 t de petróleo, aunque en ese caso se logró remolcar el navío hasta las Islas Azores y trasvasar, en alta mar, el crudo remanente a otro buque.

Otra decisión posible que se podría haber tomado con el Prestige habría sido la de resguardarlo en alguno de los puertos gallegos, probablemente A Coruña o Ferrol. Haciendo esto, aun en el peor de los casos, se habría producido un vertido localizado que se recogería con mayor eficiencia mediante barcos succionadores en el mar. Esa circunstancia, aunque no producto de una decisión, se dio en la bahía de A Coruña, con el hundimiento del Mar Egeo. También es cierto que en estos casos un tramo de costa se ve fuertemente contaminado, aunque al tratarse de una zona localizada, se podría hacer una limpieza completa con menos recursos.

Desde la perspectiva actual podría haber sido preferible un vertido localizado en algún lugar de la costa gallega que la afección generalizada de toda ella (Figura 2.21). De este desastre se han aprendido costosas lecciones, tanto económicas como ambientales, que nadie debería olvidar.

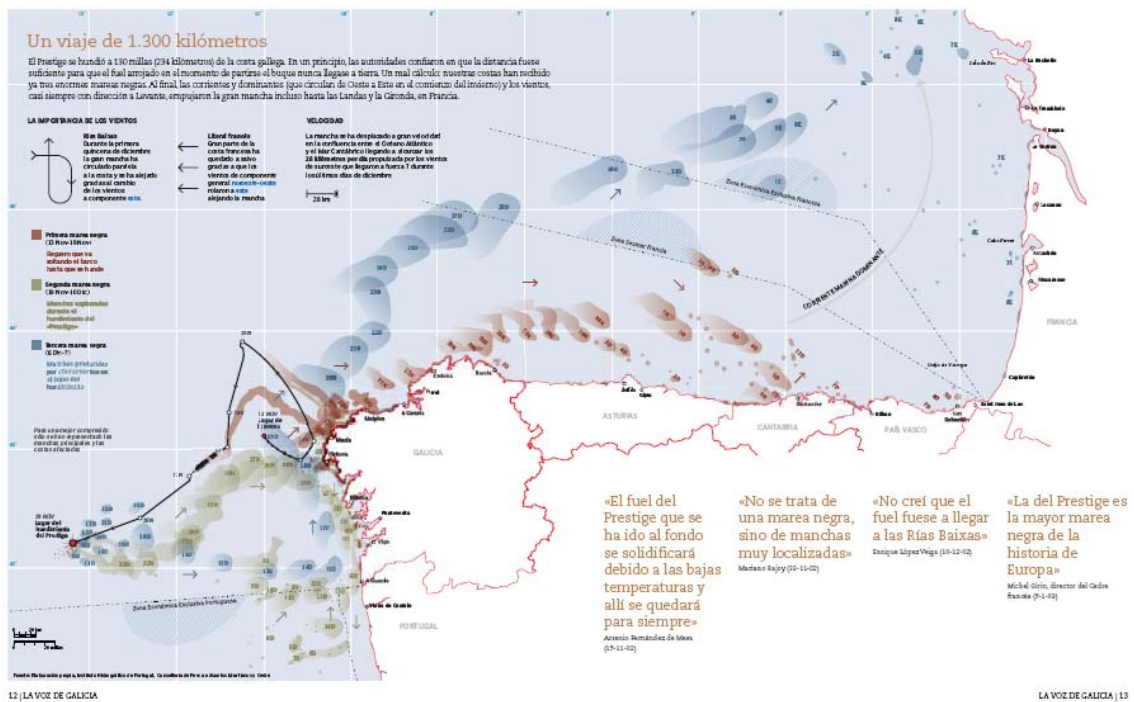


Figura 2.21. Evolución del fuel del Prestige transportado por las corrientes marinas. (L a Voz de Galicia, 2003)

Una reflexión adicional muy relevante es que en el momento en que sucedió el accidente del Prestige, no existía un protocolo claro de actuación, ni un equipo de intervención especializado y, lo peor de todo, apenas había medios materiales para luchar contra la contaminación. Y esta pésima situación se dio en unas costas que ya habían sufrido las catástrofes del Polycommander (1970), del Urquiola (1976), el Andros Patria (1978) y el Mar Egea (1992). La lección parece haberse aprendido puesto que, a partir de 2002, se ha invertido en los centros de contingencia y prevención de accidentes marítimos y, además, se han incrementado los medios, con la construcción de un centro de intervención contra la contaminación marítima en A Coruña. Sólo el tiempo dirá si estas mejoras son suficientes para protegernos de contingencias futuras.

2.3. LA RECOGIDA DE LOS RESIDUOS DEL PRESTIGE

Como ya hemos reiterado, el vertido del petrolero Prestige fue una de las peores catástrofes ecológicas de la historia europea y esto se debió a la combinación de dos factores: el tipo de hidrocarburo, fuel pesado, que es mucho más contaminante que el crudo, y, que el vertido fue muy disperso, afectando un tramo muy grande de costa gallega.

La recogida de los residuos se consiguió gracias al esfuerzo de miles de voluntarios, quienes trabajaron limpiando playas y acantilados. Paradójicamente, la gestión de esta acción solidaria provocó graves problemas, sobre todo en lo que se refiere a la gestión de los residuos generados en los procesos de limpieza de la costa. De este modo, el residuo que se almacenó incluía grandes cantidades de fuel, agua, arena y diversos materiales orgánicos.

2.3.1. Fuel vertido

El petróleo que transportaba el *Prestige* era un fuel pesado denominado fuel oil nº 6 o Bunker C. Dicho tipo de fuel es empleado para propulsar barcos con motores de gran potencia, en procesos de combustión industrial y en generadores. Se trata de un combustible barato obtenido del residuo que queda tras el proceso de destilación del crudo después de la separación de las fracciones de mayor calidad (gasolina, keroseno, gasoil, etc.) (CEDRE, 2004).

Su solubilidad en agua es muy baja y, desde un punto de vista descriptivo, se trata de un material oscuro, pegajoso y textura semisólida. Presenta un alto punto de ebullición (> 300 °C), y es poco volátil. Dichas características, resultantes de su composición (rico en hidrocarburos aromáticos policíclicos, HPA, de alto peso molecular) le diferencia de otros fueles ligeros (ricos en hidrocarburos aromáticos simples, de la serie del benceno), mucho más volátiles y de menor peso molecular.

En general, se estima que el potencial contaminante de un fuel oil nº 6 y su impacto de su vertido sobre los ecosistemas marinos y litorales es unas dos veces superior a la del crudo, que contiene una mayor proporción de volátiles.

El fuel pesado es muy persistente en el medio marino y, desde diversos puntos de vista, su eliminación resulta extremadamente compleja. Por ejemplo, al contener un elevado contenido en HPA (compuestos potencialmente cancerígenos para el hombre), su manipulación debe ser objeto de adecuadas medidas de seguridad. Además, estos hidrocarburos, muy densos, viscosos y poco volátiles, tardan mucho tiempo en degradarse, lo que contribuye a que los efectos nocivos del vertido tarden en desaparecer. El fuel del *Prestige* es, además, muy rico en compuestos de azufre (unas dos veces y media superiores a los de los petróleos normalmente utilizados en la Unión Europea) y metales pesados (Cd, Zn, Pb, Hg, V, Mo, etc.), lo cual aumenta su toxicidad (CSIC, 2002).

2.3.2. Balance de fuel del Comité Científico Asesor

El cómputo de los residuos de fuel es complejo, y no solo porque se desconoce la cantidad de fuel vertido, si no porque cuando el hidrocarburo alcanzó la costa impregnó todo lo que encontró: arena, rocas, vegetales, animales, etc. De este modo, resultaba imposible la recogida exclusiva del fuel, obteniéndose un *residuo de fuel* compuesto de fuel del *Prestige* y sustancias de diversa naturaleza existentes en la costa. En este caso concreto, el 80% del volumen de residuos son materias espurias. Desde la perspectiva del tratamiento de residuos, tiene interés diferenciar la naturaleza de las sustancias que acompañan al fuel. Por ejemplo, el residuo recogido en el agua tiene mucha agua marina, pero es relativamente sencilla su separación para obtener fuel de

nuevo. Sin embargo, la mayor parte de los residuos recogidos en el *Prestige* no son de esta índole, sino una mezcla de arena, agua, fuel y materia orgánica.

Por lo tanto para aproximarse a la gestión de los residuos es importante realizar un adecuado balance de material a fin de conocer con la mayor fiabilidad las características y propiedades del mismo. En esta sección repasaremos los datos disponibles y realizaremos un balance de masas tentativo.

El manifiesto de carga del *Prestige* indica que la masa de fuel transportada por el mismo era de 76.972 toneladas. En la Tabla 2.1 se detalla la carga inicial de cada uno de los tanques del petrolero, así como la estimación del fuel remanente en los restos del naufragio, de acuerdo con las estimaciones realizadas por el Comité Científico Asesor (CCA, 2003).

Tabla 2.1. *Estimación del contenido de fuel remanente en los tanques del buque Prestige, de acuerdo con las estimaciones realizadas por el CCA. Fuente: (CCA, 2003)*

Tanque	Carga Inicial en los Tanques (toneladas)	Fuel Remanente (toneladas)
1E	6.710	5.013
1B	6.603	4.750
1C	6.841	5.935
2C	11.768	8.779
2BPr	3.588	3.588
2EPr	3.648	3.307
Sub Total Proa	39.158	31.841
4C	11.921	2.391
4B	5.059	200
5B	1.980	1.216
5E	1.970	1.869
Sub Total Popa	20.930	5.676
Total	60.088	37.517

A los valores iniciales anteriormente consignados cabe sumar las 16.884 toneladas que llenaban los tanques 3C y 4E y que fueron vertidas al mar antes del hundimiento. Así, de acuerdo con estos datos, la masa total de fuel vertida al mar habría sido de 39.455 toneladas.

2.3.3. Balance de fuel tras la inspección de los restos del *Prestige*

Tras el hundimiento del *Prestige*, se realizó una intensa labor para recuperar los restos de fuel que quedaban entre los restos. Las medidas realizadas sobre los tanques del buque permitieron establecer que en total quedaban unas 13.700 t de fuel, unas 13.089 t en la mitad de proa y unas 711 t en la mitad de popa (Repsol, 2004 y El País, 2005).

Al poder medir directamente el volumen de fuel remanente en el barco se constató que el vertido había sido mayor de lo estimado hasta entonces, y que, por tanto, en la marea negra del Prestige habían sido vertidas al océano un total de 63.000 t de fuel de las 76.973 t. Este dato contradice las estimaciones realizadas hasta ese momento en base a los residuos recogidos, que consideraban que el vertido había sido de unas 40.000 t. Con estos datos se actualizaron las estimaciones.

2.3.4. Balance de fuel del CEDRE

El CEDRE, uno de los organismos más relevantes en la investigación sobre la lucha contra la contaminación marítima, ha desarrollado un balance de los residuos recogidos en todo el litoral portugués, español y francés. La Figura 2.22 presenta estos resultados en forma del volumen de residuos recogido en la costa, así como las cantidades de fuel recuperados en el mar (CEDRE, 2004). Dicha estimación procede de las autoridades responsables de la lucha contra el vertido en esos tres países y los datos han sido discutidos en el seno de reuniones periódicas tripartitas España/Francia/Portugal y avalados por los investigadores y técnicos involucrados.

Desde nuestro punto de vista, el balance, aunque aproximado, es indicativo de dos circunstancias muy significativas:

- Por comparación con vertidos anteriores, la tecnología disponible ha permitido la recuperación en alta mar de una fracción de fuel muy significativa. Si en el pasado la fracción de fuel puro recuperado del agua apenas si alcanzaba la décima parte del total recuperado, en este caso ha sido del 49 %. Esto se ha debido en gran medida a la labor de los pesqueros. Vale la pena indicar también que el fuel recuperado del mar está en buena parte emulsionado con agua por lo que, para la realización del pertinente balance de masas de fuel, del porcentaje de tonelaje total debe serle deducida la fracción de agua emulsionada.
- La mayor parte de los residuos generados proceden de las tareas de limpieza del litoral puesto que, si bien las masas totales de fuel puro recogidas en el mar y en tierra serían similares, en las tareas de limpieza en tierra se incorporan al fuel una gran cantidad de materiales contaminados. Así, podemos ver que en Galicia se recuperaron en torno a 70.900 toneladas de residuos, de las cuales aproximadamente el 20 % era fuel puro, correspondiendo el resto a distintos materiales (agua, arena, rocas, plásticos, trajes y otro material del protección, herramientas de limpieza, restos vegetales, contenedores de recogida,...).

Dichas observaciones permiten establecer unas conclusiones muy importantes:

- La lucha contra la contaminación por vertido de hidrocarburos en el océano debe ser acometida, fundamentalmente, en el propio océano.

- Las actuaciones de limpieza y retirada de hidrocarburos en situaciones de marea negra deben realizarse de acuerdo con un estricto protocolo en el que la separación y minimización de residuos sea uno de los ejes principales.

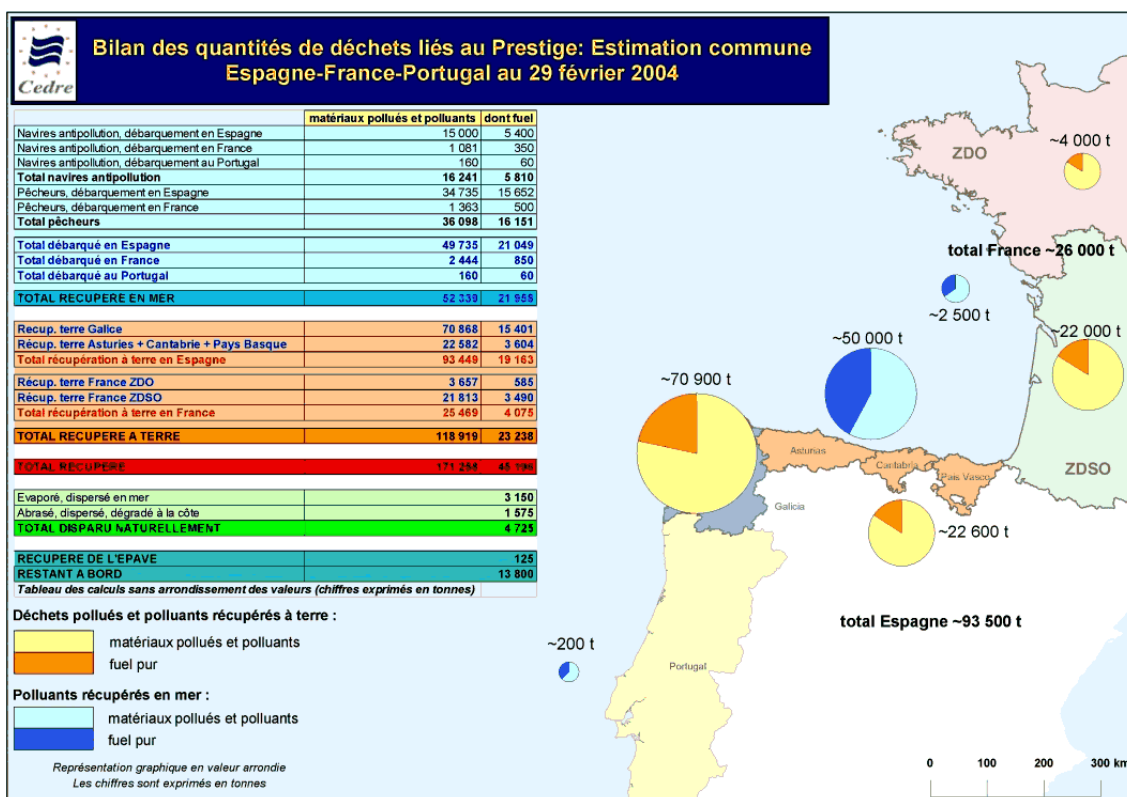


Figura 2.22. Balance de los residuos (en toneladas) ligados al hundimiento del petrolero Prestige, de acuerdo con una estimación conjunta de los gobiernos español, portugués y francés en febrero de 2004. (CEDRE, 2004)

A fin de comparar la masa de fuel recuperada en los distintos escenarios de actuación con la cantidad tentativamente estimada en el anterior epígrafe, hemos construido la Tabla 2.2, tomando como base los datos ilustrados por la Figura 2.22.

Tabla 2.2. Estimación de la masa de fuel (en toneladas) recuperada tras el hundimiento del Prestige en los distintos escenarios contaminados. Fuente: CEDRE (2003) y cálculos propios.

Escenario de Actuación	Masa Total de Residuos (t)	Masa de Fuel Puro (t)	% de Fuel Puro
Costa de Galicia	70.868	15.401	21,7
Costa Cantábrica	22.582	3.604	16,0
Costa Francesa	25.469	4.075	16,0
Costa Portuguesa	160	60	37,5
Total recupero en tierra	118.919	23.236	19,5
Navíos anticontaminación	16.241	5.810	35,8
Pesqueros	36.098	16.151	44,7

Escenario de Actuación	Masa Total de Residuos (t)	Masa de Fuel Puro (t)	% de Fuel Puro
Total recuperado en el mar	52.339	21.955	41,9
TOTAL RECUPERADO	171.258	45.191	26,4
DISPERSADO EN EL MAR		4.725	
RESTANTE A BORDO		13.800	

Es interesante destacar que esta aproximación se asemeja en algunos aspectos con el valor de fuel vertido por el *Prestige* obtenido a partir de los datos del Comité Científico Asesor (CCA, 2003). Sin embargo, este balance incluye todos los residuos y también la información obtenida del petrolero hundido.

2.3.5. Síntesis de los balances de masa

Desde la perspectiva del tratamiento de los residuos de fuel es posible señalar varios hechos. Se puede comparar la masa vertida, unas 23.200 t que llegaron a la playa, con el total de residuos generados, más de 119.000 toneladas. Si se calcula el ratio residuo/fuel se comprueba que existe un factor de incremento de masa superior a 5. Es decir, por cada tonelada de fuel vertido se han generado cerca de 5 toneladas de residuos contaminados cuya gestión hay que garantizar. En el caso del fuel recogido en el mar, la proporción es diferente, en torno a un 40 % de fuel. Esto se debe a que la mayor parte del agua que acompaña al fuel recogido está emulsionada con éste, además si se admite que la proporción entre fuel y agua de los residuos retirados de la costa es aproximadamente igual a la del fuel recuperado del mar (relación fuel/agua = 40/60, expresado como porcentaje en peso) resulta lo siguiente:

- Del total de residuos recuperados de la costa gallega (~70.900 toneladas), unas 15.400 toneladas de ellas serían de fuel mientras que ~23.000 sería agua.
- Con estos datos es posible calcular que la masa de material incorporado a la emulsión fuel/agua en las tareas de recogida en el litoral gallega fue de unas 32.000 toneladas. Es decir, por cada tonelada de fuel vertido se generaron en torno a 2.1 toneladas de residuos distintos del agua de mar de material de diverso origen (principalmente arena de playa, plásticos, restos vegetales, etc.).

2.4. CONTAMINACIÓN MARINA POR HIDROCARBUROS

La contaminación crónica por hidrocarburos (crudo, fuel, gasolina, aceites, etc.) es un problema global que supone la llegada al océano de millones de toneladas de estos productos cada año. Aunque las alarmas se han centrado en las mareas negras provocadas por los grandes accidentes de buques petroleros, el vertido crónico de estas sustancias, es decir, el resultante del tráfico ma-

rítimo ordinario, es tres veces superior. De hecho, los llamados “sentinazos” (limpieza ilegal de los depósitos de los buques en alta mar) y los pequeños accidentes a bordo o en puerto son la principal fuente de contaminación por hidrocarburos desde buques al mar.

Cada año se producen unos 300 accidentes de buques petroleros que provocan vertidos que suman entre las 240.000 y las 960.000 toneladas. A ello cabe sumar los vertidos ilegales y las operaciones rutinarias de los buques (principalmente los “sentinazos”) que añadirían entre 660.000 y 2,5 millones de toneladas de hidrocarburos adicionales. Ello equivale a entre 8 y 33 veces el vertido realizado por el buque Prestige.

2.4.1. Transporte mundial de hidrocarburos

El transporte marítimo mundial de crudo mueve entre 1.500 y 1.800 millones de toneladas al año, lo que supone la tercera parte del movimiento total de mercancías por mar. La Unión Europea y Estados Unidos son los mayores destinatarios de estos cargamentos, ya que entre ambas regiones reciben más de la mitad del total. En el caso de la Unión Europea, el monto total puede llegar a ser de cerca de 500 millones de toneladas de crudo, a los que habría que añadir los transportes dentro de la propia UE de este mismo crudo o de sus productos refinados (fuel, gasoil, gasolina, nafta, benceno, etc.), lo que puede llegar a suponer el movimiento anual de más de 800 millones de toneladas de hidrocarburos en Europa.

Desde la perspectiva de la contaminación marítima por hidrocarburos, existe un factor muy importante que afecta a España: la principal ruta marítima de abastecimiento de Europa pasa frente a las costas españolas. Esta ruta parte de Oriente medio (Irak, Irán, Arabia Saudí, etc) y de Asia (Dubai, Malasia, Indonesia, etc) atravesando el canal de Suez para atravesar el Mediterráneo, rodear España, y dirigiéndose al Canal de la Mancha alcanzar los puertos de destino, normalmente en el norte de Europa. Esto aumenta el riesgo para las costas españolas que se incrementa en el caso de Galicia, ya que, a la ruta del Mediterráneo, se le unen las provenientes de Sudamérica, y que comparten el mismo destino, el norte de Europa.

En la Figura 2.23 se representan las principales líneas mundiales de transporte de petróleo concretándolas para la región europea. En este gráfico además se pueden ver los lugares donde han ocurrido las 100 mayores mareas negras del mundo en cantidad vertida. Como es lógico, existe una fuerte correlación entre el volumen de tráfico de hidrocarburos con el número de accidentes de petroleros.

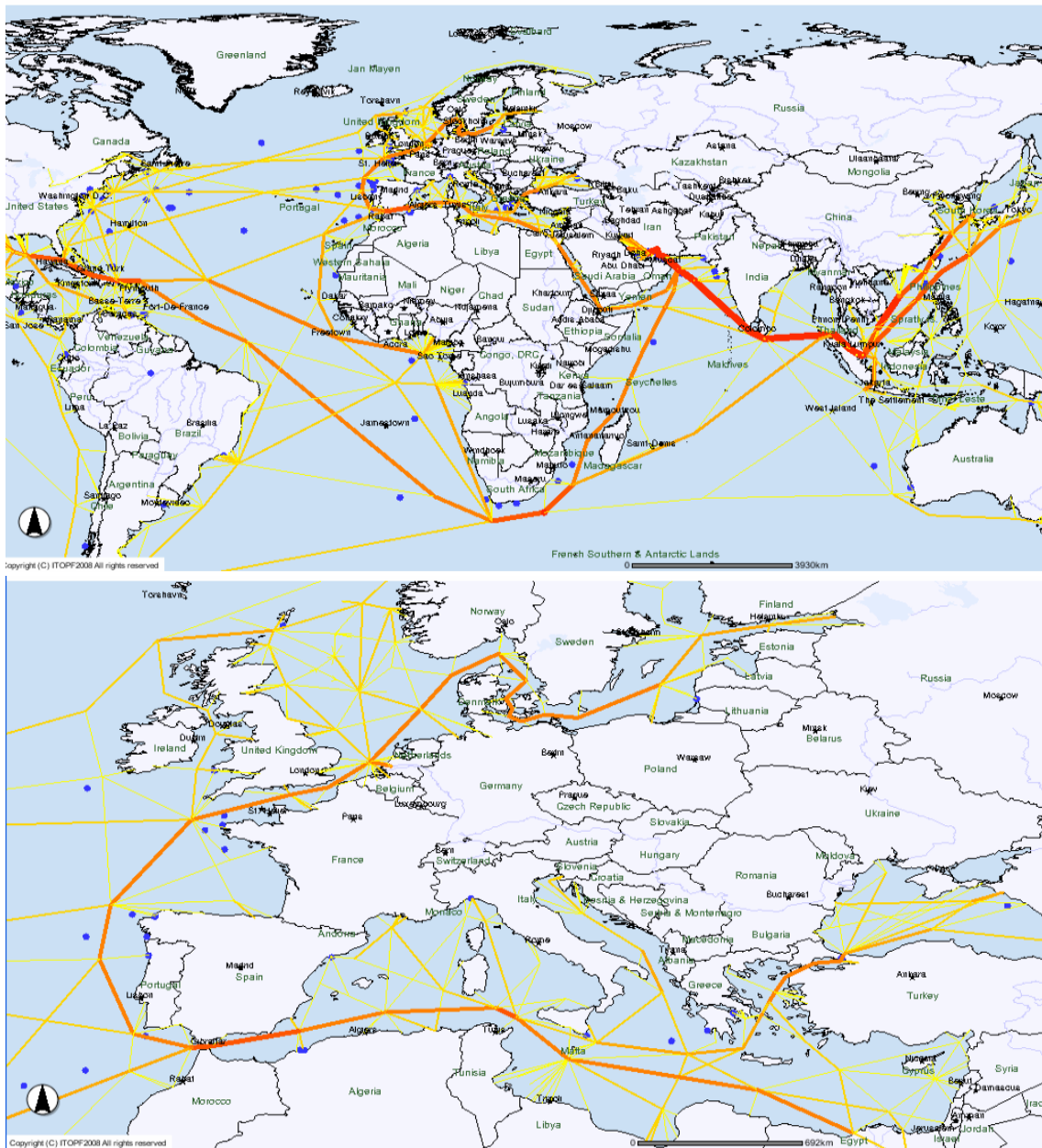
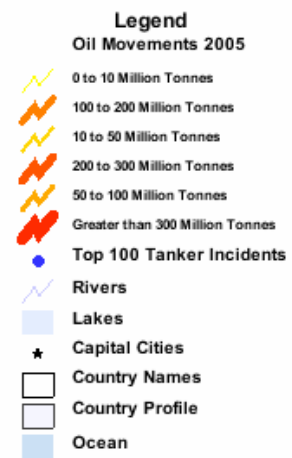


Figura 2.23. *Rutas de transporte de petróleo a escala mundial y europea.*

Fuente: Elaboración propia con el Gis Map de ITOPF

(www.itopf.com)



2.4.2. Estadísticas mundiales de hidrocarburos vertidos

La seguridad marítima, tanto en navegación como en las características de los buques, ha ido mejorando con el tiempo pero no de manera progresiva, sino que ante grandes desastres surgieron nuevos acuerdos locales e internacionales. El primero de los vertidos que causó conmoción fue el de uno de los primeros superpetroleros, el Torrey Canyon, que en 1968 vertió 120.000 t de petróleo frente a las costas de Inglaterra. Hasta ese momento no había habido ningún accidente de tamaño envergadura y no se sabía como actuar, por lo que, algunas de las decisiones tomadas, como el uso de detergentes, agravó el daño. Tras esta terrible situación se formó la *International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF)*, encargada de mejorar la seguridad marítima y elaborar protocolos de actuación ante este tipo de vertidos. A partir de esta organización se constituyó la *International Oil Pollution Compensation Funds (IOPC Funds)*, una organización sin ánimo de lucro creada en 1971 para gestionar las indemnizaciones debidas a vertidos de hidrocarburos en todo el mundo. Sus fondos provienen de las aportaciones de los seguros abonados por todos los petroleros.

Sucesivas mareas negras han motivado modificaciones legislativas importantes que han contribuido a reducir el número e importancia de los accidentes. En el contexto de la Unión Europea, los desastres del Erika y el Prestige han originado la aparición de normativas que incrementan la seguridad marítima y reducen el riesgo de vertidos.

Gracias a las sucesivas modificaciones normativas se ha ido reduciendo, a lo largo de los años, el volumen de hidrocarburos vertido y también el número de accidentes. Tal y como se puede ver en la Figura 2.24 el número de mareas negras se ha reducido desde una media de 25 por año en la década de 1970 a una media de 3,6 en la década de 2000. Respecto de la cantidad de hidrocarburo vertido, la Figura 2.25 refleja su evolución, pudiéndose observar una clara tendencia a la reducción del volumen de fuel vertido anualmente.

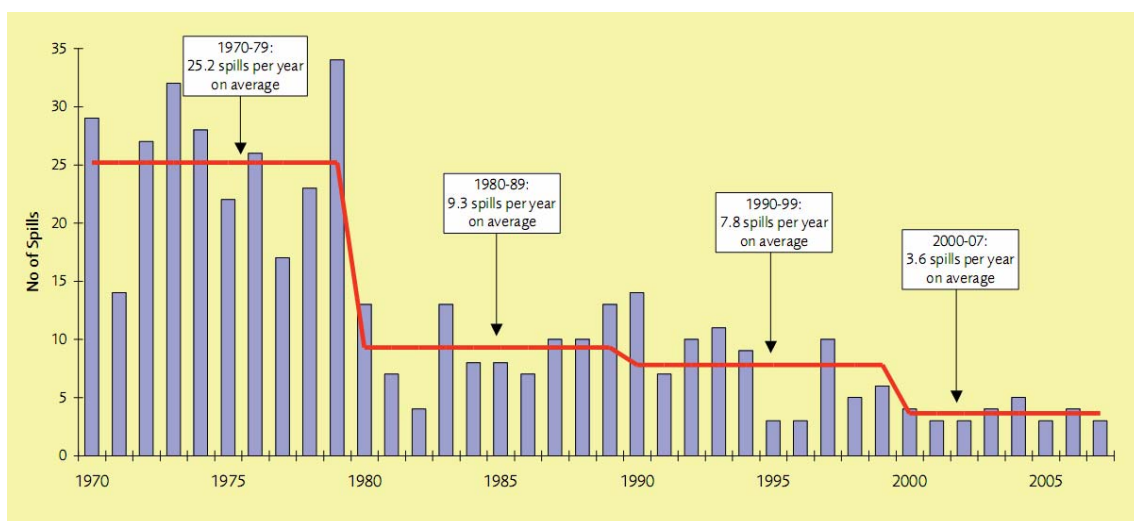


Figura 2.24. Número de mareas negras superiores a 700 t en el período 1970-2007. (ITOPF, 2008)

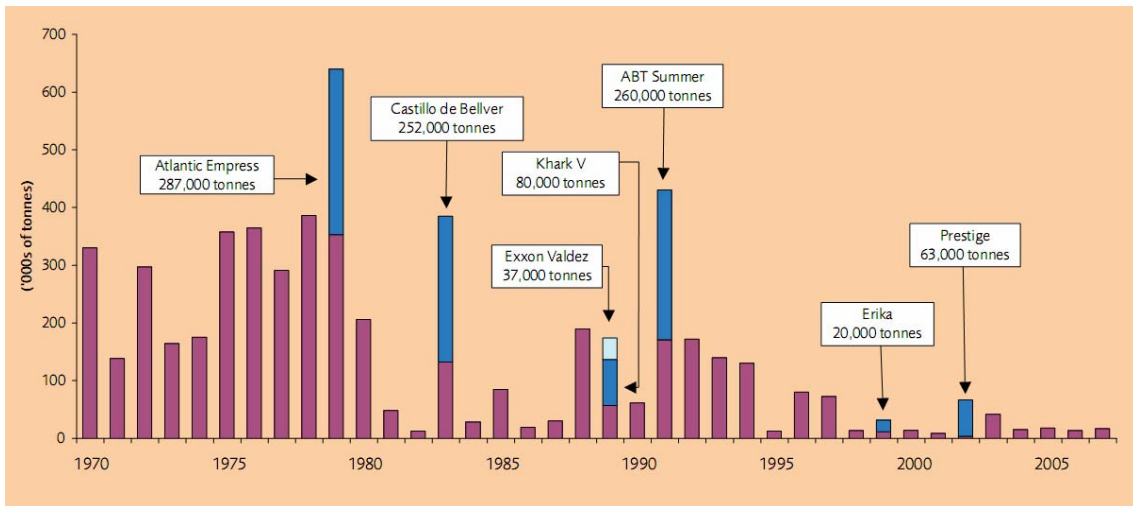


Figura 2.25. Cantidad, en toneladas, vertida en el período 1970-2007. (ITOPF, 2008)

Una limitación lógica que también se está imponiendo, poco a poco, es la del tamaño de los superpetroleros, que han llegado a alcanzar una capacidad de transporte de 560.000 t de crudo (Figura 2.26). El riesgo se concentra al ser transportado todo junto y es obviamente más seguro transportarlo en varios buques diversificando el riesgo.

La tendencia actual es la construcción de buques más pequeños, según la International Association of Independent Tanker Owners (INTERTANKO) los mayores buques que se construyan en los próximos años serán del tipo VLCC (Very Large Crude Carrier), con una capacidad máxima de 280.000 t y unas dimensiones de 350 m de eslora, 60 metros de manga y 30 m de calado. (Cetmar, 2008).



Figura 2.26. Knock Nevis, mayor superpetrolero del mundo. Capacidad 560.000 t de petróleo, eslora: 458 m.

En la Tabla 2.3 se muestra una estadística del número de vertidos de hidrocarburos que ha habido en el mundo entre 1974 y 2007. De ella puede extraerse una clara conclusión: la mayoría de vertidos pequeños, de menos de 7 t, se deben a las operaciones en puerto de los buques, aunque por otro lado, los vertidos de gran magnitud se deben a situaciones accidentales.

Tabla 2.3. *Número de vertidos de hidrocarburos según causa desde 1974 hasta 2007. (ITOPF, 2008)*

	< 7 t	7-700 t	> 700 t	Total (t)
VERTIDOS OPERACIONES				
Carga/descarga	2823	333	30	3186
Carga de combustible	548	26	0	574
Otras operaciones	1178	56	1	1235
VERTIDOS ACCIDENTALES				
Colisiones	175	300	98	573
Encajamientos	235	226	119	580
Fallos en el casco	576	90	43	709
Incendios y explosiones	88	15	30	133
Otros/desconocido	2186	150	25	2361
Total	7809	1196	346	9351

Otra cuestión importante es conocer el tipo de hidrocarburo vertido en cada accidente, pues el potencial tóxico está ligado al tipo de combustible. En general, los productos blancos, como gasolina, etanol, queroseno, etc. se evaporan al poco tiempo de caer en el agua. Otros, como el diesel, se dispersan rápidamente sin un grave impacto. El crudo es distinto pues, aunque una parte se evapora rápidamente, una gran fracción del mismo tarda en degradarse. El caso extremo de impacto sobre el medio marino es el del fuel y el bunker, empleados habitualmente como combustible para los barcos. Estos hidrocarburos son extremadamente viscosos, muy poco fluidos a temperatura ambiente y además no contienen fracciones ligeras que se evaporen.

En la Tabla 2.4 se detallan el número de accidentes y el porcentaje de fuel vertido en función del tipo de hidrocarburo, desglosándolo además según el tamaño del vertido: pequeño, mediano y gran vertido. Destaca que, aunque la mayor parte de las grandes mareas negras son de crudo, el fuel representa casi la misma cantidad de vertido. En efecto, dado que el fuel se emplea en todos los grandes buques como combustible, en muchos accidentes marítimos acaba vertiéndose el fuel de los depósitos.

Tabla 2.4. Vertidos de hidrocarburos según tipo de hidrocarburo vertido, desde 1974 hasta 2007 (ITOPF, 2008).

Tipo de combustible	% Número de vertidos			% de cantidad vertida		
	< 7 t	7-700 t	> 700 t	< 7 t	7-700 t	> 700 t
Bunker	8	13	2	5	9	0,2
Crudo	30	24	39	43	20	45
Fuel	18	38	39	22	52	47
Productos blancos	10	18	17	10	15	7
Otros	6	3	2	8	3	0
Desconocido	28	4	0	11	1	0

2.4.3. Principales mareas negras mundiales

El transporte de hidrocarburos está directamente ligado al crecimiento de la industria automovilística, por lo que las necesidades de hidrocarburos han ido creciendo año a año durante todo el siglo XX. Debido a este crecimiento en las necesidades de crudo, primero se comenzaron a construir buques que exclusivamente se dedicaban a transportar crudo, y luego éstos se hicieron cada vez más grandes, llegando en 1959 por primera vez a las 100.000 t de capacidad de transporte. Fue a partir de ese momento, con el nacimiento de los superpetroleros, cuando aparecieron las primeras catástrofes ecológicas, que conmocionaron a una sociedad aun poco interesada en la protección del medio ambiente.

En la Tabla 2.5 se puede ver un listado de las mayores mareas negras de la historia en función de la cantidad vertida. Sin embargo, el indicador de hidrocarburo vertido no es el único a tener en cuenta, ya que vertidos pequeños como el del Exxon Valdez o el Erika han tenido un impacto ecológico muy superior al de otros vertidos de mucha mayor cuantía. Sin embargo, cuantificar el impacto ecológico es mucho más complicado, y es por esto por lo que se sigue empleando el criterio de cantidad vertida.

En el presente apartado se tratan, por tanto, vertidos importantes por la cantidad, de gran impacto ecológico y, por último, se añade el factor adicional de la repercusión social de algunos vertidos, que motivaron modificaciones políticas y legislativas relativas a los vertidos de hidrocarburos.

Tabla 2.5. Histórico de mareas negras con un vertido superior a 100.000 t de crudo o fuel. Ordenada de mayor a menor cantidad vertida. (ITOPF, 2007)

Marea negra / Petrolero	Lugar	Fecha	Toneladas de crudo
Guerra del Golfo,	Golfo Pérsico, Irak	Enero, 1991	136,000 - 1,500,000
Ixtoc I	Golfo de México	3 Junio de 1979	454,000 - 480,000
Atlantic Empress	Trinidad & Tobago	Julio de 1979	287,000

Marea negra / Petrolero	Lugar	Fecha	Toneladas de crudo
Valle Fergana	Uzbekistan	Marzo de 1992	285,000
Campo de Nowruz	Golfo Pérsico	Febrero de 1983	260,000
ABT Summer	1,300 km de Angola	1991	260,000
Castillo de Bellver	Sudáfrica	Agosto 1983	252,000
Amocco Cadiz	Bretaña, Francia	Marzo de 1978	223,000
Amoco Haven	Prox. de Genova, Italia	1991	144,000
Odyssey	1300 km de Nueva Escocia, Canadá	1998	132,000
Sea Star	Golfo de Omán	Diciembre de 1972	115,000
Torrey Canyon	Islas Cornwall, UK	marzo de 1967	80,000 - 119,000
Irenes Serenade	Navarino, Grecia	1980	100,000
Urquiola	A Coruña, España	Mayo de 1976	100,000

Existen mareas negras que, por su repercusión, han supuesto puntos de inflexión y han hecho reaccionar a la comunidad internacional consiguiendo modificaciones en las normativas de seguridad marítima y en los tratados internacionales sobre el mar. Existe una clara correlación entre el poderío internacional del país que sufre una marea negra y la repercusión social a nivel mundial de la misma. Ciertas mareas negras, que ocasionaron grandes desastres ecológicos pasaron sin pena ni gloria por la historia y sin embargo, otras de menor calado y con impacto ambiental menor tuvieron una enorme repercusión social y motivaron respuestas políticas y legislativas. En este apartado se van a detallar ciertas mareas negras de petroleros que tuvieron gran relevancia a nivel internacional y también algunos casos parecidos a los del Prestige, donde vertidos de menor tamaño provocaron grandes desastres ecológicos.

Torrey Canyon

El 18 de marzo de 1967 el superpetrolero liberiano Torrey Canyon, de 120.000 t embarrancó en el arrecife de Seven Stones al suroeste de las islas de Cornwall, en Inglaterra. Se derramaron 120.000 toneladas de crudo al medio marino, provocando una gran marea negra que llegó al litoral de Cornwall, la isla de Guernsey y las costas de Francia (Borrás, 2008).

La mancha de hidrocarburo alcanzó unas dimensiones de 70 km de largo por 40 km de ancho y provocó la muerte de más de 20.000 aves.

Al ser la primera de las grandes mareas negras se tomaron, desde la inexperiencia, decisiones sobre como actuar que, o bien no tuvieron el efecto deseado, o resultaron contraproducentes.

La primera medida tomada por las autoridades competentes fue la de bombardear la mancha de petróleo para que éste se quemase, arrojando la marina británica gasolina sobre el petro-

lero y bombardeando después la mancha. Aunque se esperaba la combustión de una gran parte del petróleo, apenas una pequeña parte se destruyó.

La segunda medida fue más desafortunada, ya que se empleó una cantidad demasiado alta de detergente en las operaciones de limpieza, lo cual afectó negativamente al medio ambiente marino y a sus poblaciones por varios años.

Esta fue la primera de las grandes catástrofes conocidas por el grueso de la población. Causó gran conmoción social, lo cual propició la formación de un Comité Jurídico especial para este tipo de casos dentro de la OMI (Organización Marítima Internacional). Además, provocó que se firmaran varios convenios:

- Acuerdo sobre intervención en alta mar, que fue firmado en Bruselas en noviembre de 1969. Este convenio concede el derecho a intervenir un barco extranjero cuando existe la posibilidad de contaminación de las costas inglesas.
- Acuerdo sobre responsabilidad civil de los daños debidos a la contaminación por hidrocarburos.
- Creación en 1971 de un fondo internacional de indemnización para los casos de mareas negras.

Sea Star

El petrolero Sea Star chocó con otro petrolero, el Horta Barbosa, en el golfo de Omán, Océano Índico, en el año 1972. Tras la colisión, ambos petroleros comenzaron a arder y, posteriormente explotaron, muriendo un total de 12 personas. Finalmente el Sea Star, que quedó gravemente dañado se hundió, vertiéndose en total unas 115.000 t de crudo.

Amoco Cadiz

El petrolero Amoco Cadiz sufrió una brecha en el casco frente a la costa de la Bretaña francesa en el año 1978. Durante un período de dos semanas el buque liberó toda su carga, un total de 223.000 t de crudo y 4.000 t de fuel. Debido a la gran agitación marítima una gran parte del hidrocarburo se mezcló con el agua dando una emulsión viscosa, incrementando el volumen de contaminante unas cinco veces. Breve tiempo tras el accidente, esta emulsión había alcanzado



Figura 2.27. Hundimiento del Amoco Cadiz (Borrás, 2008)

las costas francesas y británicas contaminado un total de 320 km de la costa de Bretaña y al este de las islas del Canal de la Mancha.

Las condiciones climatológicas adversas reinantes tras la marea negra dificultaron enormemente la recogida de los residuos, por lo que toda la costa se vio afectada por una gran cantidad de vertido. Los mejores métodos de recogida de residuos resultaron serlo: camiones cisterna, en el caso de grandes acumulaciones y, en pequeños vertidos, la recolección manual, en la cual intervinieron más de 7.000 personas.

La tragedia del Amoco Cádiz fue la mayor pérdida de vida marítima de la que se tenía registro hasta ese momento. Afectó, además, a la actividad pesquera en un caladero muy productivo.

Se encontró un problema adicional ya que, las balsas provisionales que se habían empleado en el almacenamiento de los residuos de hidrocarburo no estaban correctamente selladas y, cuando se recuperaron los residuos, se constató que se habían producido infiltraciones al terreno, contaminándolo.

Esta catástrofe también es recordada por ser el primer caso en el que la justicia condenó a una empresa petrolera, obligando a la misma a indemnizar por los daños causados. Muchas lecciones sobre protocolos de limpieza e impacto ambiental se aprendieron a partir del Amoco Cádiz y todavía es uno de los casos de marea negra más estudiado de la historia.

Atlantic Empress

El 19 de julio de 1979, se produjo un inmenso vertido debido a la colisión de los superpetroleros Aegean Captain, de 200.000 t, y el Atlantic Empress, de 260.000 t, cerca de Trinidad y Tobago. Se perdieron 280.000 toneladas de crudo, de las cuales nunca se ha llegado a determinar cuánto ardió y cuánto fue vertido al mar. La tripulación del "Aegean Captain" fue capaz de dominar el fuego del buque, tras lo cual pudo ser remolcado en los días siguientes hacia Trinidad. No corrió la misma suerte el Atlantic Empress que el día 3 de agosto se hundía tras una violenta explosión después de haber permanecido 15 días entre llamas.

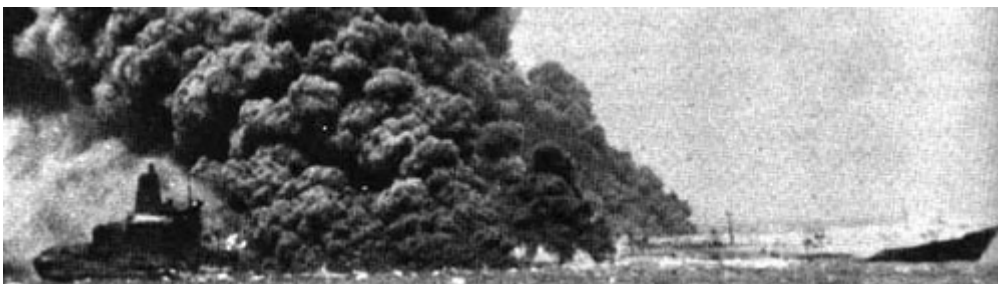


Figura 2.28. *El Atlantic Empress en llamas (Borrás, 2008)*

Irenes Serenade

En febrero de 1980 el petrolero Irenes Serenade cargado con 102.660 t de crudo viajaba con destino a Siria cuando se dispuso a recargar combustible en la bahía de Navarino (Grecia). En ese momento el petrolero sufrió una serie de explosiones, tras lo cual se incendió y posteriormente liberó gran parte de su carga, produciendo un vertido de grandes dimensiones. Adicionalmente el incendio se extendió al vertido. De este modo, una parte del hidrocarburo se incendió en alta mar, otra parte fue a parar a una región de la costa griega, y el resto se dispersó en el mar, de modo que en las siguientes semanas aparecieron galletas de chapapote en playas y ensenadas.

Castillo de Bellver

El petrolero castillo de Bellver, transportando un total de 252.000 t de crudo se incendió a unas 70 millas al noroeste de Cape Town, Sudáfrica en agosto de 1983. Finalmente el barco se partió en dos y una de las mitades se hundió con una gran cantidad de crudo remanente en los tanques. La mitad que quedó a flote se hundió con cargas explosivas. Pese a la cantidad de crudo vertido no se requirieron grandes tareas de limpieza ya que mediante la aplicación de dispersantes químicos en el mar el hidrocarburo se diluyó.

ABT Summer

El petrolero ABT Summer realizaba, en mayo de 1991, una ruta de Irán a Róterdam cargado con 260.000 t de crudo cuando sufrió una explosión y luego un intenso fuego a 900 millas náuticas de la costa de Angola. Cinco de los 32 tripulantes murieron en el accidente.

El derrame produjo una mancha de 170 kilómetros cuadrados en alta mar que se encontraba incendiada en varios puntos. El barco ardió durante tres días antes de hundirse y liberar el resto de su carga. No está claro el destino del hidrocarburo pero, como sucedió en un punto muy alejado de la costa, se asumió que el vertido se había dispersado sin excesivo impacto ambiental.

Amoco Haven

En el año 1991, el M/T Haven, un petrolero cargado con 144.000 t de crudo, explotó y se incendió frente a la costa de Génova en Italia muriendo seis tripulantes. Inicialmente vertió en torno a 50.000 t de crudo y luego se hundió. Causó una marea negra que contaminó el Mediterráneo y afectó a la costa italiana y francesa.

Ixtoc I

El 3 de junio de 1979 el pozo petrolero Ixtoc I, situado en el Golfo de México, sufrió un fenómeno singular, una erupción de petróleo, tras la cual comienza a verter crudo sin control. Después, la plataforma se incendió dificultando aún más las operaciones de control. El vertido de crudo fue en total de 530.000 t, requiriéndose un total de ocho meses para cerrar la abertura y terminar con la fuga.



Figura 2.29. *Incendio de la plataforma petrolífera Ixtoc I en el Golfo de México. (Borrás, 2008)*

La contaminación alcanzó las playas de Vera Cruz, Tampico, Campeche y Laguna Madre, de primera relevancia turística. Además, el ecosistema marítimo se afectó en gran medida, viéndose muy afectada la actividad pesquera.

Esta erupción no es la única que se ha dado en la historia, pero sí la más grave de todas y también es el mayor vertido accidental de la historia. Sólo superado por la 1ª guerra del Golfo, en la cual se vertieron hasta 1,5 millones de toneladas.

Erika

El 12 de diciembre de 1999 el petrolero Erika, de bandera maltesa, se partió en dos en las costas de la Bretaña francesa. Derramó más de 20.000 toneladas de fuel pesado al medio marino, constituyendo uno de los desastres más llamativos por la espectacularidad de las imágenes, además, por supuesto, de los graves daños que produjo en el medio ambiente (CEDRE, 2008).

Las condiciones climatológicas adversas provocaron esta catástrofe medio ambiental. Otras fuentes apuntan a las pésimas condiciones en las que se encontraba el buque.

Alrededor de 400 km de costa se vieron afectados por el vertido, desde la isla de Ré hasta Penmarch, constatando el potencial contaminante del fuel pesado.

Este desastre guarda ciertas analogías con el Prestige: el mismo tipo de hidrocarburo, una gran dispersión del vertido y, además, ambos desastres se produjeron con apenas tres años de diferencia.

Este desastre provocó que la Unión Europea endureciera las medidas de seguridad para los superpetroleros, medidas conocidas como Erika 1 y Erika 2, o la directiva Erika. Un par de años después de aprobadas estas medidas, se aprobaron unas nuevas a raíz del Prestige, en las cuales se incrementaron los requerimientos de seguridad marítima.

2.4.4. Histórico de vertidos de fuel pesado

El *Centre de documentation de recherche et d'experimentations sur les pollutions accidentelles des eaux* (CEDRE) es el centro de información de contaminación marítima más relevante a nivel europeo y, probablemente, mundial. Esta institución recoge datos y genera informes sobre todos los accidentes marítimos en los cuales se produce contaminación marina, tanto por hidrocarburos como por sustancias químicas. El ámbito de registro es mundial aunque este organismo prioriza el ámbito francés y de la Unión Europea. Por tanto, esta base de datos (CEDRE, 2008), contiene todos los accidentes pequeños de Francia, casi todos los de Europa y los más importantes del resto del mundo.

Utilizando la información del CEDRE se ha hecho un análisis en el que se han seleccionado los accidentes en los que se ha vertido fuel pesado, que se pueden ver en la Tabla 2.6. Debe constar que sólo se han tenido en cuenta los accidentes de buques que están indexados en el CEDRE. No se trata de un listado exhaustivo de accidentes pero sí permite extraer ciertas tendencias. Del análisis cabe destacar que, de los 146 incidentes que el CEDRE tiene indexados, un total de 32 corresponden a vertidos de fuel pesado. Éstos no se relacionan únicamente con transportes de fuel, como en el caso del Prestige o el Erika, sino que se trata de barcos de diversa índole que pierden parte de su combustible tras un accidente. Por ejemplo, el vertido del Adamandas, un barco que transportaba mineral de hierro que sufrió un choque, vertiendo un total de 470 t de fuel que empleaba como combustible. Esto mismo sucede en muchos otros incidentes, por lo que son mucho más frecuentes los vertidos de fuel que los de petróleo, también es verdad que en cantidades mucho menores.

Tabla 2.6. *Accidentes de buques que provocaron vertidos de fuel pesado. Origen datos CEDRE, 2008, elaboración propia.*

BUQUE ACCIDENTADO	Lugar accidente	Fecha	Tipo de Vertido	Cantidad de fuel (t)
Adamandas	Isla de Reunión	22/09/2003	Mineral + bunker	470
Afran Zodiac	Irlanda	11/01/75	Bunker	500
MSC Al Amine	Túnez	15/02/2005	Contenedores+fuel	150
Baltic Carrier	Dinamarca	29/03/2001	Fuel pesado	2.700
Bunga Teratai Satu	Australia	02/11/2000	Contenedores+fuel	1.200
Coral Bulker	Portugal	25/12/2000	Madera+fuel	700
Efthycosta II	Gales	08/04/1970	Fuel pesado	700
Eleni V	Mar del Norte	06/05/1978	Fuel pesado	5.000
Erika	Francia	12/12/1999	Fuel pesado	20.000
Esso Wandsworth	Inglaterra	23/09/1965	Fuel pesado	5.000
Esso Bernicia	Escocia	30/12/1978	Fuel pesado	1.100

BUQUE ACCIDENTADO	Lugar accidente	Fecha	Tipo de Vertido	Cantidad de fuel (t)
Hamilton Trader	Inglaterra	30/04/1969	Fuel pesado	700
Happy Bride	Francia	4/01/2006	Fuel pesado	60
MSC Ilona	China	7/12/2004	Fuel pesado	450
Jakob Maersk	Portugal	29/01/1975	Petróleo+bunker	4.000
Katja	Francia	07/08/1997	Fuel pesado	190
Kini Kersten	Francia	01/01/1987	Fuel pesado	45
Kowloon Bridge	Irlanda	22/11/1986	Fuel pesado	1.200
Melbridge Bilbao	Francia	12/11/2001	Fuel pesado	80
Nakhodka	Japón	02/01/1997	Fuel pesado	6.240
M/V New Flame	España	12/08/2007	Fuel pesado	780
Olympic Bravery	Francia	24/01/1976	Fuel pesado	1.200
Pionersk	Francia	31/10/1994	Diesel+Fuel	600
Prestige	España	13/11/2002	Fuel pesado	63.000
Rokia Delmas	Francia	24/10/06	Diesel+Fuel	500
Selendang Ayu	USA	7/12/2004	Fuel pesado	1.300
Skyron/Hel	Francia	30/05/1987	Fuel pesado	300
Solar 1	Filipinas	11/08/2006	Fuel pesado	800
Tanio	Francia	07/03/1980	Fuel pesado	6.000
Treasure	Namibia	26/06/2000	Fuel pesado	1.000
Vicuña	Brasil	15/11/2004	Fuel pesado	400
Vistabella	Caribe	07/03/1991	Fuel pesado	650

2.4.5. Localización de los vertidos de hidrocarburos en Europa

La ITOPF (*International Tanker Owners Pollution Federation*) en su informe Oil Tanker Spill Statistics de 2007 realiza un importante análisis sobre la incidencia de mareas negras o vertidos importantes de hidrocarburos en las costas europeas. Tal y como se puede ver en la Figura 2.30 existe una relación directa entre las rutas comerciales de hidrocarburos y la incidencia de accidentes, además esta correlación se incrementa en zonas costeras de mayor peligro como son el Estrecho de Gibraltar, la costa Atlántica gallega y el Canal de la Mancha.

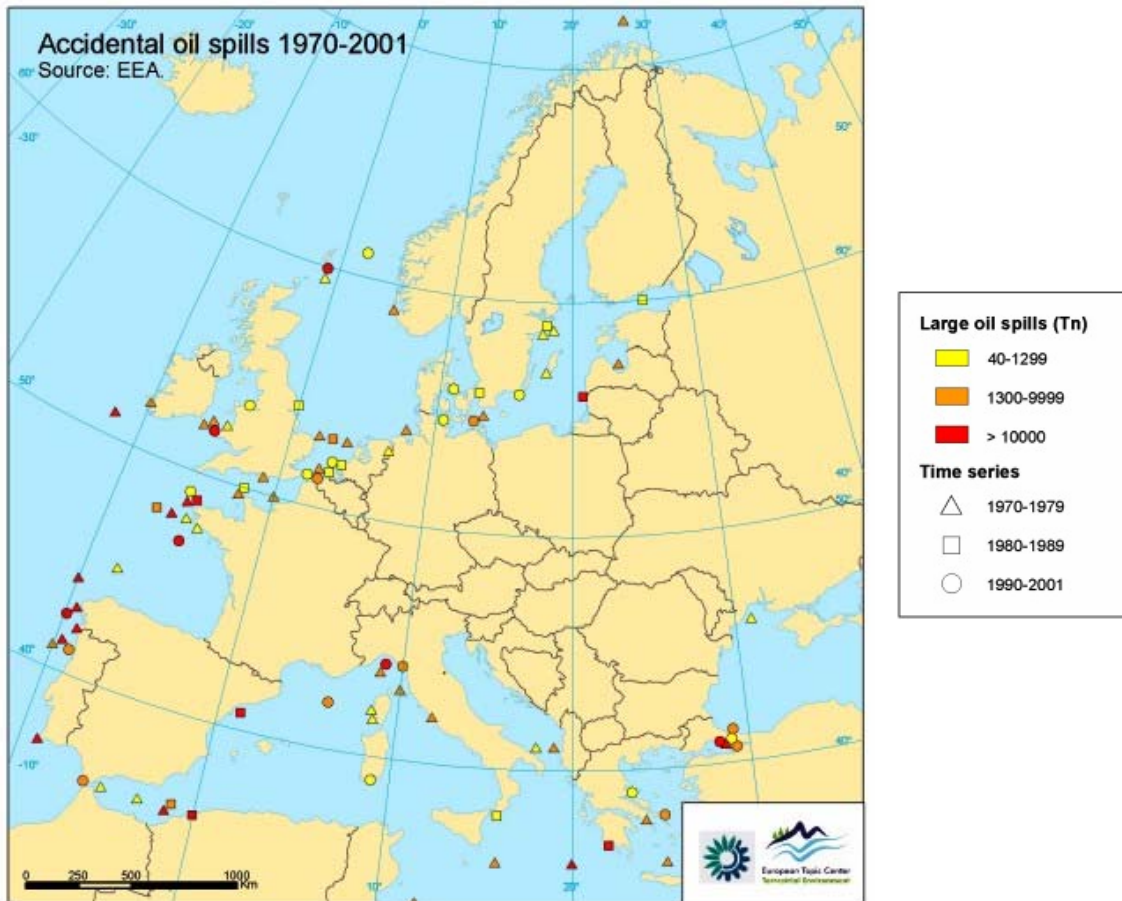


Figura 2.30. Vertidos de hidrocarburos accidentales en Europa en el período 1970-2001. (ITOPF, 2007)

2.4.6. Transporte de hidrocarburos en puertos españoles

El transporte de petróleo y derivados se centra en ciertos puertos españoles, concretamente los que poseen refinerías ligadas a los mismos. En la Figura 2.31 se puede observar la ubicación de las principales refinerías españolas, ubicadas en A Coruña, Bilbao, Tarragona, Castellón, Cartagena, San Roque, Tenerife, Huelva y Puertollano. Esto se refleja también en el tráfico portuario de cada uno de los puertos próximos a las refinerías tal y como se puede ver en la Figura 2.31.

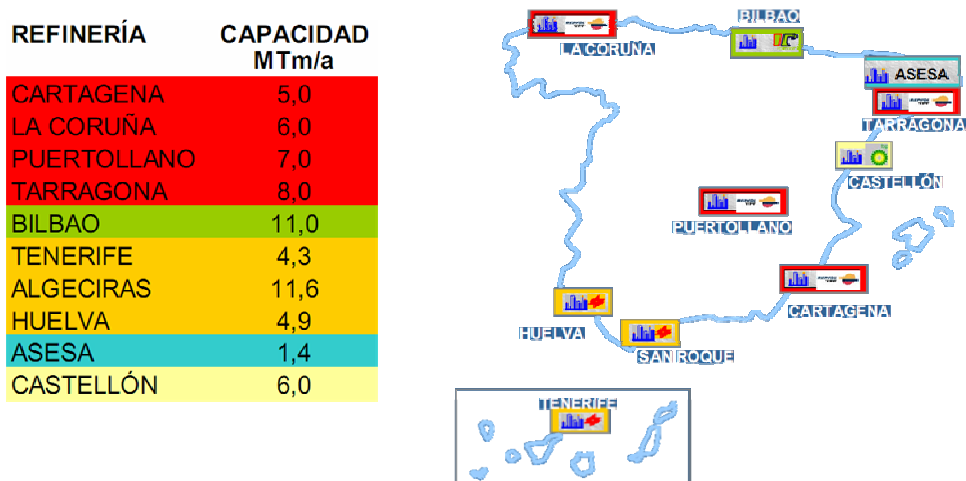


Figura 2.31. Red de refinerías en territorio español. Fuente: Asociación española de operadores de productos petrolíferos (Puertos del Estado, 2007).

Tal y como era de esperar, existe una relación directa entre la existencia de una refinería y la cantidad de tráfico de productos petrolíferos (Tabla 2.7), constatándose que en España no existe ningún puerto que sirva de redistribución de productos petrolíferos. Por tanto, es lógico prever un riesgo potencial en el entorno de ciertos puertos resultado de la presencia de refinerías adscritas a los mismos.

Existe el riesgo adicional de cualquier barco que lleva fuel como combustible, y que en caso de accidente puede acabar vertido. Por ello cuanto mayor sea el tráfico portuario mayor será el riesgo de vertido. Quedaría un último factor por analizar, no de menor importancia, pero sí más complejo, dado por las características de cada puerto, ya que obviamente no es comparable el riesgo del puerto de A Coruña o de Vigo en la costa atlántica gallega con el de Tarragona en el Mediterráneo.

Tabla 2.7. Volumen de transporte de productos en los puertos de interés general españoles. (Puertos del Estado, 2007).

PUERTO	GRANELES LÍQUIDOS (T)			GRANELES SÓLIDOS (T)	MERCANCÍA GENERAL (T)	TOTAL MERCANCÍAS (T)
	Productos petrolíferos	Otros líquidos	Total			
A Coruña	7.975.236	229.811	8.205.047	4.095.639	1.050.589	13.351.275
Alicante	20.060	169.346	189.406	1.642.514	1.821.197	3.653.117
Almería	-	6.613	6.613	5.964.929	575.515	5.917.754
Avilés	-	814.455	3.615.486	74.053	1.487.813	5.917.754
Bahía de Algeciras	18.814.523	1.448.109	20.262.632	2.708.226	43.354.091	66.324.949
Bahía de Cádiz	66.188	7.627	73.815	2.669.354	2.987.479	5.760.648
Baleares	2.169.278	-	2.169.278	2.188.436	9.937.796	14.295.510

Barcelona	4.491.807	6.044.568	10.536.375	4.107.582	31.762.162	46.406.119
Bilbao	18.229.544	4.060.235	22.289.779	5.524.178	9.394.336	37.208.293
Cartagena	15.495.811	3.852.871	19.348.682	5.173.022	998.686	25.520.390
Castellón	7.733.271	387.001	8.120.272	3.590.891	1.546.441	13.257.604
Ceuta	961.826	2.677	964.503	66.793	891.278	1.922.574
Ferrol-San Cibrao	641.064	295.856	936.920	8.709.257	557.720	10.203.897
Gijón	1.356.232	-	1.356.232	18.298.185	600.585	20.255.002
Huelva	7.335.767	6.045.571	13.381.338	7.394.282	684.392	21.460.012
Las Palmas	4.772.419	61.303	4.833.722	1.678.836	7.207.110	23.719.668
Málaga	-	66.448	66.448	1.953.430	4.050.136	6.070.014
Marín y Ría de Pontevedra	-	10	10	891.966	867.099	1.759.075
Melilla	74.447	-	74.447	45.826	690.467	810.740
Motril	1.275.100	147.284	1.422.384	1.172.380	258.962	2.853.726
Pasajes	-	-	-	3.248.288	2.203.265	5.451.533
Sta C. de Tenerife	9.497.352	45.469	9.542.821	1.986.964	7.333.756	18.863.541
Santander	190.632	235.020	425.652	4.164.897	1.265.836	5.856.385
Sevilla	59.511	299.216	358.727	2.827.598	2.094.739	5.281.064
Tarragona	16.698.608	1.947.511	18.646.119	11.237.751	1.443.978	31.327.848
Valencia	677.037	3.678.925	4.355.962	7.148.231	35.781.578	47.285.771
Vigo	60.422	28.803	89.225	701.899	3.932.990	4.724.114
Vilagarcía	174.546	159.698	334.244	613.257	246.416	1.193.917
Total	118.770.681	30.034.427	148.805.108	113.450.097	185.026.412	447.281.617

2.4.7. Localización de los accidentes marítimos en la Península Ibérica

Según datos del CEDRE (CEDRE, 2008) la Península Ibérica y las islas han recibido un número importante de vertidos repartidos en una gran diversidad de agentes contaminantes. El CEDRE ha recopilado, a colación del accidente del Prestige, información sobre los accidentes marítimos sucedidos en la Península Ibérica desde 1950 hasta 2005. Esta entidad ha situado un total de 53 accidentes de importancia, de los cuales 32 corresponden a las costas españolas y 21 a las portuguesas, correspondientes a vertidos de diversa índole: hidrocarburos, productos químicos, minerales, productos alimenticios, etc.

En la Figura 2.32 se puede observar la localización de los vertidos acaecidos en la Península Ibérica que el CEDRE tiene catalogados. Permite deducir que la costa atlántica gallega y el estrecho de Gibraltar concentran la mayor frecuencia de sucesos, por lo que es razonable inferir que ambas regiones tienen una alta probabilidad de sufrir accidentes marítimos.

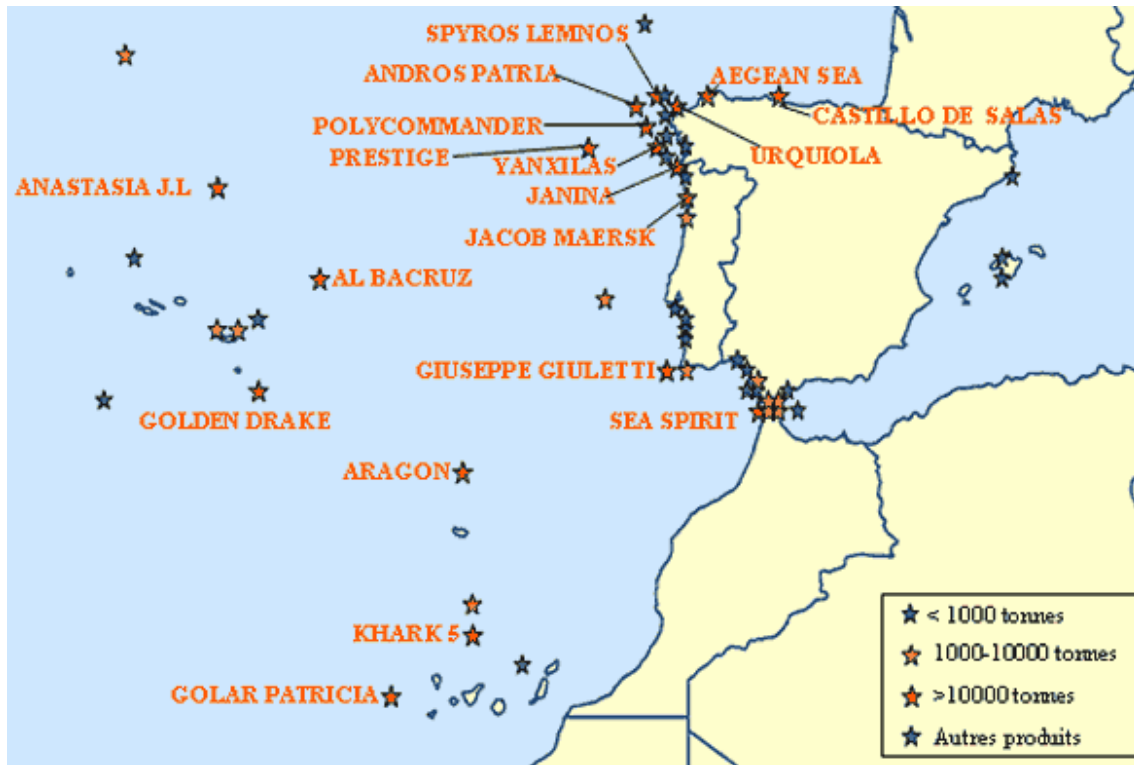


Figura 2.32. Geolocalización de los vertidos catalogados por el CEDRE en la península ibérica desde 1950 hasta 2005. (CEDRE, 2008)

2.4.8. Cuatro grandes Mareas Negras en Galicia antes del Prestige

Todas las mareas negras que se han dado en Galicia se encuentran, tristemente, entre el grupo de las peores mareas negras del mundo. Esto se fundamenta en la combinación de tres factores: el fuerte tráfico marino frente a las costas gallegas, las habituales tormentas del Atlántico que llegan sin atenuación a Galicia, y por último, y no menos relevante, la existencia de una refinería ligada al puerto de A Coruña.

La marea negra provocada por el petrolero *Prestige* es la quinta que afecta a Galicia desde 1970. Con este último desastre se continúa una trágica historia que se repite con demasiada frecuencia, tanta, que pone de manifiesto dos cosas: la peligrosidad de las costas gallegas y la incapacidad crónica para hacer frente a catástrofes de estas características.

En este apartado se describen brevemente las mareas negras de importancia que han afectado al litoral gallego desde 1970. A la información sobre estos accidentes se añaden reflexiones relacionadas con las lecciones aprendidas tras cada accidente y las promesas hechas de mejoras en cuanto a la actuación.

Además de las mareas negras que se exponen en este apartado habría que destacar otros dos vertidos marítimos, no ligados a hidrocarburos pero sí a productos químicos. Se trata del *Erkowit* que, en 1973, vertió en A Coruña 2.000 bidones de insecticida altamente tóxico y el

Casón que, en 1987, embarrancó en la costa de Finisterre cargado con 1.100 t de productos químicos inflamables y tóxicos.

Polycommander

El 5 de mayo de 1970, el petrolero de bandera noruega *Polycommander* accedió al Puerto de Vigo para atender una urgencia médica de uno de sus tripulantes. Al abandonar la ría, un error de navegación hizo encallar el navío en unos bajos próximos a la isla de Monteagudo, en las islas Cíes (España). Este choque le produjo un gran boquete a babor, incendiándose el buque y vertiendo unas 13.000 t de un cargamento de 49.414 t de petróleo.



Figura 2.33. *Polycommander* (Borrás, 2008)

El vertido afectó principalmente a las localidades de Baiona y Panxón, aunque durante los días siguientes tras el accidente se trasvasa a otro barco el crudo que quedó en las bodegas.

Urquiola

El 12 de mayo de 1976 el buque petrolero *Urquiola* procedente del Golfo Pérsico transportaba 100.000 t de crudo a la refinería de A Coruña, en la entrada del puerto el buque chocó con una aguja rocosa debido a una mala indicación de las cartas náuticas.

El *Urquiola* no sufrió muchos daños en este primer momento y pidió ser llevado a puerto. En ese momento, los organismos competentes tomaron la decisión de que el petrolero abandonase el canal y se alejase 200 millas de las costas españolas (Figura 2.34). En estas maniobras el *Urquiola* sufrió más daños y un incendio que provocó una gran humareda negra. El capitán del barco murió en este incendio al permanecer en el barco hasta el último momento.



Figura 2.34. *Urquiola* remolcado (Borrás, 2008).

En esta catástrofe se derramaron 100.000 toneladas de crudo, lo que constituye una de las mayores mareas negras de la historia (Tabla 2.5). Este vertido alcanzó intensamente las rías de Betanzos, Ferrol y Ares (Figura 2.35). Además, manchas de petróleo fueron vistas en la ría de Cedeira, aunque no llegaron a tocar la costa. Cerca de 215 km de litoral quedaron afectados, tras lo que las autoridades declararon la costa coruñesa zona catastrófica.

El impacto ecológico fue muy grave, viéndose afectados caladeros y zonas de marisqueo de gran importancia. Para empeorar aun más las cosas, se emplearon dispersantes y detergentes que afectaron a medio y largo plazo a los ecosistemas marinos, haciendo que la recuperación del mar fuese más lenta. Esta actuación, en aquellos momentos (1976), era normal, pues no fue hasta unos años después, tras varios fracasos, cuando se estableció que los dispersantes afectaban considerablemente a los ecosistemas.



Figura 2.35. Limpieza de la playa de Mera (Oleiros, A Coruña) tras la marea negra del Urquiola. (Borrás, 2008)

En la costa, las tareas de limpieza se realizaron con muy pocos medios, pero se constató la efectividad de disponer diques y barreras que agrupaban el crudo y que, después podía ser fácilmente bombeado.

Andros Patria

El 31 de diciembre de 1978 el petrolero griego Andros Patria, de 218.665 toneladas de peso muerto, y que transportaba 208.000 toneladas de crudo desde el Golfo Pérsico hasta el puerto de Róterdam, sufrió una brecha de 21 metros por encima de la línea de flotación, a causa del fuerte temporal. Con motivo de evitar el peligro de marea negra para las costas gallegas, se ordena que el buque sea trasladado a alta mar, con la intención de reparar la brecha sufrida en el casco, pues las autoridades anglo-francesas prohibirían el paso del buque por el Canal de la Mancha, en las condiciones en las que se encontraba. La cantidad vertida fue de unas 47.000 t de crudo aunque no afectó mucho a la costa gallega y el remanente que quedaba en los tanques del Andros Patria se trasvasó al petrolero inglés British Promise, en mar abierto al sur de las Islas Azores.

Aegean Sea (Mar Egeo)

El 3 de diciembre de 1992 el petrolero de bandera griega Mar Egeo al realizar las maniobras de entrada en el puerto de A Coruña con condiciones climatológicas adversas, encalla y se incendia. Como resultado, el buque acaba vertiendo 67.000 de las 80.000 t de crudo que transportaba a la refinería de A Coruña.

Grandes manchas de petróleo llegan a las rías de A Coruña y Ferrol, contaminando una zona que va desde las Islas Sisargas hasta Punta do Cadro y afectando a la actividad de más de 4.000 marineros, mariscadores y acuicultores.

La reacción social es enorme, sobre todo entre la población afectada, ya que aun no se habían cobrado la totalidad de las compensaciones derivadas del accidente del Urquiola en 1976. La negociación de las compensaciones es difícil y los afectados inician acciones legales que finalizan considerando culpable del accidente al capitán. Asimismo, el Estado Español es considerado responsable civil subsidiario ya que se consideró co-responsable al práctico del puerto, empleado del Estado.

Este barco poseía doble casco por lo que estaba considerado como "Green Tanker". Había superado satisfactoriamente todas las inspecciones y revisiones a las que fue sometido. Nada hacía suponer el trágico destino de este petrolero y la catástrofe que provocaría en la costa gallega.

Para supervisar y seguir este desastre medio ambiental, se constituye el CECOP (Centro de Coordinación Operativa) en el Gobierno Civil de A Coruña, más tarde se formó el Comité Técnico de Seguimiento, con sesiones diarias para evaluar la situación y adoptar las medidas necesarias.

Se combatió la marea negra con escasos medios recogiendo el crudo sobre todo en la costa. Se desechó la utilización de dispersantes y otros medios químicos para evitar los efectos secun-



Figura 2.36. Hundimiento del Mar Egeo. (Borrás, 2008)

darios de los mismos, puesto que en la zona existe una fuerte dependencia de los recursos pesqueros. Además, la carga y el combustible que contenía aún el Mar Egeo fue recuperada.

Reflexiones

Las fechas en las que hubo accidentes graves en la costa gallega son: 1970, 1976, 1978, 1992 y 2002. Aún sin rigor estadístico, sí parece haber una cierta regularidad en los accidentes, cada 8-12 años, una gran marea negra alcanza el litoral gallego.

Si se estudian las causas de los diferentes desastres, la adversa climatología siempre está presente. Esto no es controlable, pero sí lo es la manera de actuar una vez surgida la alarma. En las ocasiones en que los barcos podían ser remolcados, siempre se ordenó su alejamiento de la costa, pero en los casos del Urquiola y del Prestige esta medida resultó de muy malas consecuencias. En el caso del Andros Patria sí resultó adecuado este modo de actuar.

La decisión de alejar los buques dañados es muy peligrosa, sobre todo en unas aguas tan tormentosas como las gallegas, pero tiene sentido desde una perspectiva a corto plazo y local, ningún puerto quiere aceptar un buque que esté vertiendo grandes cantidades de crudo, pues la ría que alberga a ese puerto se vería inexorablemente destrozada.

Esta decisión pudiera haber sido otra si se dispusiera de barreras anticontaminación y barcos de recogida de crudo en el mar, que pudiesen escoltar al petrolero dañado hasta un puerto seguro, recogiendo en la medida de lo posible, el hidrocarburo vertido. Sin embargo, los cinco barcos succionadores que más rápido acudieron a la zona del Prestige tardaron 3, 6, 9, 10 y 13 días respectivamente (EMSA, 2004). En la Figura 2.37 pueden verse las localizaciones de los peores vertidos en Europa y los lugares en los que tiene base los barcos succionadores. En esta figura se plasma directamente la escasez de medios en comparación con otros países europeos.

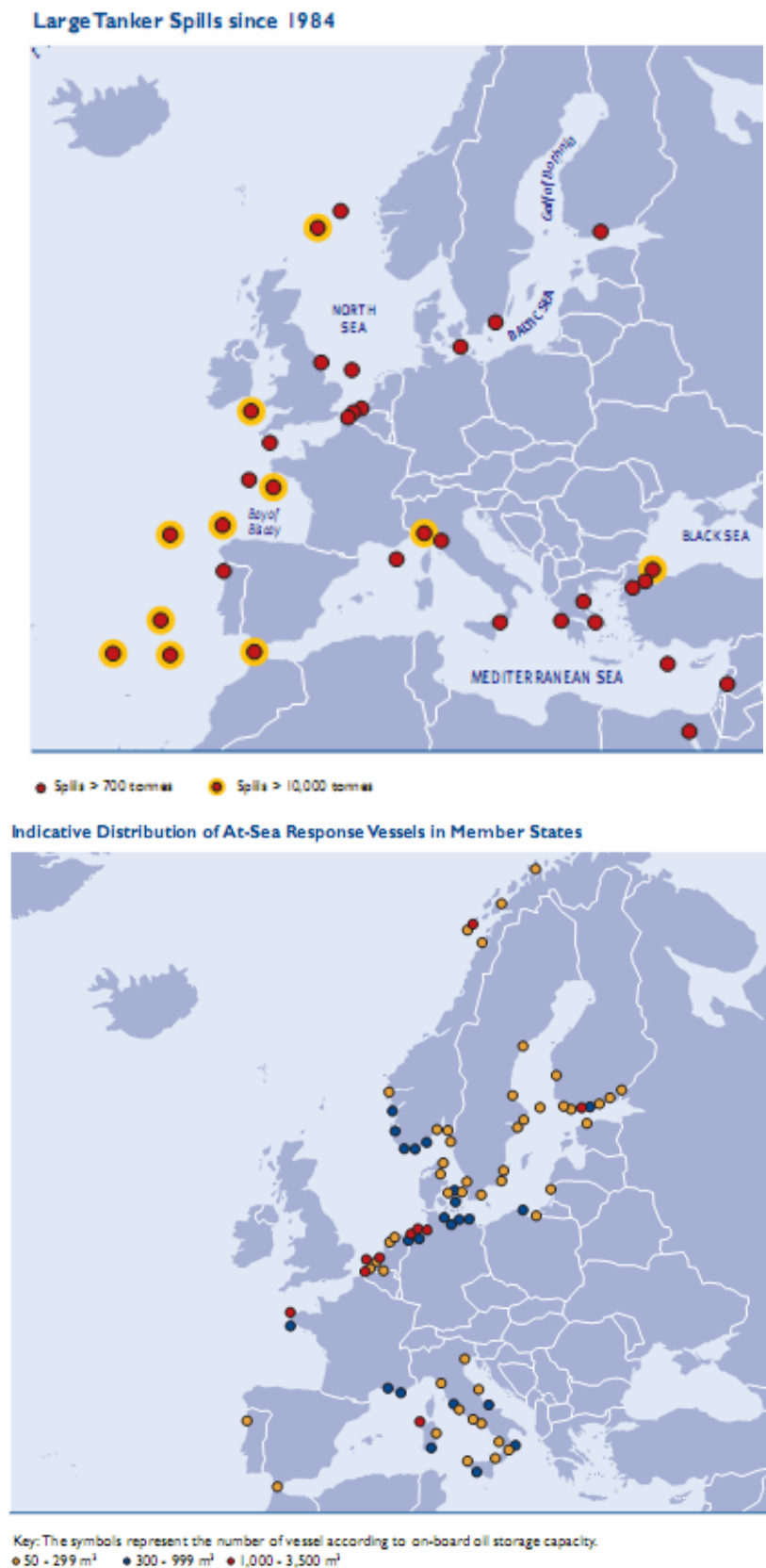


Figura 2.37. Ubicación de los principales vertidos de hidrocarburos en Europa y distribución de buques de succión (EMSA, 2004)

Esta situación ha cambiado respecto a 2002, ya que, desde 2008, A Coruña cuenta con un centro de contingencia contra la contaminación marítima, un remolcador de gran potencia y un avión anticontaminación. Está previsto asimismo que un buque anticontaminación con capacidad de succión de petróleo en el mar tenga su base en Galicia. Sin embargo, la agencia europea de seguridad marítima ha convocado cuatro veces el concurso de adjudicación de este buque, quedando desierto por ausencia de ofertas o no cumplir las presentadas con los requisitos exigidos. Adicionalmente, está previsto aumentar el número de remolcadores disponibles, aunque esta pretensión no ha sido todavía concretada. En resumen, la situación actual es mejor que la de 2002 pero no la adecuada al riesgo que padecen las costas gallegas.

2.4.9. Vertidos por limpieza ilegal de depósitos

Todos los años los océanos funcionan como autopistas por las que más de 1.600 buques petroleros transportan unos 1.500 millones de toneladas de crudo hasta las refinерías. Esto produce, en término medio, unos 25 grandes accidentes anuales de más de 700 toneladas cada uno, a los que habría que añadir muchos otros de menor cuantía. Según datos de la organización World-Watch Institute citados por OTVM (2007) en el informe “Ciencia y Prestige”, todos los años acaban en el mar entre seis y diez millones de toneladas de hidrocarburos, que se reparten en: un 10% de accidentes de petroleros, y sobre un 33% debido a la limpieza ilegal de tanques en alta mar, técnica que se conoce como “sentinazo”.

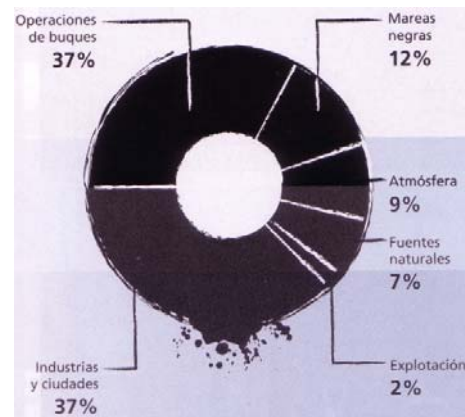


Figura 2.38. Vertidos de hidrocarburos al océano (OTVM, 2007)

Las alarmas se suelen centrar en los vertidos de gran magnitud, pero la realidad es que la limpieza ilegal de depósitos y los pequeños accidentes suman una cuantía de vertidos muy superior a la de las mareas negras. Por tanto, la responsabilidad que tienen los vertidos menores en el deterioro del medio marino es mayor que la producida por las mareas negras. Además, en el caso de Galicia, al sufrir un intenso tráfico marítimo frente a sus costas, sufre con mayor intensidad las consecuencias de esta práctica ilegal.

2.5. ACTIVIDAD INVESTIGADORA ORIGINADA POR LA TRAGEDIA DEL PRESTIGE

Tras el desastre del Prestige se produjo una intensa labor investigadora, tanto en España como en el resto del mundo. No es objetivo de este apartado realizar un inventario exhaustivo de todos

los estudios realizados a partir de la tragedia del Prestige, sino que se pretende exponer el contexto investigador en el que esta tesis doctoral se ha desarrollado.

2.5.1. Fundación Arao

Hasta su disolución, en 2009, la Fundación Arao era una organización sin ánimo de lucro que toma su nombre del Arao, un ave de pequeño tamaño que está un grave peligro de extinción en Galicia. Esta fundación se constituyó con el objetivo de canalizar y gestionar las donaciones y ayudas concedidas para paliar los efectos del hundimiento del buque Prestige y, de este modo, alcanzar la recuperación medioambiental de Galicia.

Gracias a la solidaridad de muchas personas, empresas e instituciones esta fundación recaudó una gran cantidad económica que se destinó a tres partidas: proyectos constructivos en ayuntamientos costeros afectados por el Prestige, investigación y desarrollo y, por último, apoyo a ONG's y cofradías de pesca y marisqueo.

La partida destinada a investigación contaba con un monto de 2,9 millones de euros, con los cuales la Fundación lanzó un concurso competitivo para financiar proyectos de investigación relacionadas con la catástrofe del Prestige. El Grupo de Construcción y de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente presentaron una oferta de proyecto titulado: *“El almacenamiento de los residuos de fuel del Prestige y su reciclaje como elemento de construcción”* que tenía por objetivo dar una solución a la gestión de los residuos del Prestige. Este concurso se resolvió positivamente con una dotación económica de 191.400 € y gracias a esta financiación se ha podido desarrollar esta tesis doctoral.

Sin embargo, el proyecto que dio respaldo a esta tesis doctoral no es el único de los financiados en esa convocatoria aunque sí uno de los que contaba con mayor dotación económica. En la Tabla 2.8 se detallan todos los proyectos de investigación financiados por la Fundación Arao.

Tabla 2.8. *Proyectos de investigación desarrollados con la financiación de la Fundación Arao.*

Título	Institución
Efectos sobre la salud a corto y medio plazo de la marea negra del Prestige	USC
Estudio del impacto psicosocial del vertido	USC
Almacenamiento de los residuos de fuel y su reciclaje como elemento de construcción	UDC, UPC
Estrategias de biorrecuperación del litoral. Aplicación a la playa de Sorrizo (Arteixo)	USC, Espina y Delfín
Limpieza láser como alternativa a la biorremediación en rocas	UDC
Estudio de la normativa internacional y europea en materia de seguridad marítima	UDC

Título	Institución
Implantación de un sistema de control permanente de cuantificación de derivados de los hidrocarburos en organismos marinos destinados al consumo	Consellería de Pesca
Seguimiento de los procesos de desintoxicación en mejillones cultivados en la ría de Corme-Laxe	Consellería de Pesca
Técnicas de teledetección inteligente de hidrocarburos en el medio marítimo	USC, UPM, UF II
Líneas de actuación en relación con la población del Arao Común en Galicia	SEAS, SL
Plan de vigilancia ambiental de detección y evaluación de efectos de vertido sobre las aves marítimas	ARCEA, SL
Puesta en marcha del sistema EUROCRUDE para la determinación del origen de vertidos marinos de fuel y crudos de petróleo	UDC
Censo de aves en el parque natural del complejo dunar de Corrubedo y lagunas de Carregal y Vixán	TERRANOVA, SL
Identificación, localización y cuantificación de las aves marinas presentes en las aguas de Galicia.	SEO/BIRD LIFE
Identificación y análisis del envejecimiento de los vertidos de hidrocarburos en el ecosistema marino	UDC
Estudio de las comunidades de algas bentónicas marinas intermareales más características de la Costa da Morte	UDC
Recartografiado y dinámica de poblaciones de especies de invertebrados marinos asociados a sustratos rocosos de la Costa da Morte	USC
Eliminación del naftaleno en aguas marinas contaminadas por vertidos de petróleo mediante inmovilización de bacterias degradadoras	USC
Valoración económica de las pérdidas ambientales causadas por las mareas negras	USC
Evaluación del estado ecológico de las lagunas costeras de Galicia: propuestas de conservación y uso sostenible	USC
“Proyecto Pillara”. Potenciación y estudio de la población reproductora de Chortilejo Patinegro en las playas de Galicia tras la catástrofe del Prestige	USC
Contaminación de marismas afectadas por la marea negra del Prestige: evaluación y el seguimiento del impacto y recuperación de suelos y vegetación	UNIVIGO
Dinámica y sostenibilidad en la Costa de Ribadeo	Concello de Ribadeo
Cara a una herramienta efectiva y estándar para evaluar los impactos de las mareas negras sobre las poblaciones de aves marinas en la Unión Europea	USC
Diseño de la red ambiental en la Costa da Morte. Itinerarios ecológicos	USC
El efecto de la monitorización, legislación y sanciones económicas en la prevención de las mareas negras	USC
Diseño y aplicación de indicadores de sostenibilidad y la producción y comercialización del mejillón en Galicia	USC

2.5.2. Colaboración con la empresa SOGARISA

Durante el desarrollo de los trabajos del proyecto “El almacenamiento de los residuos de fuel y su reciclaje como elemento de construcción” se estableció una estrecha colaboración entre el equipo investigador de la Universidad de A Coruña y de la Universitat Politècnica de Catalunya con la empresa SOGARISA, ya que ésta era la empresa encargada de gestionar el tratamiento de los residuos del Prestige.

Pese a los resultados que obtuvimos durante el desarrollo de este trabajo, que veremos más adelante, la decisión relativa al tratamiento final consideró una aproximación completamente distinta. Así, el tratamiento final al que se sometieron los residuos del Prestige fue un tamizado húmedo a alta temperatura, similar al empleado en el lavado de suelos. Para poder aplicar este proceso fue necesaria la construcción de costosas instalaciones y un gran esfuerzo económico, muy superior a lo que habría supuesto el empleo de técnicas de estabilización y reciclado como las que proponemos en nuestro trabajo.

2.5.3. Proyectos financiados por la Administración española

La fundación Arao no fue la única que financió proyectos de investigación relacionados con el Prestige, otros organismos, tanto regionales como estatales financiaron también importantes proyectos de investigación sobre el mismo desastre.

Tabla 2.9. *Proyectos de Investigación de importancia realizados tras el desastre del Prestige. (OTVM, 2007)*

Titulo del Proyecto	Centro	Lugar
Estudio de la viabilidad técnica de la extracción con gases en condiciones supercríticas para la obturación de fugas	Instituto de Tecnologías Sectoriales	Madrid
Determinación y valoración de riesgos geoambientales en el área de hundimiento del buque Prestige: estudio sedimentológico, geotécnico y de las propiedades físicas	Instituto de Ciencias del Mar (ICM)	Cataluña
Distribución, evolución y efectos del fuel-oil en el litoral afectado por el vertido del Prestige. Subproyecto 1	Centro de investigación y desarrollo (CID)	Cataluña
Aislamiento y caracterización molecular de bacterias reductoras de Fe (III) capaces de biodegradar compuestos aromáticos a partir de sedimentos contaminados con petróleo	Centro de Investigaciones Biológicas	Madrid
Búsqueda, identificación y caracterización de microorganismos marinos tolerantes a disolventes orgánicos con capacidad de degradar fenantreno y antraceno	Estación experimental de El Zaidin (CSIC)	Andalucía
Impacto y biomonitorización del fuel vertido del Prestige en las costas de Galicia en el potencial reproductor del pulpo común (<i>octopus vulgaris</i>)	Instituto de Investigaciones Marinas (IIM)	Galicia
Impacto del vertido de hidrocarburos del Prestige sobre la red trófica microbiana planctónica	Instituto de Investigaciones Marinas (IIM)	Galicia
Efectos de hidrocarburos contaminantes sobre comunida-	Instituto de Ciencias	Cataluña

Título del Proyecto	Centro	Lugar
des zooplanctónicas marinas	del Mar (ICM)	
Las aves marinas como bioindicadoras espacio-temporales de contaminación por el vertido del buque Prestige en el litoral gallego	Institut Mediterrani D'estudis Avançats (IMEDEA)	Baleares
Evaluación del impacto de los vertidos del Prestige sobre el ecosistema de la plataforma y sus recursos pesqueros. Biología de los recursos.	Instituto de Investigaciones Marinas (IIM)	Galicia
Bioacumulación y evaluación de los efectos del vertido del Prestige en el cultivo de mejillón	Instituto de investigaciones marinas (IIM)	Galicia

2.5.4. Publicaciones relacionadas con el Prestige

El desastre y la marea negra del Prestige ha generado una importante producción científica de alto nivel, esto se debe a que España ha promovido la investigación en torno al Prestige con ayudas económicas y también ha apoyado muchos proyectos que trataban temas de contaminación marítima.

Para dar una idea del desarrollo investigador relacionado con el Prestige se han realizado dos búsquedas bibliográficas genéricas, una en Dialnet y otra en la ISI Web of Knowledge, pudiéndose observar un gran número de entradas resultantes.

Tras buscar la palabra “Prestige” en Dialnet, un portal de difusión de la producción científica en español, se obtuvieron un total de 404 resultados de artículos, comunicaciones en congresos, etc.

De mayor relevancia científica es la búsqueda en el "Web of Knowledge" de la editorial Thomson Scientific, que permite buscar en todas las publicaciones indexadas a nivel mundial. En este contexto de publicaciones revisadas por pares, se realizó la búsqueda “Prestige”&”oil spill” obteniéndose 270 entradas.

Además de artículos científicos se escribieron varios libros, tanto de carácter investigador como divulgativo que se pueden ver en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Libros publicados en referencia al desastre del Prestige. (OTVM, 2007).

Título de la publicación	Autores	Editorial y Año
Desarrollo y aplicación de modelos y sistemas integrados ALERMAC y SAMM para la predicción del comportamiento de derrames superficiales de hidrocarburos en el medio marino y de los procesos de transformación del vertido	Gabriel Winter Althaus y Blas Galván González (IUSIANI-ULPGC)	Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones, 2008
Evaluación de la contaminación y sus efectos sobre los sistemas marinos y litorales y la salud humana		Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones, 2008
Ciencia&Prestige. La investigación desarrollada a partir del accidente del Prestige. Volumen mo-	Oficina Técnica de Vertidos Marinos (Univ. Vi-	Oficina Técnica de Vertidos Marinos

Título de la publicación	Autores	Editorial y Año
nográfico sobre el Prestige publicado por la Comisión de Coordinación Científica de la Acción Estratégica del MEC sobre el accidente y vertido del buque Prestige.	go), Comisión de Coordinación Científica y Dirección General de Investigación (MEC).	(Univ. Vigo), 2007
¿Qué aprendimos de la catástrofe del Prestige?	J. M. Garrido, J. M. Lema	Fundación Arao, 2007
Accidente del B/T 'Prestige'	J.M. Castellano Couro, J.I. Gómez Gómez & E. García Melón	Departamento Ciencias y Técnicas de la Navegación, Universidad de La Laguna, 2003
Actuaciones a desarrollar en caso de un vertido de hidrocarburos		Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones, 2006
Contaminación marina en el caso del Prestige	Elena González Guerra	Departamento Ciencias y Técnicas de la Navegación, Universidad de La Laguna, 2005
Contaminación de las playas por derrame de hidrocarburos. Influencia de la dinámica marina.		Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones del BOE, 2006
Coordinación do voluntariado no litoral galego: caso Prestige	Consellería de Familia, Xuventude e Voluntariado	Xunta de Galicia, 2003
Efectos económicos, sociais e ambientais das mareas negras do Prestige (edición bilingüe gallego-inglés)	A. Prada & M. X. Vázquez	Consello da Cultura Galega, 2004
El impacto del Prestige. Análisis y evaluación de los daños causados por el accidente del Prestige y dispositivos para la regeneración medioambiental y recuperación económica de Galicia	F. González Laxe	Fundación Pedro Barrié de la Maza, 2003
Estudios sobre el régimen jurídico de los vertidos de buques en el medio marino	J.L. Meilán Gil	Aranzadi, 2006
Impacto de la marea negra del Prestige sobre las aves marinas	L. García Peteiro, C. Viada Sauleda & R. Moreno-Opo Díaz-Meco	Sociedad Española de Ornitología, 2003
La huella del fuel: ensayos sobre el Prestige		La Voz de Galicia, S.A., 2003
Las lecciones de la catástrofe del Prestige		Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2006
Prestige, a forza dos feitos : relato e primeira análise de cómo se encorou o accidente.		Xunta de Galicia, 2004
Problemas jurídico-administrativos planteados por el Prestige.	José Luis Meilán Gil	Aranzadi S.A., 2004
¿Qué foi do Prestige?. Balance ecolóxico e social sobre as causas e efectos do afundimento do Prestige	J. Cabrera & A. García-Allut	Sotelo Blanco, 2003
Responsabilidad civil por contaminación marina	M.I. Huerta Viesca & D.	Universidad de Oviedo

Título de la publicación	Autores	Editorial y Año
por vertido de hidrocarburos. A propósito del Prestige.	Rodríguez Ruiz de Villa	do, 2004
Seguridad marítima y medio ambiente	M. García Pérez & J. Sanz Larruga	Netbiblo, 2006

Capítulo 3. Estado del Conocimiento

3.1. INTRODUCCIÓN

La marea negra del *Prestige* no ha sido la primera que sufre el litoral gallego, al igual que un buen número de zonas costeras de todo el mundo que también se han visto afectadas por vertidos de muy diversa escala. Todo ello ha contribuido a enriquecer una amarga experiencia que, al irse acumulando, ha permitido abordar las nuevas catástrofes con nuevas herramientas técnicas, científicas, legales,...

Debiéramos esperar que, de cada uno de estos tristes episodios, la enseñanza útil para el futuro nos ponga en mejor disposición para afrontar estos problemas. Sabemos, no obstante, que esto no ha sido siempre así y Galicia ha debido pagar un grave tributo por ello.

No es el objetivo de este capítulo el realizar un balance exhaustivo de las experiencias pasadas en cuanto a lucha contra mareas negras se refiere. Sin embargo, sí se busca identificar los métodos existentes para el tratamiento de residuos de mareas negras.

La perspectiva de la investigación debe ser lo bastante amplia como para contribuir al binomio conocimiento/experiencia no sólo desde el análisis de los hechos pasados, de la caracterización de los materiales o de su eventual aplicación con distintos fines. Es por ello que también se han incluido sugerencias sobre elementos de mejora que sirvan para el establecimiento de un protocolo práctico de actuación ante otra, temida e indeseada, catástrofe ecológica.

El Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC, 2002a) ha realizado una exhaustiva búsqueda bibliográfica sobre el tema “vertido de petróleo” dentro de las publicaciones indexadas por el Science Citation Index entre 1989 y el primer trimestre de 2002. Dicha síntesis ha sido recogida en una base de datos electrónica de libre disposición por los investigadores que incluye un total de 579 registros asociados a otras tantas citas bibliográficas.

Por otro lado, se ha abordado también una exhaustiva búsqueda bibliográfica a través de INTERNET en la que hemos considerado diversos criterios de búsqueda, centrándonos en particular en el aspecto de la gestión de residuos procedentes de mareas negras.

Tomando como punto de partida la recopilación del CSIC así como nuestra exploración en INTERNET hemos extraído una serie de interesantes conclusiones:

- Existe una bibliografía muy extensa relativa al impacto de los vertidos de hidrocarburos en los ecosistemas marinos y litorales así como de sus distintos integrantes (vegetales, moluscos, peces,...)
- Existe una amplia documentación relativa a sistemas remotos (teledetección) para el seguimiento de manchas por vertido de hidrocarburos vía satélite.
- En los pasados quince años se han desarrollado un buen número de métodos analíticos para la detección de la contaminación de aguas por vertido de hidrocarburos.
- Se ha avanzado de forma significativa en el conocimiento de metodologías y estrategias de tratamiento de ecosistemas empleando técnicas de biodegradación/bioregeneración con microorganismos.
- Hay una amplia experiencia documentada en cuanto a sistemas para la lucha contra los vertidos en el mar, en la costa así como de tecnología para la limpieza de arenales, marismas y costas rocosas.
- Se han realizado numerosos estudios relativos a la longevidad y persistencia de los hidrocarburos en los ecosistemas afectados.
- Existe un importante conocimiento (tanto a nivel teórico como computacional) en cuanto a la simulación del comportamiento, transporte y dispersión de las manchas de contaminación por hidrocarburos en el mar.
- Se ha realizado un sinnúmero de estudios sobre la legislación vigente relativa al tráfico marítimo internacional, seguridad en el transporte marítimo, responsabilidad,... así como sobre sugerencias de mejora de la misma.
- Existen numerosos estudios e informes auspiciados por diversas agencias, organismos y fundaciones relativos a los impactos sociológico, económico y medioambiental de los vertidos de hidrocarburos.

Es reseñable que, por comparación con lo variado y amplio de la bibliografía de que podemos disponer, la documentación relativa a la gestión de los residuos de vertidos por hidrocarburos es prácticamente inexistente. Es cierto que ello constituye un handicap dado que la experiencia previa de otros investigadores no puede ser aprovechada. Sin embargo, la ausencia

de información para un investigador también constituye un importante estímulo en la medida que los resultados previsibles serán, en cualquier caso, novedosos.

3.2. EXPERIENCIAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS DEL PRESTIGE

Pese a lo expuesto hasta ahora, a resultas del hundimiento del *Prestige* diversas instituciones acometieron la realización de ensayos de tratamiento de los residuos a fin de facilitar su manipulación, almacenamiento y disposición final. A continuación se resumen los resultados más relevantes alcanzados en los mismos.

3.2.1. Experiencias Desarrolladas por el CIEMAT

El Centro de Investigaciones Energéticas y Medioambientales (CIEMAT) ha estado en la punta de lanza de la investigación aplicada a paliar los efectos del vertido del *Prestige*. Algunos de sus investigadores han desarrollado diversas acciones, de entre las cuales se han seleccionado aquellas más relacionadas con el objeto de nuestro estudio: los residuos.

Los trabajos del CIEMAT relacionados con la gestión de los residuos se han centrado en la mezcla de fuel del *Prestige* con diversos materiales naturales: arcillas sepiolíticas y carbón. A continuación resumimos sus experiencias.

Los ensayos realizados en el CIEMAT pretendían determinar la capacidad aglomerante de ciertos materiales en relación con el fuel del *Prestige*. Su finalidad era doble:

- Facilitar la manipulación del fuel recogido en el océano.
- Incrementar su densidad a fin de propiciar su hundimiento dentro del seno de la columna de agua, hasta alcanzar el fondo oceánico.

Ninguno de estos dos planteamientos es adecuado para el presente estudio y tampoco los materiales empleados presentan analogías directamente aprovechables. No obstante, estos estudios aportan información útil desde el punto de vista experimental y además sugieren vías alternativas para la recuperación de fuel del agua de mar.

3.2.1.1. Mezcla de Fuel con Arcillas Sepiolíticas

Agüero et al. (2003) describen ensayos de aglomeración de fuel con sepiolita. Este material es un filosilicato trioctaédrico (del grupo de la arcilla) con una elevada superficie específica (~200 m²/g) y baja reactividad. Su uso con fines industriales está muy extendido desde los años 40 y, entre sus aplicaciones destaca su alta capacidad como absorbente de líquidos, aceites y grasas, así como para el tratamiento de residuos. Es un mineral hidrófilo, lo cual puede ser un problema para la recogida de fuel en el mar.

En una primera aproximación, los investigadores del CIEMAT identificaron como primera dificultad en la mezcla fuel/sepiolita la alta viscosidad del primero a la temperatura del agua. Por analogía con el medio marino, las condiciones del ensayo se establecieron en 13 °C. Para que la absorción de la sepiolita fuera eficaz sería preciso calentar la propia sepiolita o el fuel hasta reducir la viscosidad suficientemente lo cual se consideró viable a escala del laboratorio pero inviable en su aplicación práctica.

Por otro lado, los investigadores consideraron que la eventual absorción del fuel por la sepiolita incrementaría la densidad de la mezcla y favorecería su hundimiento. Sin embargo, la viscosidad del fuel condiciona que el embebido sea parcial por lo que el aumento de densidad no es lo bastante significativo como para considerar el procedimiento como práctico.

No obstante lo anterior, los ensayos realizados han permitido identificar un cierto efecto aglutinante para determinadas dosificaciones y granulometrías por parte de este mineral.

En resumen, Agüero et al. (2003) concluyen que:

- La sepiolita no constituiría un material eficaz para garantizar el hundimiento del fuel del Prestige en la columna de agua como resultado del aumento de densidad de la mezcla.
- Para determinadas dosificaciones y granulometrías, la mezcla de fuel y sepiolita tiende a formar grumos (aglutinación), disminuyendo la marcada adhesividad del fuel y facilitando, por tanto, su manipulación con distintas herramientas.
- De acuerdo con sus propiedades absorbentes, la sepiolita sería susceptible de retener gases resultantes de hidrocarburos que presenten una elevada presión de vapor.



Figura 3.1. Adición de la sepiolita a la mancha de fuel
(Agüero et al. 2003)

3.2.1.2. Mezcla de Fuel con Carbón

En los estudios de García Frutos et al (2002a, b) no se emplea sepiolita, sino carbón vegetal, el cual tiene un carácter hidrófobo por lo que la absorción de agua por parte del mismo no constituye un problema reseñable en el proceso de aglomeración. Más aún, es de prever que las carac-

terísticas eléctricas superficiales de las partículas de carbón y de las micelas de hidrocarburo que conforman el fuel se comporten de modo complementario, facilitando la impregnación.

El estudio de García Frutos et al. (2002a, b) señala que en el proceso de flotación industrial de carbón para su enriquecimiento emplean como fluido de recuperación fuel oil ligero o queroseno. Tomando esta información como punto de partida, los investigadores propusieron la realización de una serie de ensayos de impregnación/aglomeración con hulla y, más tarde, con carbón vegetal. Los ensayos realizados con agitación orbital demostraron que estos dos materiales son eficaces a la hora de aglomerar volúmenes de fuel considerables.

3.2.2. Experiencias Desarrolladas por la Universidad de Santiago de Compostela

La empresa CEDIE (Ángel Méndez García), el Departamento de Edafología y Química Agrícola de la USC (M^a Yudani Pousada Ferradás, Francisco Quiroga Lago y Avelino Núñez Delgado, de la Escuela Politécnica Superior de Lugo) y la empresa AGROAMB, especializada en la gestión de residuos, desarrollaron un proyecto de investigación para inertizar y promover su posterior reutilización en la revegetación de zonas de acumulación de residuos estériles de centrales térmicas y minas. Para ello contaron con una ayuda del Programa de Biodiversidade e Recursos Forestais del Plan Galego de I+D+i.

Para conseguir la inertización del residuo, se recogieron muestras de fuel procedentes de las balsas de la empresa PMA de Laracha. Posteriormente, en un estudio preliminar para avalar la viabilidad del proyecto, se realizaron operaciones de mezclado de las muestras de chapapote con uno o más materiales, residuales o no, recogidos para el proyecto: cenizas de combustión de biomasa de empresas madereras gallegas, lodos rojos de bauxita procedentes de ALCOA, lodos de empresas pizarreras gallegas, cenizas de combustión procedentes de la central térmica de Meirama, lodos calizos y caliza en polvo, y cales convencionales de la empresa CEDIE (cal viva y dolomía calcinada).

Los resultados obtenidos del estudio fueron positivos e indican que la mezcla del chapapote con algunos de estos materiales permiten la transformación del residuo de fuel en productos sólidos, de fácil manejo y almacenamiento y que reducen los olores desagradables. Los resultados más adecuados parecen corresponder a los siguientes porcentajes de mezcla: 40% de fuel emulsionado y 60% de cal viva, o 55% de fuel y 45% de dolomía calcinada.

Asimismo, las primeras pruebas de germinación de herbáceas sobre sustratos constituidos por mezclas de fuel inertizado y un cierto porcentaje de estériles de combustión de la central térmica de Meirama indicaron que era factible el crecimiento y desarrollo de vegetales sobre esos medios porosos.

3.2.3. Experiencias Desarrolladas por SOGARISA

SOGARISA, la Sociedad Gallega de Residuos Industriales, es la empresa responsable de la gestión del Centro de Tratamiento y Eliminación de Residuos Industriales de Galicia (CTRIG) y ha sido la encargada del reciclaje de los residuos de fuel del Prestige. Hay que destacar que, en los primeros momentos de retirada del vertido, los residuos materiales fueron almacenados transitoriamente en balsas situadas en los municipios de Cerceda (dentro de la explotación de Lignitos de Meirama, S.A.), A Laracha (en la antigua explotación de arcillas de Lendo, propiedad de la empresa Protección Medio Ambiental, PMA) y As Somozas (en las propias instalaciones de SOGARISA y en el vertedero aledaño de Areosa).

A lo largo del año 2005, la práctica totalidad del material fue trasladado al CTRIG, a la espera de la puesta en marcha del protocolo final de gestión. De ese modo, los materiales almacenados en el CTRIG (empleados en este estudio) se encontraban localizados en dos balsas adecuadamente impermeabilizadas (una de ellas con una cubierta metálica para impedir la incorporación de aguas de lluvia a los residuos).

El aspecto del material contenido en las balsas es el de una mezcla de materiales de color gris/marrón en la que pueden observarse el fuel, agua, arena y piedras, arcillas, trozos de herramienta, troncos, contenedores de limpieza y restos de trajes de limpieza. La mezcla, a excepción de los puntos en los que aparecen grandes objetos, es bastante homogénea aunque puede observarse la existencia de embalses de agua en la superficie. La estimación hecha por SOGARISA de la composición del residuo sería de ~10% de fuel, 40~50 % material de limpieza y 40~50 % de agua/arena, en partes aproximadamente iguales (en peso).

En los laboratorios del CTRIG se desarrollaron una serie de experiencias que resumimos a continuación.

Se realizaron mezclas de fuel (obtenido de fracciones de residuo sin material de limpieza ni arena) y cal viva para obtener un producto inerte, de más fácil manejo y susceptible de ser almacenado en terraplenes estables y, por tanto, capaz de resistir un cierto nivel de cargas. Las mezclas que dieron mejores resultados estaban constituidas por fuel y cal a partes iguales 50:50. El proceso de mezclado se realizó mediante una pequeña retroexcavadora, capaz de desarrollar la potencia suficiente para vencer la viscosidad del fuel. El producto resultante es un material pulverulento, de tono ocre, sobre el que se realizaron ensayos de lixiviación según la norma alemana DIN-38414. Los ensayos fueron satisfactorios.

Los técnicos de SOGARISA, no obstante, tenían dudas acerca de la estabilidad del material generado. Percepciones no contrastadas les habían sugerido la posibilidad de que bajo determinadas condiciones de presión y temperatura el fuel pudiese separarse de la mezcla en un proceso de fluidificación. Los rangos que manejaron corresponderían a presiones de cerca de 2

kp/cm² (unos 15-17 m de altura de terraplén) combinadas con temperaturas de entre 35 y 40 °C. Esta circunstancia, de confirmarse, invalidaría el destino del material generado por la colmatación que provocaría en los drenes y filtros de las zonas de terraplén.

Para clarificar este extremo se les propuso trabajar conjuntamente, realizando nuevas mezclas con otras dosificaciones fuel/cal, y realizando ensayos geotécnicos, en las condiciones térmicas adecuadas, de compactación y resistencia: ensayo edométrico, próctor normal, próctor modificado, corte directo, compresión simple y CBR.

3.3. TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN DE RESIDUOS

Para encontrar posibles métodos de gestión de residuos del fuel del Prestige se puede recurrir a una valiosa fuente de información: las investigaciones sobre el tratamiento de residuos similares. Existen muchas experiencias de solidificación y/o estabilización de residuos de este género a través de ligantes diversos, especialmente ligantes de tipo hidráulico. Estas técnicas pretenden, en el ámbito de esta investigación, dar un paso más allá produciendo materiales aprovechables y no sólo generando un residuo estable para su depósito definitivo en vertedero.

La solidificación/estabilización (S/E) es un tratamiento muy aplicado en la gestión de un amplio rango de residuos, particularmente los clasificados como peligrosos. Se emplea desde 1950, siendo una de sus primeras aplicaciones la solidificación de residuos radiactivos. S/E sigue siendo la piedra angular de entre los tratamientos sobre residuos peligrosos y como técnica de remediación ambiental. La americana Environmental Protection Agency (EPA, 2003) considera la S/E como una tecnología perfectamente establecida, y probablemente la de mejor y más demostrada utilidad en la lista de 57 residuos del Resource Conservation and Recovery Act (RCRA). La técnica S/E puede ser usada para eliminar la condición peligrosa del residuo, permitiendo un vertido menos costoso del residuo tratado. En el catálogo de puntos del CERCLA (Comprehensive Environmental Response, Compensation & Liability Act), aparece como el método más empleado (en el 30% de los casos), tanto en suelos, lodos, como en sedimentos, para las distintas variedades de contaminantes orgánicos o inorgánicos y en tratamientos tanto in situ como ex situ.

Aunque los términos solidificación y estabilización parezcan similares, describen diferentes mecanismos de inmovilización de los contaminantes peligrosos. La solidificación se refiere a los cambios en las propiedades físicas de un residuo que suelen comportar un aumento de la resistencia a compresión, un descenso de la permeabilidad y una encapsulación de los contaminantes. La estabilización, sin embargo, introduce cambios químicos en tales contaminantes, siendo los más deseables los que los convierten en menos solubles, móviles o tóxicos. Los procesos S/E implican la mezcla de un agente aglutinador en el residuo. Entre las posibilidades se

encuentran las siguientes: cemento Pórtland, polvo de horno de cemento (CKD, cement kiln dust), cal, polvo de horno de cal (LKD, lime kiln dust), piedra caliza, cenizas volantes, escorias, yeso y mezclas fosfatadas, y un determinado número de elementos patentados (CHEMFIX, PETRIFIX,...). Dada la gran variación de residuos, las mezclas deben adecuarse en cada caso mediante ensayos. La mayoría de ligantes son los inorgánicos apuntados, aunque existen en algunos casos posibilidades de utilizar agentes orgánicos (betunes, termoplásticos, urea-formaldeídos, etc.) de más raro uso y mucho más caros.

3.3.1. Principios del tratamiento de estabilización/solidificación con cemento

El cemento Portland es un material genérico empleado en la construcción. Es un versátil agente S/E capaz de estabilizar y solidificar una gran variedad de residuos o suelos contaminados (EPA, 1993 y EPA, 2000).

Las mezclas de base cemento han sido aplicadas en numerosas ocasiones ya que el cemento, mediante modificaciones físico-químicas: es capaz de ligar líquidos; reduce la permeabilidad del residuo; encapsula las partículas de residuo con una capa impermeable; fija constituyentes peligrosos reduciendo su solubilidad y reduce la toxicidad de algunos contaminantes. Estas capacidades suelen darse tanto en residuos orgánicos como inorgánicos. El cemento puede incorporar aditivos: las cenizas volantes aportan su efecto puzolánico (reacción con el hidróxido cálcico del cemento hidratado para producir silicatos cálcicos hidratados en presencia de agua); los CKD y las escorias tienen propiedades cementantes de menor reactividad, pero pueden reducir costes; las cales y los LKD pueden ajustar el pH o eliminar el agua dado su alto calor de hidratación. La piedra caliza suele emplearse para ajustar el pH y las variaciones de volumen.

Tratamiento de líquidos: No está permitido hacer vertederos de líquidos, ya que deben estar dentro de un contorno químicamente resistente. S/E puede emplearse para posibilitar el uso del vertedero de sólidos. La reacción con el cemento provoca la solidificación del residuo, y suele ser una prueba de suficiente fijación al alcanzar una resistencia de 0.34 MPa.

Tratamiento de contaminantes inorgánicos: Los casos más habituales corresponden al tratamiento de metales pesados. Su peligro radica en la facilidad de lixiviación, que combate con éxito el proceso S/E. El cemento reduce la movilidad de los contaminantes por: formación de hidróxidos insolubles, carbonatos o silicatos, sustitución del metal en una estructura mineral y encapsulado físico. S/E puede incluso reducir la toxicidad de algunos metales por modificación de su estado de valencia.

Tratamiento de contaminantes orgánicos: La acción del cemento suele ceñirse a su capacidad solidificadora. Ello implica una modificación física que incluye: consumo del agua del

residuo como parte de la necesaria para hidratar el cemento, creación de un residuo con una mayor integridad estructural, a la manera de un granulado sólido, y reduciendo la permeabilidad del residuo. Las siguientes imágenes (Figura 3.2) muestran dos tipos de contaminantes “atrapados” por el ligante.

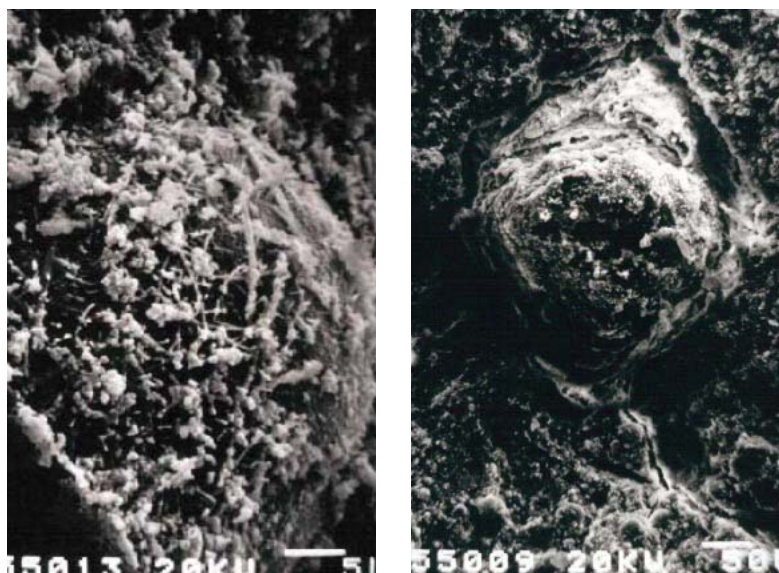


Figura 3.2. Contaminantes atrapados por el ligante de base cementosa. Fotografías tomadas a partir de imágenes generadas en un microscopio electrónico de barrido. La barra horizontal en la esquina inferior derecha de las fotografías permite identificar su escala (50 μm)

Los tratamientos S/E de base cemento son efectivos en una amplia variedad de componentes peligrosos, incluyendo los halogenados y no halogenados semivolátiles y no volátiles, policlorados bifenílicos (PCBs), pesticidas, cianuros orgánicos y orgánicos corrosivos (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Efectividad del tratamiento S/E sobre distintos contaminantes (EPA, 1993)

	Grupos contaminantes	Efectividad del tratamiento S/E de base cemento
Orgánicos	Halogenados volátiles	Efectividad no esperable
	No halogenados volátiles	Efectividad no esperable
	Halogenados semivolátiles	Efectividad demostrada
	No halogenados semivolátiles y no volátiles	Efectividad demostrada
	PCBs	Efectividad potencial
	Pesticidas	Efectividad potencial
	Dioxinas / Furanos	Efectividad potencial
	Cianuros orgánicos	Efectividad potencial
	Corrosivos orgánicos	Efectividad potencial

Inorgánicos	Metales volátiles	Efectividad demostrada
	Metales no volátiles	Efectividad demostrada
	Asbestos	Efectividad demostrada
	Materiales radiactivos	Efectividad demostrada
	Corrosivos inorgánicos	Efectividad demostrada
	Cianuros inorgánicos	Efectividad demostrada
Reactivos	Oxidantes	Efectividad demostrada
	Reductores	Efectividad demostrada

El tratamiento de algunos contaminantes orgánicos puede requerir atención especial. Concentraciones altas de aceites y grasas (> 20 %) pueden reducir la hidratación del cemento ya que sus granos se recubren de esos elementos. Ello conlleva tiempos de fraguado muy altos, a veces ilimitados, por lo que deben realizarse los ensayos correspondientes o estudiar posibles aditivos que eviten estas situaciones.

Algunos ligantes como la cal viva producen un alto calor de hidratación cuando se combinan con el agua, en una reacción típicamente exotérmica y veloz. Ello puede causar la diseminación de algunos volátiles u otros compuestos de los PCBs. En esos casos deben tomarse las precauciones, activas o pasivas, oportunas para evitar intoxicaciones.

3.3.2. Experiencias de la EPA

La Environmental Protection Agency (EPA) norteamericana hace un resumen de las más importantes actuaciones de tipo S/E (EPA, 2000). Los gráficos siguientes sirven de resumen a estas actuaciones, destacando el tipo de ligante principal empleado y el tipo de residuo estabilizado.

Tipos de ligante empleados (Tabla 3.2 y Figura 3.3):

Tabla 3.2. *Tipos de ligante empleado en la estabilización de residuos con hidrocarburos y nº de proyectos desarrollados con cada uno de ellos. (EPA, 2000)*

Ligante o Reactivo	Nº de proyectos
Cemento	47
Reactivos propios	22
Fosfatos	14
Reguladores del pH	12
Cenizas volantes	10
Cal	10
Azufre	4
Asfaltos	1

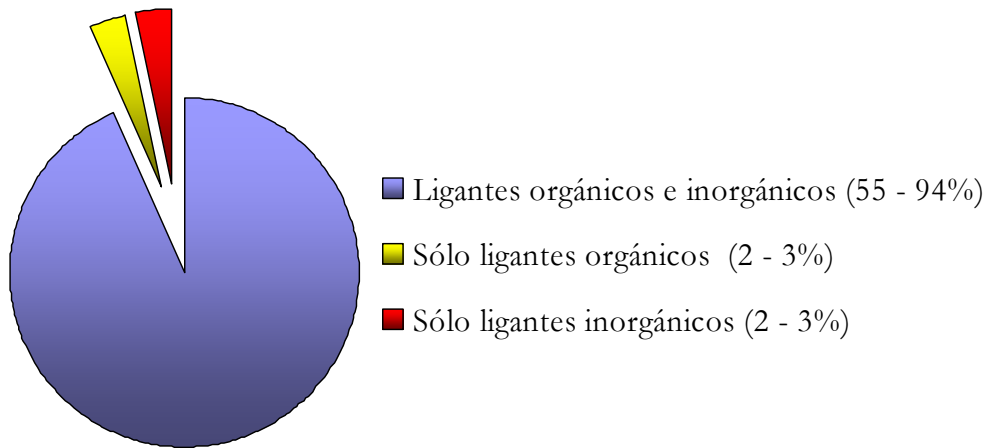


Figura 3.3. Distribución del nº de proyectos de estabilización/solidificación financiados por la EPA norteamericana, clasificados de acuerdo con el agente ligante o reactivo. Los ligantes inorgánicos consisten en cemento, cenizas volantes, cal, silicatos solubles o azufre. Los ligantes orgánicos son asfaltos, arcillas con alto contenido orgánico o carbón activado. Fuente: EPA

Tipos de contaminante tratados (Figura 3.4)

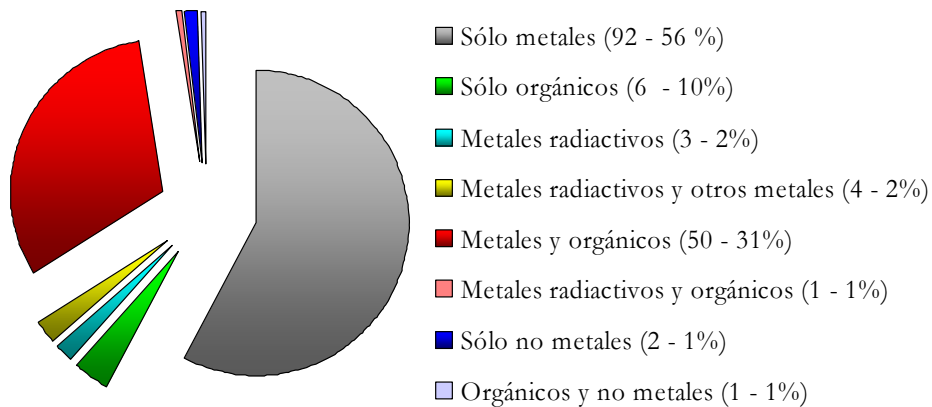


Figura 3.4. Distribución del nº de proyectos de estabilización/solidificación financiados por la EPA norteamericana. No se hace mención explícita del rendimiento alcanzado por la tecnología empleada en la estabilización/solidificación del residuo. Los ligantes inorgánicos consisten en cemento, cenizas volantes, cal, silicatos solubles o azufre. Los metales son metales pesados. Los orgánicos son asfaltos, arcillas con alto contenido orgánico o carbón activado. Fuente: EPA

3.3.3. Experiencia de Valls de la Universitat Politècnica de Catalunya

Una experiencia más es la de Valls (1999), que colaboró en el desarrollo del proyecto de investigación que subyace a este trabajo. Esta investigadora trabajó en procesos S/E sobre lodos de depuradora. Para ello realiza una estabilización con cemento, combinado en ocasiones con ceniza volante y, en otras, con cloruro cálcico. Con estas mezclas consigue fabricar hormigones, incorporando en ellos áridos reciclados procedentes de demolición. La Tabla 3.3 resume las dosificaciones empleadas y las resistencias obtenidas.

Tabla 3.3. Dosificaciones empleadas y resistencias obtenidas en la inertización de lodos de depuradora. (Valls, S., 1999)

	Sludge/binder	Water (g) ^b	Sludge (g)	Cement (g)	Sand (g)	Additive	Com. Strength MPa (28 days)
(1) CM25A	1:1	62	450	450	900		14.45
(2) CM25A + ad	1:1	62	450	450	900	CaCl ₂	17.0
(3) CM25B	1:1	72	500	500	1000		13.83
(4) CM25B + ad	1:1	72	500	500	1000	CaCl ₂	16.44
(5) CM35A	1.4:1	65	630	450	720		6.20
(6) CM35A + ad	1.4:1	65	630	450	720	CaCl ₂	7.2
(7) CM35B	1:1	34	700	700	600		14.1
(8) CM35B + ad	1:1	34	700	700	600	CaCl ₂	16.25

	Sludge/binder	Water (g) ^b	Sludge (g)	Cement (g)	Sand (g)	Fly ash	C. strength MPa (28 days)
(9) CM25L5CV	1:1	90	500	475	1000	25	8.3
(10) CM25L10CV	1:1	90	500	450	1000	50	9.3
(11) CM25L15CV	1:1	90	500	425	1000	75	9.12
(12) CM25L25CV	1:1	90	500	375	1000	125	8.47
(13) CM35L5CV	1:1	90	700	665	600	35	8.30
(14) CM35L10CV	1:1	90	700	630	600	70	7.9
(15) CM35L15CV	1:1	90	700	595	600	105	7.12
(16) CM35L25CV	1:1	90	700	525	600	175	5.34

^a And compressive strength values.

^b The amount of water is the water added to the mix without counting the water contained in the sludge. The sludge moisture content was 68%.

Los ensayos de lixiviación se realizan según los ensayos NEN7341 y NEN7345, más estrictos que el DIN38414-S4, verificándose para todas las muestras el cumplimiento de la normativa holandesa.

3.4. ESTABILIZACIÓN DE RESIDUOS DE CRUDO

A lo largo de los años se ha ido acumulando una cierta experiencia sobre la gestión de los residuos recogidos tras las mareas negras. Cada vertido de hidrocarburo es diferente, por lo que hay experiencias de lo más diverso. En muchos casos, el hidrocarburo se dispersa en el agua. En otros, se recoge con buques aspiradores en alta mar. Por último, en algunos otros, se recoge en las playas y acantilados. Obviamente, la gestión de los residuos depende directamente del tipo de residuo recogido. Por ejemplo, en el caso de recolección en alta mar, el residuo recogido es una emulsión de agua e hidrocarburo que las refinerías pueden tratar con mayor o menor facilidad. En el caso de petróleo recogido en las playas, si se recolecta adecuadamente, se puede hacer un lavado de arena. Sin embargo, en casos como el del *Prestige*, en que los residuos están muy mezclados es mucho más difícil la gestión, por lo cual desde un principio se valoró la opción de la estabilización como una opción plausible para el tratamiento de los residuos del *Prestige*.

Las técnicas de estabilización son una de las posibles soluciones para la gestión de residuos de hidrocarburos que se ha aplicado en algunos casos concretos de residuos difíciles de gestionar.

El objetivo de la E/S es producir una transformación física y química, transformando el residuo para su uso como material de terraplenado, como materia prima en obras públicas, o para ser almacenado en condiciones estabilizadas. Cuando el equipo de construcción de la carretera

pueda acceder a las playas afectadas, el tratamiento del crudo se puede realizar en el lugar del vertido. Con la ayuda de máquinas mezcladoras los agentes estabilizadores pueden mezclarse con la arena para obtener materiales que pueden ser usados como subbase para la carretera en construcción, o almacenarse para su uso posterior. Los materiales que se obtienen en este proceso son limpios, fácilmente manejables y almacenables.

3.4.1. Técnicas de E/S en protocolos de gestión de residuos.

Existen múltiples publicaciones de protocolos de actuación en el caso de mareas negras desarrollados por instancias gubernamentales o instituciones dedicadas a la investigación en mareas negras. En estos manuales se describe el modo de actuar en el caso de un vertido de sustancias tóxicas, sin embargo, solo algunos tratan sobre la gestión de los residuos generados tras la recogida. A continuación se recogen las referencias relacionadas con la estabilización.

- El CEDRE es un referente europeo en la gestión de vertidos tóxicos en el mar, ha publicado un manual de gestión de residuos de mareas negras (CEDRE, 2004). En él se propone, como uno de los métodos posibles de gestión de residuos de fuel el de estabilización/solidificación para tratar los residuos de hidrocarburos mal clasificados, es decir, que contienen plásticos, materia orgánica, etc.
- La agencia estadounidense NRT (U.S. National Response Team) encargada de la respuesta ante vertidos peligrosos, recoge las técnicas de estabilización/solidificación, como uno de los métodos más adecuados para el tratamiento de residuos peligrosos difíciles de reciclar.
- También la Autoridad Marítima de Seguridad Australiana (AMSA), define en su “National Plan to Combat Pollution of the Sea by Oil and other Noxious and Hazardous Substances” un apartado de gestión y vertido de los residuos de crudo, indicando la posibilidad de empleo de estabilización en el caso de residuos de hidrocarburos para su depósito en vertederos.

A continuación se describen algunas de las técnicas de estabilización de residuos de crudo que se proponen en estos protocolos de gestión.

Tratamiento con cal viva

Este tratamiento se puede realizar cerca del lugar de vertido o en una estación de tratamiento. El residuo se separa y coloca en una cama de profundidad 0.2 - 0.3 m, se extiende la cal sobre él mediante una pala o retroexcavadora, y con el mismo equipo se procede a la mezcla. La cantidad de cal se debe determinar mediante pruebas in situ (a partir del 5-20% según el porcentaje de crudo en el residuo). La cal empleada es cal viva ordinaria (con o sin aditivos tales como sul-

fato de aluminio) o cal hidrofóbica (98% de cal y 2% de ácido oleico) que a veces se emplea para retrasar la reacción.

El polvo levantado por la cal es nocivo y debe protegerse todo el personal que vaya a realizar la operación, especialmente sus ojos. Tras la mezcla, el material se compacta con los sistemas convencionales de la obra pública. Los costes del proceso dependen del nivel de contaminación del residuo, de los costes de transporte y de las opciones de vertido.

Tratamiento con otros ligantes hidráulicos

Reacciones similares a las que se producen con la cal ocurren con cierta variedad de materiales ligantes hidráulicos patentados (p.ej. CHEMFIX, PETRIFIX). Estos métodos esencialmente consisten en mezclar el residuo con los reactivos inorgánicos (seleccionados específicamente después ensayos) en una unidad fija o móvil. El material producto de la reacción adquiere una forma pulverulenta pseudo-mineral o incluso sólida, en ambos casos casi insoluble. Para que el sistema sea útil, el residuo debe ser homogéneo. Los costes dependen del nivel de contaminación, del volumen de residuo y de los costes de transporte y vertido.

Agentes Gelificantes

La técnica de convertir el crudo en un gel se ha considerado en las siguientes situaciones:

- Para reducir al máximo el vertido en un petrolero accidentado.
- Para contener la dispersión del crudo, creando en los extremos del área ocupada un anillo semi-rígido.
- Para minimizar la contaminación al alcanzar el crudo la costa.
- Para limpiar la costa (zonas rocosas) de un material más fácilmente extraíble y transportable.

Las primeras tres aplicaciones mencionadas han tenido un uso muy limitado por los problemas operacionales y económicos que plantean los agentes gelificantes. Será necesario desarrollar nuevos agentes para que el sistema pueda aplicarse a gran escala. Sin embargo, en cantidades pequeñas pueden ayudar mucho en las tareas de limpieza de rocas y diques marinos. Los geles actuales se relicuan a 60°C, y los futuros deberán garantizar fácilmente su relicuefacción, así como su ausencia de toxicidad o agresividad medioambiental.

3.4.2. Experiencias de la empresa BMT Cordah Limited

La empresa BMT Cordah Limited (BMT Cordah, 2002), con experiencia en el tratamiento de residuos petrolíferos, realizó numerosos ensayos sobre procesos S/E en residuos de tipo genéri-

co aceite. Entre ellos se contemplaba el caso de vertidos de crudo, como caso particular. El proceso que se siguió dio gran importancia al estudio de la lixiviación que generaban los materiales resultantes, así como a la resistencia alcanzada por éstos. Dado que las reacciones de hidratación se van desarrollando a lo largo del tiempo, lixiviación y resistencia deben analizarse a lo largo del tiempo. El esquema de trabajo se observa en la Figura 3.5.

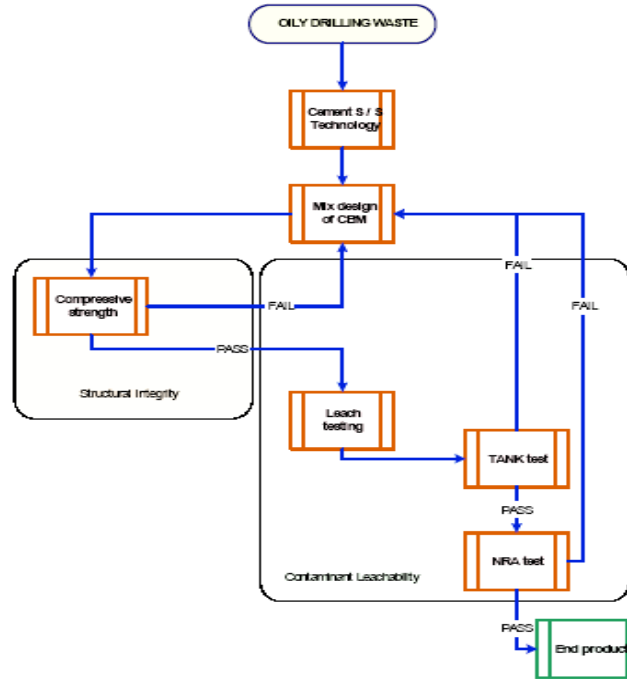


Figura 3.5. Esquema de trabajo en procesos S/E (BMT Cordah, 2002)

Los resultados que obtienen se resumen a continuación en la Tabla 3.4, donde se observan las mezclas empleadas, tanto en composición como en resistencias alcanzadas.

Tabla 3.4. Resumen de resultados de BMT Cordah Limited (BMT Cordah, 2002)

Mezcla	Constituyentes	Cantidad (por m ³)	Resistencia a la compresión simple (N/mm ²)			
			3 días	7 días	14 días	28 días
1	Ligante	200 kg				
	Arena	1944 kg	2.0	3.0	3.5	4.0
	Hidrocarburo	210 L				
2	Ligante	200 kg				
	Arena	1886 kg	1.0	1.5	1.5	2.0
	Hidrocarburo	333 L				
3	Ligante	175 kg				
	Arena	1972 kg	1.0	2.0	2.0	2.5
	Hidrocarburo	229 L				
4	Ligante	200 kg				
	Arena	1900 kg	2.5	3.0	4.0	3.5
	Hidrocarburo	220 L				

Las conclusiones generales que pueden destacarse son:

- La resistencia a compresión varía perceptiblemente para las diversas mezclas producidas con el residuo. Esto se podría atribuir a su carencia de homogeneidad; la razón sólido/líquido varió perceptiblemente entre una mezcla y otra.
- El desarrollo de la resistencia en los productos tratados puede ser mejorado introduciendo menor cantidad de hidrocarburo, que retrasa la reacción del cemento.
- La lixiviación de los productos S/E permanece por debajo de los límites establecidos para todos los metales e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs).
- Los datos de prueba sobre lixiviación indican que el CBM producido se podría utilizar para usos de ingeniería civil sin excesivos requerimientos.
- La concentración de cloruro lixiviado en el CBM estaba correctamente limitada.
- Los objetivos principales (producir CBM con resistencias a compresión entre 1-5 MPa, con escasas operaciones, y lixivitaciones de contaminantes ajustadas a norma) fueron alcanzados.

3.4.3. Experiencias de la empresa Moffatt & Nichol Engineers

La empresa Moffatt & Nichol Engineers, en la reunión “CEMENT STABILIZATION OF CONTAMINATED DREDGED MATERIAL” celebrada en noviembre de 2002 y correspondiente al subcomité marino, presentó un estudio de estabilización con cemento de residuos con crudo. Las mezclas que ensayaron incorporaban cemento de tipo II y, en algunos casos, cenizas volantes. La totalidad de mezclas se presenta en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. *Resumen de mezclas de Moffatt & Nichol Engineers (Moffat & Nichol, 2002)*

Lugar	Reactivo	Proporción de Mezcla (% en peso)									
Todos (caso base)	Cemento tipo II	8	6	4	6	4	2	6	4	2	
	Ceniza tipo F							4	6	8	
	Ceniza tipo FB				6	8	10	2	4	6	

A continuación puede verse una imagen correspondiente al proceso de estudio y ensayo (Figura 3.6).



Figura 3.6. *Hidrocarburos no tratados. (Moffatt & Nichol Engineers, 2002)*

A continuación ofrecemos un resumen de los resultados:

- Ensayos físicos realizados: tamaño del árido, límites de Atterberg, compactación, consolidación, permeabilidad, resistencia a compresión no confinada, corte directo.
- Los ensayos químicos se ciñeron fundamentalmente a procesos de lixiviación.

Las conclusiones fueron las siguientes:

- La introducción de cemento mejora el manejo del material.
- Un 4% de cemento parece aportar la mejor ratio coste/propiedades.
- Los ensayos de lixiviación se superan con éxito en esas mezclas.

3.5. RECICLAJE DE RESIDUOS DE HIDROCARBUROS MEDIANTE INCLUSIÓN EN MATERIALES DE BASE CEMENTICIA

Existe un gran número de referencias de inclusión de residuos en morteros y hormigones, gracias a estas investigaciones se ha conseguido que residuos como la ceniza volante, la escoria de alto horno o el humo de sílice, se consideren actualmente adiciones valiosas que permiten sustituir parcialmente al clinker. El campo de las adiciones activas al cemento ha tenido gran desarrollo y también se han producido avances importantes en el reciclaje de residuos mediante su introducción como áridos para morteros y hormigones. Estos residuos suelen provocar una cierta disminución resistente, que se ve compensada por el beneficio ambiental de inertizar y encapsular definitivamente los residuos. De entre todas estas experiencias la que se encuentra más desarrollada es la del empleo de áridos reciclados provenientes de materiales de escombros y deconstrucción.

Es posible encontrar un importante número de referencias sobre reciclaje de residuos inorgánicos de diversa índole por inclusión en materiales de base cemento, destacando entre todas las investigaciones las relacionadas con el empleo de áridos reciclados. Para el caso de residuos de tipo orgánico, la filosofía general de la normativa de hormigón (EHE, 2008), es la de limitar el contenido de materia orgánica de los áridos, aun a pesar de que no está demostrado que todas las sustancias de carácter orgánico tengan efectos negativos cuando se introducen en el hormigón. Adicionalmente, apenas hay bibliografía sobre la inclusión de residuos orgánicos en hormigones y menos sobre inclusión de residuos como el fuel del Prestige.

Para esta investigación se ha hecho una búsqueda sobre la inclusión de residuos de tipo hidrocarburo en materiales de base cemento. Sin embargo, no se localizaron referencias directas sobre este tema, por lo que se ampliaron los parámetros de búsqueda a materiales de naturaleza orgánica similares a los residuos de fuel. En primer lugar se buscaron referencias sobre la acción de sustancias orgánicas petrolíferas en materiales de base cemento. A este respecto existen algunas referencias destacando la de Zivica (2005), la cual detalla el efecto sobre morteros de cemento de medios basados en sustancias orgánicas. Las referencias más próximas a los residuos del Prestige tratan sobre el tratamiento con cemento de residuos de perforación en pozos petrolíferos (Tuncan, 1997 y 2000), donde se indica que es posible mejorar la resistencia de un suelo contaminado con petróleo. A esta misma conclusión llegó también BMT Cordah (2002) y Moffat & Nichol (2002). Parece, por tanto, que la mezcla de hidrocarburos petrolíferos y cemento consigue desarrollar resistencia. En cuanto a la inclusión directa de materiales orgánicos como árido de morteros y hormigones, las aportaciones más interesantes encontradas son las de Valls (1999) sobre reciclaje de lodos de depuradora en morteros y la de Bilal et al. (2003) sobre el empleo de aceite usado como aditivo aireante.

3.5.1. Efectos de componentes orgánicos en materiales de base cemento

Se considera de manera habitual que la inclusión de componentes orgánicos en materiales de base cemento incide de manera negativa en su resistencia y durabilidad. Es por esto habitual limitar el contenido en sustancias orgánicas en áridos y cemento. Sin embargo, esta limitación no es más que una generalización, puesto que los materiales orgánicos pueden ser de muy diversa naturaleza y no siempre nocivos. Por ejemplo, se han fabricado hormigones con fibras naturales de naturaleza orgánica sin que ello repercutiera negativamente en las prestaciones del hormigón.

Zivica (2005) ha realizado un estudio sobre la agresividad en el hormigón de algunos medios orgánicos habituales en la industria. De entre todos los medios ensayados por el autor destacan dos en relación con el residuo de fuel del Prestige, petróleo y sulfonatos. En el caso del mortero expuesto a un ambiente de petróleo apenas se ve afectado manteniendo prácticamente

las resistencias respecto al mortero de control. No ocurre lo mismo en el caso de los sulfonatos, que provocan una disminución importante de la resistencia y del módulo elástico en los morteros de cemento. Esta agresividad de los sulfonatos se justifica por la formación de ettringita expansiva, la cual se origina por el contacto entre los iones sulfato y el C3A de la parte anhidra del cemento.

3.5.2. Reciclaje de lodos de depuradora mediante inclusión en morteros de cemento

La referencia de Valls (1999), ya mencionada en el punto 3.3.3, trata sobre la estabilización de lodos de depuradora mediante su inclusión en pastas de cemento y morteros. La autora trabajó con lodos producidos en un digestor anaeróbico de la depuradora de Sabadell-Rubí (Barcelona). Estos residuos se componen de un 13 % de proteínas, un 3 % de grasas, un 34 % de hidratos de carbono y un 50 % de inertes. Estos lodos se incluyeron en morteros de cemento para su reciclaje en proporciones variables, midiendo posteriormente sus propiedades resistentes y de durabilidad. Aunque este residuo tiene unas características muy diferentes a las del fuel puro del Prestige sí tiene algún parecido al *residuo de fuel del Prestige*, el cual contiene cantidades variables de materia orgánica de diverso tipo como algas, ramas, etc. En la investigación de Valls (1999) se alcanzaron las siguientes conclusiones de interés para la presente tesis:

- Se consiguió introducir un máximo de 10 % de lodos de depuradora.
- Las propiedades resistentes se ven reducidas al incluir cantidades mayores de residuo.
- La inclusión de lodos en la pasta de cemento provoca un retraso en el fraguado, este comportamiento se corrigió mediante el empleo de aditivos aceleradores de fraguado.

3.5.3. Inclusión de aceite usado como aditivo en hormigones

Las investigaciones de Bilal et al. (2003) tratan sobre la inclusión de aceite usado como aditivo aireante en hormigones con el doble fin de obtener el citado efecto y reciclar el aceite, un residuo contaminante. Este autor fabricó hormigón en el que incluía aceite de motor, tanto usado como nuevo, comprobando ciertas variaciones en las propiedades de estos hormigones:

- Aumento del contenido en aire del hormigón, equivalente a la adición de aireante comercial.
- Mejora importante del comportamiento del hormigón ante ciclos de hielo-deshielo, vinculada al mayor contenido de aire.
- Disminución de la resistencia mecánica

3.5.4. Conclusión

En general, la bibliografía consultada indica que la adición de materiales de carácter orgánico tipo hidrocarburo o materia orgánica (de seres vivos) a materiales de base cemento es negativa en cuanto a los parámetros resistentes del hormigón. Es de esperar por tanto, que la inclusión de residuos de fuel del Prestige produzca, por analogía con otros materiales orgánicos, alguno de los efectos descritos anteriormente (retraso de fraguado, pérdida de resistencia, etc).

3.6. PROTOCOLO DE GESTIÓN DE LOS RESIDUOS DE FUEL

En apartados anteriores hemos hecho especial hincapié en el hecho de que, si bien las tareas de limpieza en la costa fueron eficaces en términos de la retirada de hidrocarburos, la organización de las distintas etapas del proceso de recogida no se desarrolló de la manera más adecuada, desde el punto de vista de la gestión ulterior de los residuos. Citaremos dos ejemplos:

- No se previó la necesidad de separar los distintos tipos de residuo al pie de cada punto de recogida. Ello ha planteado serios problemas a la hora de plantear la mejor estrategia para la eliminación de los residuos.
- Es un hecho bien conocido que las zonas para el almacenamiento transitorio del fuel tuvieron que ser improvisadas sin la realización de un acondicionamiento previo.

De ello podemos concluir que de haber dispuesto de un acertado protocolo de actuación que considerara entre sus prioridades la recogida, transferencia y disposición de los residuos el volumen generado de estos hubiera sido significativamente menor.

3.6.1. Consideraciones generales

En dos informes de la *International Petroleum Industry Environmental Conservation Association* (IPIECA, 2000 e IPIECA, 2004) se realizan una serie de reflexiones relativas a la gestión de residuos recogidos de vertidos accidentales de petroleros que tienen una especial significación en nuestro caso.

Aunque la mayor parte de los vertidos tienen lugar en mar abierto, la acción de las corrientes oceánicas, el viento y las mareas dirige los mismos hacia la costa. Como hemos visto, esto tiene múltiples implicaciones y una de las más difíciles de abordar es qué hacer con las grandes cantidades de residuos generados en los cortos periodos de tiempo de las mareas negras.

De acuerdo con IPIECA (2004), los datos históricos mostrarían que los vertidos que alcanzan la costa podrían generar, en casos extremos, hasta 30 veces el volumen de los hidrocarburos vertidos (Figura 3.7).

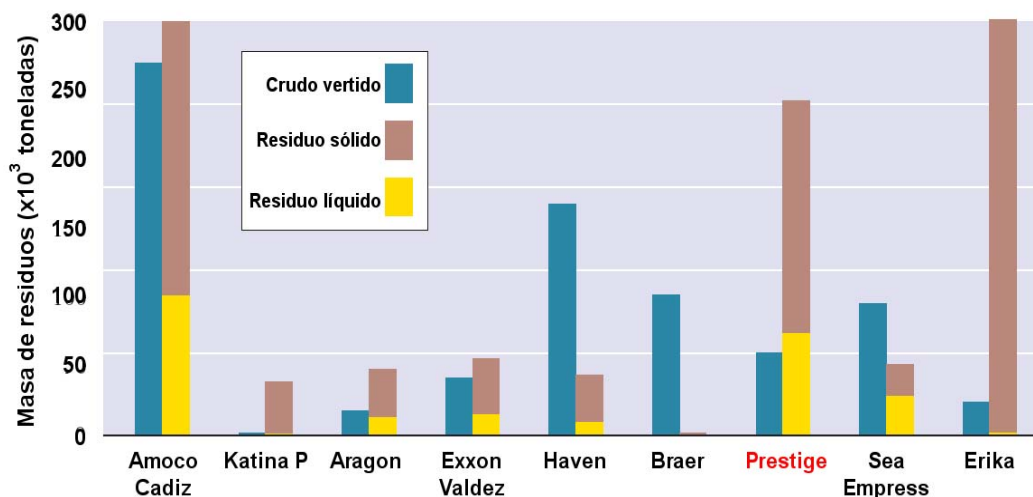


Figura 3.7. Masa de residuos generados en distintas mareas negras históricas (en miles de toneladas). Los datos referidos al vertido del Prestige no son coherentes en relación con los indicados en este informe. Figura modificada de: IPIECA (2004).

Aunque las razones que determinan esta gran variabilidad en los volúmenes de material generado pueden ser muy diversas, es también evidente que un buen número de vertidos pequeños han sido responsables de grandes masas de residuos (p. Ej. *Katina P*; *Erika* y *Prestige*). Por ello, la gestión de los residuos producto de las tareas de limpieza debería ser considerada con la mayor prioridad.

A ese respecto, es esencial que los planes de contingencia de mareas negras incluyan una adecuada provisión para la gestión de los residuos producidos. Es un requisito fundamental que, tan pronto como un incidente de estas características tenga lugar se tomen las medidas más adecuadas y se pongan en marcha los planes paliativos. Dicha filosofía queda recogida en la Figura 3.8, en la que puede verse que la adecuada planificación determina que la lucha contra la contaminación en la costa requeriría, en un primer nivel de protección, de puntos de recogida “*a pie de playa*” con capacidad para el almacenamiento de residuos limitada. En un segundo nivel de protección, áreas para el depósito adecuadamente acondicionado de los residuos procedentes de los distintos puntos del litoral. Finalmente, el último nivel de protección serían las instalaciones responsables de llevar a cabo el proceso de reciclado, eliminación o almacenamiento de los residuos.

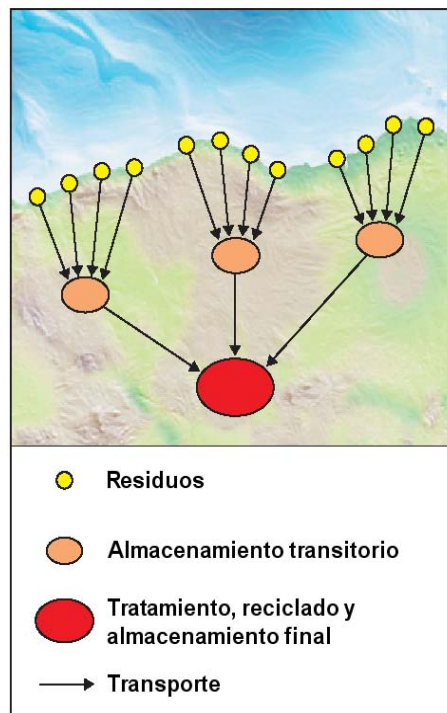


Figura 3.8. Organización general de una estrategia de gestión de residuos producidos por mareas negras. Figura modificada de IPIECA (2004)

En cada uno de los niveles de protección existirían distintos elementos-clave para garantizar la eficacia del conjunto del proceso (adecuada separación de los residuos a pie de playa, adecuados mecanismos de transferencia entre los depósitos, adecuada dosificación de materiales hacia las plantas de tratamiento, buen acondicionamiento del terreno de los depósitos transitorios y a pie de playa, sólida estructura organizativa,...).

La buena ejecución de todo ello, por sí mismo, debiera garantizar una eficaz limpieza y ulterior gestión de los residuos, lo cual redundara en una reducción de costos en el conjunto de las operaciones.

3.6.2. Jerarquización de los residuos

Cuando se considera una cadena de residuos como la que se produce en una marea negra, el modelo de "jerarquización de residuos" (Figura 3.9) constituye una herramienta de gran utilidad. Este concepto considera los principios de la reducción, reaprovechamiento y reciclado a fin de minimizar la cantidad total de residuos generados. Ello minimiza los costos económico/ambientales y garantiza el cumplimiento de las exigencias legales. De ese modo, proporciona una herramienta útil para estructurar la estrategia de gestión de los residuos.

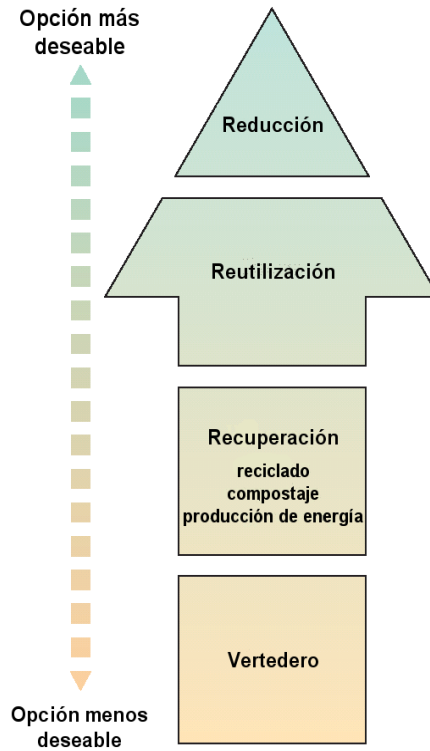


Figura 3.9. *Alternativas de gestión de residuos comúnmente consideradas. Figura modificada de IPIECA (2004)*

Comentaremos a continuación algunos de los pilares de esta aproximación conceptual en el caso particular de los residuos petroleados: la clasificación y separación, la minimización, la reducción de la contaminación secundaria y la salud y seguridad.

3.6.3. La clasificación y la separación

Cuando tiene lugar una marea negra a la que siguen labores de limpieza y restauración, se procede a la retirada del propio petróleo así como una gran variedad de materiales petroleados. Cada uno de ellos debe ser objeto de un adecuado proceso de separación, almacenamiento, tratamiento, reciclado o eliminación. Suponiendo que existe un plan de contingencia que define las rutas a seguir por los distintos materiales, una de las tareas más decisivas en los primeros momentos de las actuaciones en la costa es clasificar los residuos y separar sus distintas categorías *en su fuente*. Así, cada uno de los materiales debe ser almacenado por separado, teniendo en cuenta cuáles son los contenedores más adecuados en cada caso.

3.6.4. La minimización de residuos

La minimización consiste en reducir la cantidad de residuos que entran en la cadena de generación. Esto es esencial a fin hacer lo más pequeño posible la cantidad final de residuos que deben

ser almacenados, lo cual redundará en una importante reducción de costos tanto económicos como ambientales. Existen diversas formas de alcanzar los objetivos de minimización requeridos. Algunos de ellos son resumidos a continuación:

- Es importante intentar identificar los puntos que serán afectados por una marea negra en ciernes antes de que esta los alcance. Dichos lugares deberán ser limpiados de escombros, basura, etc., lo cual reducirá la cantidad final de residuos a tratar.
- Realizar una separación en los propios puntos de limpieza (líquidos, sólidos, fragmentos vegetales, plásticos,...)
- Los puntos de almacenamiento, si es que fuera posible acondicionarlos a tiempo, debieran disponer de un tejado de protección contra la lluvia, evitando así el eventual rebose de las balsas así como minimizando la cantidad de residuo líquido a tratar.
- Las herramientas y demás instrumentos de limpieza deben ser recuperados y limpiados antes que desechados.
- En la medida de lo posible, el tratamiento in situ de los residuos recuperados (p. Ej. lavado, tamizado, bioremediación,...) minimiza los requerimientos de transporte y tratamiento posterior.
- Los equipos de protección del personal de limpieza (p. Ej. botas de goma) debieran ser reutilizados, en la medida de lo posible, sin poner en riesgo la seguridad y la salud de los mismos.

3.6.5. Reducción de la contaminación secundaria

La contaminación secundaria es aquella producto de la propagación de la contaminación hacia áreas previamente no contaminadas por efecto del trasiego de personas, equipos y medios de transporte. En la medida de lo posible, dicha contaminación debe ser controlada a fin de reducir el impacto de la marea negra sobre la región afectada. Algunas formas de reducirla son:

- La identificación de zonas de trabajo “limpias” y “contaminadas”
- El chequeo regular de todos los dispositivos de bombeo y conexiones a fin de evitar fugas o roturas en conducciones.
- Asegurar que los residuos son almacenados en condiciones de impermeabilidad (frente al agua y los hidrocarburos), evitando así fugas y vertidos secundarios accidentales
- Descontaminando los equipos y al personal de limpieza antes de abandonar las zonas de limpieza.
- Protegiendo y descontaminando todos los vehículos que se empleen en el transporte de residuos antes de abandonar la zona de limpieza o almacenamiento.

- Estableciendo un plan de circulación de vehículos.

3.6.6. Preservación de la salud y la seguridad

Cualquier tipo de hidrocarburo pone en riesgo, en mayor o menor medida, la salud de las personas. Por ello, es esencial disponer de un protocolo de salud y seguridad antes de empezar cualquier tarea de limpieza. Tampoco son despreciables los riesgos asociados a caídas, movimiento de maquinaria pesada, etc. y, por tanto, deben ser previstas las medidas de seguridad más adecuadas.

3.6.7. Residuos generados por los distintos métodos de limpieza

La cadena de residuos se inicia en el propio punto de generación, es decir, el de derrame. Además, los diferentes entornos en con los que el crudo interactúa así como los distintos métodos de limpieza confieren a los residuos características diferenciadoras.

Los residuos deben ser siempre almacenados en un lugar adecuado teniendo en cuenta las condiciones ambientales del mismo. Pese al nerviosismo que sigue a un episodio de marea negra, es importante mantener la serenidad y llevar un registro (y etiquetado) adecuado de los distintos tipos de residuo. Todo ello debe ser adecuadamente considerado en los planes de contingencia.

La Tabla 3.6 recoge distintas técnicas de limpieza y su efecto sobre los residuos, así como el tipo de residuo generado en cada caso.

Tabla 3.6. *Efecto de las distintas técnicas de limpieza en los residuos generados en mareas negras. (IPIECA, 2004)*

Técnica de limpieza	Efecto sobre los residuos	Tipo de residuo generado
Aplicación de dispersantes	Se emplean para despolimerizar las cadenas de hidrocarburos y romper las grandes manchas en pequeñas gotas. Con ello se consigue un efecto de dilución (en la masa del océano) y una mejora de los procesos de bioremediación/biodegradación natural o artificial. No funciona con todos los tipos de hidrocarburos y no es adecuado su empleo en ciertos entornos.	La masa de residuos es mínima ya que el petróleo queda suspendido de la columna de agua y se biodegrade de forma natural
Operaciones de recogida en el mar	Los dispositivos para la recogida (p. Ej. Skimmers) son desplegados desde embarcaciones de distinto porte a fin de recuperar el petróleo de la	No se generan residuos de hidrocarburos. Prendas de protección personal Bidones vacíos de productos dispersantes
	Las operaciones de recogida pueden dar lugar a grandes volúmenes de hidrocarburos y agua contaminada. El volumen disponible de los sis-	Equipos petrolados Prendas de protección personal Petróleo

Técnica de limpieza	Efecto sobre los residuos	Tipo de residuo generado
superficie del agua. Se necesitan sistemas de almacenamiento de tamaño suficiente y calefactados para hidrocarburos densos y muy viscosos. También son precisas instalaciones para la recepción del material recuperado.	temas de almacenamiento debe guardar relación con la capacidad de recuperación de los skimmers. El tipo de vertido condiciona las características del residuo. Los más problemáticos son los de alta densidad y viscosidad	Agua contaminada Fragmentos vegetales contaminados Materiales sorbentes con petróleo Espumas con petróleo Restos animales
Limpeza de la costa Los hidrocarburos son recuperados de la costa empleando medios mecánicos o manuales. La limpieza manual es la más deseable ya que minimiza la cantidad de residuos. Pueden usarse máquinas para transportar los residuos desde la costa hasta los puntos de almacenamiento primario. Pueden emplearse tanques portátiles o zanjas protegidas para facilitar las tareas de transferencia. El tipo de costa y se accesibilidad condicionará el tipo de estrategia lo cual, a la postre, determinará el volumen de residuos recuperados.	El tipo de petróleo condicionará el grado de petroleado de los residuos. La aplicación de técnicas de separación y minimización son críticas a fin de asegurar una eficiente operación.	Equipos petroleados Prendas de protección personal Petróleo recuperado Vegetación petroleada Agua contaminada Materiales absorbentes de hidrocarburos Arena, conchas, cantos,... Espumas con petróleo Restos animales Transportes petroleados
Incineración <i>in situ</i> Implica quemar el petróleo. La degradación y emulsificación del petróleo inhiben el proceso. Esta estrategia no puede ser empleada con todos los hidrocarburos y en cualquier ambiente. La contaminación resultante así como la producción de residuos viscosos limita su aplicabilidad práctica.	La incineración puede reducir la cantidad de petróleo en el ambiente pero el material remanente es más persistente aún.	Residuos del petróleo quemado Equipos petroleados Prendas de protección personal

3.6.8. Almacenamiento in situ temporal

La localización de los puntos de almacenamiento debe ser cuidadosamente analizada. Lógicamente debe estar en algún punto alejado de la acción marina litoral (mareas, corrientes, etc.) a fin de evitar su lavado. En zonas extremadamente calurosas, algunos tipos de contenedor, en particular ciertos tipos de plástico no deben ser expuestos durante largos periodos de tiempo a la irradiación solar ya que el material de que están constituidos puede colapsar.

Los contenedores deben ser etiquetados conforme a su contenido, cantidad de residuo y riesgos asociados relevantes. Esto debe realizarse antes de su transporte.

Tabla 3.7. *Distintos sistemas de almacenamiento primario. (IPIECA, 2004)*

Tipo de almacenamiento		Consideraciones
En el mar	Tanques prefabricados en buques	La reglamentación local debe ser cumplida Los distintos tipos de residuo deben ser separados
	Depósitos inflables	Pueden ser muy difíciles de vaciar y limpiar, además de caro
	Tanques calefactados	El almacenamiento en cubierta debe ser firmemente sujeto. Se requieren tapas a fin de evitar el derrame con los movimientos del barco. Se recomiendan depósitos calefactados.
En la costa	Tanques portátiles	La reglamentación local debe ser cumplida Los distintos tipos de residuo deben ser separados Los tanques de almacenamiento deben emplazarse en terrenos estables y nivelados.
	Big bags	Las instalaciones deben estar próximas al equipo de recogida a fin de evitar innecesarias contaminaciones secundarias. Se requieren accesos adecuados para que la maquinaria pesada pueda retirar los residuos del lugar de almacenamiento.
		Es preciso un tejado de impermeabilización para evitar la entrada de agua de lluvia.
	Zanjas protegidas	Las zanjas deben ser protegidas a fin de evitar la contaminación del suelo. Las áreas de almacenamiento deben ser rotuladas y acordonadas. Puede ser preciso el establecimiento de un sistema de seguridad a fin de evitar vertidos incontrolados.

3.6.9. Almacenamiento temporal, final y transporte

Durante las operaciones de limpieza, los residuos deben ser transportados. El transporte entre zonas de limpieza requiere el uso de pequeños vehículos como dumpers, palas cargadoras o todo-terrenos. En áreas inaccesibles incluso puede ser necesario emplear helicópteros. La transferencia del residuo entre los lugares de recogida y los puntos de almacenaje debe también ser realizada mediante vehículos adecuados, por ejemplo camiones con tanques para el residuo líquido o con cubas para el residuo sólido. En casos de emergencia una gran variedad de vehículos pueden ser empleados, aunque lo deseable es poder identificar cada medio de transporte dentro del plan de contingencia. Conviene destacar la necesidad de contar con vehículos sellados, que a su vez deben ser cuidadosamente descontaminados tras su transporte para evitar pérdidas en la carretera o en las rutas de acceso.

Tras la separación del residuo en los contenedores adecuados, aquel suele ser conducido a puntos de almacenamiento intermedio, paso previo al punto de almacenamiento final. La figura 3.2, antes presentada, muestra los distintos niveles de almacenamiento. La eficiencia en estos

trasiegos y almacenajes intermedios es fundamental en el plan de acción, como lo demostraron algunas circunstancias ocurridas durante el accidente del Erika (1999).

La Tabla 3.8 presenta algunos criterios asociados al almacenaje intermedio y final.

Tabla 3.8. *Criterios asociados con el almacenamiento secundario y final si es que no existen opciones para el almacenamiento primario (a pie de playa). (IPIECA, 2004)*

Criterio	Almacenamiento secundario	Almacenamiento final
Propósito	Permitir la recuperación eficiente del fuel, es decir, no obstaculizar la recuperación. Evitar el cuello de botella, generado por el acceso de numerosos vehículos a la zona de limpieza. Dar a los gestores tiempo para organizar el vertido final mientras se continúa recuperando fuel. Permitir la transferencia eficiente del residuo, combinando cargas pequeñas para hacer pocos viajes a destino final, reduciendo así la consumición de combustible, costes económicos y el número de vehículos contaminados.	Disponer del tiempo necesario para identificar las opciones de almacenamiento final. Permitir la separación del residuo. Permitir los preparativos para adecuar el vertido final (contratos, calendarios,...).
	Gestión	Todos los manipuladores de residuos deben tener la capacitación suficiente Las partidas de residuos deben identificarse según tipo y origen Debe conservarse toda la documentación Deben obtenerse todos los documentos legales

Como mejor opción, todos los lugares de almacenaje elegidos, tanto si son de almacenaje intermedio o final, deben contar con una localización geográfica conveniente; tener la topografía y geología adecuadas y evitar las áreas sensibles desde el punto de vista ambiental y las áreas cercanas a los núcleos densos de población. La legislación local se debe adherir siempre. La Tabla 3.9 precisa algunas pautas para los criterios geográficos y legales que los puntos de almacenamiento de larga duración deben resolver.

Tabla 3.9. Criterios para la selección de los distintos tipos de almacenamiento para residuos de mareas negras. (IPIECA, 2004)

Criterio	Almacenamiento secundario	Almacenamiento final
Ocupación	Entre 0 y 1 años; (más en casos extremos)	Más de 5 años Atención a las restricciones legales
Ejemplo de capacidades de almacenamiento	Entre 1500 y 3000 m ² de superficie para balsas de almacenamiento (100 – 200 m ³) Almacenamiento para residuos y big-bags	Entre 20000 y 100000 m ² de superficie Balsas de almacenamiento de entre 1000 y 10000 m ³ Clasificación, pre-tratamiento y estabilización
Distancia desde el punto de recogida	No más de 5 km	No más de 50–10 km; o una hora por carretera desde el punto de almacenamiento previo
Accesos y vehículos	Camiones pesados	Camiones pesados
Reglamentos y disposiciones	Cumplimiento absoluto	Cumplimiento absoluto
Condiciones del terreno	Llano y compactado para recibir los contenedores del residuo Instalaciones de drenaje del agua de lluvia	Llano y compactado para recibir los contenedores del residuo Instalaciones de drenaje del agua de lluvia
Condiciones hidrogeológicas	Adecuada capacidad de carga Subsuelo impermeable de modo natural o artificial Evitar zonas con aguas subterráneas	Adecuada capacidad de carga Subsuelo impermeable de modo natural o artificial Evitar zonas con aguas subterráneas
Condiciones medioambientales	Distancia de seguridad a las áreas pobladas Evitar zonas de interés arqueológico o cultural	Distancia de seguridad a las áreas pobladas Minimizar impacto de los transportes Distancia a áreas de interés
Condiciones de gestión y mantenimiento	Tipo de residuo Determinación de cantidades Contratos de vertido Gestión del agua Seguridad para prevenir vertidos no autorizados Restauración de la zona	Tipo de residuo Determinación de cantidades Contratos de vertido Gestión del agua Seguridad para prevenir vertidos no autorizados

Los residuos peligrosos en la Comunidad Europea (EC) están estrictamente controlados según la Directiva 91/689/EEC, del Consejo de Europa. Los vertidos de petróleo se consideran dentro de esta categoría. Un sistema de gestión, administrado por la autoridad ambiental correspondiente, asegura que los residuos se trasladan del punto de generación al punto de almacenaje. Tanto éste como el transporte deben estar adecuadamente documentados y autorizados, considerándose esta medida como muy adecuada en todo el mundo, aún en ausencia de legislación, en este tipo de situaciones.

Cuando se trata de pequeños vertidos, esta legislación no debe plantear problemas ya que existen suficientes gestores, transportistas y vertederos para absorber el residuo. El problema legislativo puede aparecer cuando ocurre un vertido interregional o internacional. En efecto, en estos casos el volumen de vertido sobrepasa la capacidad de los gestores existentes y deben identificarse nuevos medios de transporte y nuevos puntos de almacenamiento, y la tramitación de licencias puede obstaculizar la operación de limpieza. Por ello la Directiva establece que “en casos de emergencia o daño grave, los Estados Miembros deberán adoptar las medidas necesarias incluyendo, cuando sea oportuno, derogaciones temporales de la legislación vigente para asegurar que el residuo peligroso se evacua sin que constituya una amenaza para la población o el medio ambiente” (artículo 7 de la Directiva 91/689/EEC).

3.6.10. Reciclado y Almacenamiento Final de Residuos Petroleados

El objetivo de las operaciones de limpieza es el tratamiento, reciclaje o almacenaje del residuo de fuel de la forma más eficiente desde el punto de vista medioambiental. Optar por la solución vertedero dependerá de la cantidad de fuel y otros residuos, de la localización del vertido, y de las consideraciones medioambientales, legales y económicas que existan.

La Tabla 3.10 identifica las diferentes opciones posibles para el vertedero de residuos según el tipo de residuo recogido.

Tabla 3.10. *Adecuación entre los distintos tipos de residuo y métodos de tratamiento existentes. A: Reprocesado; b) Separación agua/petróleo; C) Desemulsionado; D) Estabilización; E) Biorremediación; F) Lavado de sedimentos; G) Vertedero; H) Tratamiento térmico; I) Uso de petróleo pesado. Fuente: IPIECA (2004)*

Tipo de residuo	Método de tratamiento									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
Petróleo puro	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI
Petróleo y agua	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI
Petróleo y sedimento	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
Petróleo y restos orgánicos	NO	NO	NO	SI	SI	NO	SI	SI	SI	NO
Petróleo, prendas de protección y equipos	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO

La Tabla 3.11 aporta datos sobre técnicas y otras consideraciones en relación con las distintas formas de tratamiento de los residuos.

Tabla 3.11. *Métodos de tratamiento de los residuos procedentes de mareas negras. (IPIECA, 2004)*

Tratamiento	Técnicas	Consideraciones
Reprocesado	El fuel se recupera con una baja cantidad de agua y residuos. Se	Las refinerías no aceptan fuel con altos contenidos de sal ya que pueden corroer irreversiblemente

Tratamiento	Técnicas	Consideraciones
	reprocesa en planta o refinería El fuel puede ser reutilizado	te los sistemas de tuberías El fuel contaminado con exceso de sedimentos y otros materiales también es inaceptable
Separación agua/petróleo	Se realiza generalmente por gravedad, retirándose la capa de fuel de la superficie Se emplean a menudo equipos especiales de separación	El agua residual de la separación debe ser tratada posteriormente para evitar la contaminación de los hidrocarburos que incorpora
Desemulsionado	Mediante calor pueden separarse las fracciones de fuel y agua En algunos casos pueden emplearse desemulsionantes químicos El fuel recuperado puede ser reprocesado	Algunos compuestos químicos empleados pueden quedar en el agua tras la separación
Estabilización	El fuel puede ser estabilizado empleando sustancias inorgánicas como cal, cenizas volantes o cemento La estabilización genera una mezcla inerte que reduce el riesgo de lixiviado, y que permite por tanto el almacenaje en vertedero con condiciones mucho menos restrictivas que las que impone el fuel	El contacto con la cal puede causar irritación en los ojos, piel, y sistemas respiratorio y gastrointestinal Los materiales reaccionan con el agua, generando calor susceptible de provocar una combustión
Biorremediación	Se emplea para acelerar la descomposición microbiana del fuel Un ejemplo de esta técnica es el empleado en las tierras de cultivo. Los residuos de fuel, con contenidos bajos de hidrocarburo, se extienden uniformemente en la tierra, mezclándose con el suelo natural y produciéndose la descomposición del fuel gracias a los microorganismos	El material biorremediado puede requerir aireación y mezcla de fertilizantes. Debe tenerse presente la ubicación del terreno, por ejemplo en cuanto a su proximidad a aguas subterráneas Los terrenos a disposición para estas técnicas suelen ser escasos
Lavado de sedimentos	Incluye la limpieza de gravas y arenas, in situ o en plantas especiales Algunas rocas pueden requerir técnicas de limpieza en caliente En caso de aceites ligeros, las rocas pueden ser ubicadas en la zona de rompiente de las olas para provocar una limpieza na-	Esta técnica puede ser considerada cuando los sedimentos contienen una gran cantidad de fuel. El coste es elevado y a menudo genera dudas la definición del momento en que el material puede retornar a la playa

Tratamiento	Técnicas	Consideraciones
	tural gracias a la energía de las olas	
Limpieza de arena	Los sedimentos arenosos se deben limpiar mediante equipos especiales Algunos disolventes pueden acelerar y facilitar el proceso	Este método es lento, produce una gran cantidad de mezcla fuel/agua. A menudo es difícil definir cuando el material ha quedado libre de fuel y disolventes para retornar a la playa
Vertedero	Los vertederos deben asegurar que no se produzca lixiviación hacia las aguas superficiales y profundas A veces deben cubrirse para evitar que se produzca contaminación a través del agua de lluvia Una tecnología asociada puede ser la destrucción del residuo mediante combustión controlada a altas temperaturas	Se requieren permisos de las autoridades, y sólo aceptan un tipo de residuo en cantidades limitadas Deben realizarse análisis químicos para determinar la composición exacta del residuo
Incineración	Las fábricas de cemento son un método efectivo y de bajo coste que puede ser utilizado a veces para absorber el residuo como materia prima o fuente energética La pirólisis es un ejemplo de tratamiento térmico de alta temperatura. Se convierte el fuel en gas y residuos sólidos a través de la aplicación de calor sin oxígeno.	El uso de incineradoras portátiles está a menudo prohibido por la legislación, que establece que su ubicación debe ser autorizada, contando igualmente con un estudio de impacto ambiental por la polución generada Las incineradoras permanentes empleadas para los residuos sólidos urbanos (RSU) pueden emplearse, aunque con reservas dada la naturaleza corrosiva de la sal presente en el fuel Las incineradoras industriales pueden ser adecuadas en función de la cantidad de residuo, que afecta al coste de la operación
Tratamiento térmico	Su objetivo es separar los contaminantes de los sedimentos. Con el calor se vaporizan aquellos sin alcanzarse su oxidación Se puede trabajar con altas (320–560 °C) o bajas temperaturas (90–320 °C). Este último es el caso empleado para descontaminar suelos sin eliminar sus posibilidades biológicas	Pueden incurrirse en costes altos, dado lo especial del tratamiento Contenidos altos de materia orgánica o húmeda aumenta la dificultad para tratar las emisiones de gas La presencia de sedimentos puede dañar el procesador. Partículas de tamaño mayor que 60

Tratamiento	Técnicas	Consideraciones
		mm deben ser retiradas previamente
		El residuo típico que contenga menos de un 5% de fuel se puede gestionar como el RSU

Un vertido inevitable exige adoptar numerosas y complicadas decisiones, en función de los recursos disponibles, su priorización, las mejores técnicas de limpieza y la seguridad. La gestión del residuo es fundamental tanto en las cuestiones operativas como en las económicas. La gestión correcta exige tener en cuenta todas las variables para minimizar los problemas, para lo cual suele ser necesario implementar un plan de contingencia.

Capítulo 4. Objetivos

4.1. OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de la presente tesis es encontrar una solución a la gestión de los residuos de fuel del Prestige. Con esta investigación no sólo se busca resolver un problema local y puntual, sino también contribuir al conocimiento sobre métodos de gestión de residuos originados en la contaminación marítima por hidrocarburos.

El residuo que se ha de tratar tiene una textura líquido-viscosa y presenta una composición de fuel, agua, arena, rocas, plásticos, etc. Este tipo de residuo no puede ser depositado directamente en vertedero debido a una prohibición expresa de la Directiva 1999/31, transpuesta a la legislación española en el Real Decreto 1481/2001. Dicha directiva, que regula el vertido de residuos a vertedero, dice textualmente en su artículo 5:

“Artículo 5. Residuos y tratamientos no admisibles en un vertedero

....

3. Los estados miembros adoptarán medidas para que los residuos siguientes no sean admitidos en un vertedero:

a) Residuos líquidos

b) Residuos que, en condiciones de vertido, sean explosivos, corrosivos, oxidantes, fácilmente inflamables o inflamables, ...”

De este modo, el residuo del Prestige no puede ser depositado directamente en vertedero por su naturaleza líquida y, por tanto, es necesario aplicarle algún tratamiento para que se solidifique.

Existen varias opciones para el tratamiento de residuos de petróleo o fuel. La aplicación de uno u otro depende de la naturaleza del residuo, por ejemplo, el caso más sencillo es el del hidrocarburo recogido en el mar, que puede ser fácilmente reprocesado en una refinería. Cuantas más sustancias espurias tenga el residuo, tales como arena, plástico, etc., más complejo es el

procesado del mismo, y más difícil la recuperación del hidrocarburo como combustible. Los residuos del Prestige tienen una composición muy heterogénea, incluyendo desde rocas a equipos de protección empleados por los voluntarios. Por tanto, dada la composición del residuo se ven reducidas las técnicas de gestión posibles. El IPIECA (2004) indica que para este tipo de residuos los tratamientos válidos son: el térmico de baja o media temperatura, la biorremediación, la estabilización y el lavado de sedimentos.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

La búsqueda de soluciones para el tratamiento de los residuos fue iniciada por la empresa Sogaris, encargada de la gestión de los residuos del Prestige. Esta compañía realizó una serie de experiencias previas de estabilización/solidificación para conocer las posibilidades de este tratamiento, en dichas pruebas se constató que este método permitía solidificar el residuo. La presente tesis tiene como punto de partida esta primera aproximación de la citada empresa, y partiendo de ella se profundiza en el procedimiento de estabilización/solidificación para luego ampliar la investigación hasta abarcar todo el proceso de gestión de los residuos de fuel del Prestige.

Es importante destacar que esta investigación se centra en la gestión de los residuos de fuel del Prestige a partir de un proceso de estabilización/solidificación. También es necesario resaltar que los residuos del Prestige representan un caso concreto de vertido, pero los resultados de la investigación realizada podrían ser válidos y muy útiles para la gestión de residuos de hidrocarburos en multitud de accidentes similares.

En resumen, esta investigación se centra en el tratamiento de los residuos de fuel del Prestige mediante la técnica de estabilización/solidificación, con la perspectiva de que estos resultados sean útiles para otras situaciones análogas. De este modo es posible detallar una serie de objetivos específicos:

1. Establecer los agentes estabilizantes y las proporciones de los mismos que permiten solidificar el residuo líquido, en este sentido existían pruebas realizadas con éxito aplicando cal viva. Determinar las propiedades generales de los residuos una vez estabilizados para poder determinar que usos se puede dar al residuo estabilizado.
2. Desarrollar una solución para el almacenamiento definitivo y seguro de los residuos estabilizados, esto ha de incluir una caracterización geotécnica que permita construir rellenos estables y también ha de incluir una caracterización de la lixiviación para conocer el riesgo para el medio ambiente.

3. Buscar posibles modos de reciclaje del residuo estabilizado en el ámbito de la construcción civil, bien como relleno de explanadas o también entrando a formar parte de materiales de construcción.

Estos tres objetivos se abordan en tres capítulos diferenciados, el primero en el Capítulo 6 titulado *Proceso de estabilización*, el segundo en el Capítulo 7 de *Almacenamiento definitivo* de los residuos del Prestige, y el tercero y último en el Capítulo 8 titulado *Reciclaje de los residuos del prestige mediante su inclusión en materiales de base cemento*.

Capítulo 5. Planificación de la investigación

5.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta investigación es encontrar soluciones para la gestión de los residuos de fuel del Prestige. El desarrollo de este objetivo pasa por transformar el residuo del Prestige de su forma líquida a una sólida, de modo que se pueda realizar un depósito en vertedero de una forma eficaz y segura. Esto se ha conseguido empleando una técnica de solidificación/estabilización con cal viva y serrín de granito. También se ha planteado el reciclaje del residuo mediante su inclusión en algún material de construcción de base cemento. Esto se consiguió previa estabilización del residuo. Utilizando este residuo ya tratado como árido fue posible fabricar morteros de cemento.

En el presente capítulo se describen los materiales y las técnicas analíticas y de ensayo empleadas durante el desarrollo de la investigación. Los materiales utilizados se subdividen en dos grupos, los que se emplearon en el proceso de estabilización, el residuo de fuel, la cal y el serrín de granito. En el segundo grupo se incluyen los materiales empleados en el amasado de morteros que incluían residuo de fuel.

Las técnicas analíticas utilizadas han sido de carácter diverso, según se aplicasen sobre el residuo estabilizado y el mortero de cemento. La descripción de estas técnicas se reparte en tres grupos de forma que se corresponden respectivamente con los capítulos 6, 7 y 8. Estos tres bloques experimentales se corresponden con una caracterización básica del residuo estabilizado, una caracterización geotécnica con perspectiva en un almacenamiento definitivo en vertedero y por último los ensayos relativos a los morteros que incluyen el residuo de fuel.

5.2. MATERIALES

5.2.1. Residuo de fuel del Prestige

Tras el accidente del Prestige, el buque vertió un total de 63.000 t de fuel pesado frente a las costas gallegas, causando una gran catástrofe ecológica. Este vertido tuvo una gran dispersión espacial, ya que afectó a casi toda la costa atlántica gallega, pero alcanzó también, aunque en menor medida, las costas cantábricas e incluso las francesas. El fuel vertido se recogió de dos modos diferenciados, en alta mar y en la costa. Cuando se recuperó fuel en el mar se obtenía una emulsión de agua e hidrocarburo, sencilla de gestionar como residuo, pero sin embargo, el fuel que se recolectó en la costa generó un residuo muy heterogéneo, compuesto de arena, agua, algas, piedras, plásticos, ropa de los voluntarios, etc. Es este último tipo de residuo el que se trata en esta investigación.

5.2.1.1. El fuel transportado por el Prestige

El fuel que transportaba el Prestige era un combustible del tipo fuel pesado, el cual se emplea como producto de combustión industrial en centrales térmicas, hornos, etc. y también como combustible para barcos de gran potencia. Se trata de una fuente de energía barata, pues se obtiene como residuo en la cadena de destilación del crudo, tras la separación de las fracciones de mayor calidad como gasolina, keroseno, gasoil, etc. El residuo de esta destilación es excesivamente viscoso, por lo que se reduce su viscosidad mediante tratamiento térmico y/o mezcla con algún destilado ligero. Tras este proceso, conocido como “cracking”, el fuel pesado tiene una viscosidad menor, pero aún así siempre es preciso su calentamiento para poder ser bombeado.

Desde un punto de vista descriptivo, se trata de un material oscuro, pegajoso y de textura semisólida, con una gran adhesividad y una baja solubilidad en agua. El fuel contiene casi todos los hidrocarburos de cadena larga del petróleo, lo cual lo hace muy poco volátil, con un alto punto de ebullición, superior a los 300 °C.

El fuel pesado se clasifica de manera diferente en función de la legislación de cada país, por lo que pudiera parecer que existe un gran número de tipologías. Esto no es así, el fuel pesado es siempre similar entre sí, es decir, tiene unas propiedades análogas y se emplea para el mismo uso. Sin embargo, la composición química del fuel pesado puede ser muy diferente de un caso a otro, al igual que dos tipos de crudo son muy diferentes entre sí. Además, el fuel pesado, por el hecho de ser una fracción residual del proceso de destilación del petróleo, contiene la mayor parte de los metales pesados y de las sustancias orgánicas nocivas que contenía el crudo.

El producto transportado por el *Prestige* era un fuel-oil pesado del tipo N° 2 en la terminología francesa, aunque también es conocido como fuel oil tipo M-100 según la terminología rusa o N° 6 en la de Estados Unidos (CCA, 2003). En el caso de que este hidrocarburo se vendiese

como combustible para barcos se le denominaría Bunker tipo C, siguiendo la nomenclatura internacional.

Existen numerosos análisis de las propiedades del fuel que el Prestige transportaba. Los datos provienen de muy diversos orígenes, destacando los estudios realizados por instituciones de investigación como el CSIC (Centro Superior de Investigaciones Científicas) y el CEDRE (Centre de documentation de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux) y también los informes técnicos del Comité Científico Asesor (CCA). Este último se constituyó ex profeso para dar apoyo científico a las decisiones de las autoridades españolas, aunque se apoyaba en el CSIC para el desarrollo de los análisis. En el presente documento se presenta una recopilación de los datos importantes del fuel transportado por el Prestige.

La carta de transporte del navío indicaba únicamente propiedades muy básicas del fuel, como una densidad específica a 15°C de 992,1 kg/m³ y una viscosidad de 615 cSt a 50°C. Determinaciones posteriores del CEDRE (2004) establecieron sobre una muestra de referencia 995 kg/m³ y 30.000 cSt a 15°C. Adicionalmente, sobre el fuel remanente en el pecio hundido se realizaron determinaciones por el CCA (2003), arrojando los siguientes resultados: densidad a 3 °C y 350 atm.: 1.012 kg/m³.

La composición elemental del fuel es de: Carbono 85.8 %; Hidrogeno 11.0 %; Azufre 2.28 % y Nitrogeno 0.69 %. El fuel contiene, además, un 22 % de hidrocarburos saturados, un 50 % de hidrocarburos aromáticos y un 28 % de resinas y asfaltenos (CSIC, 2002). Se trata pues, de un hidrocarburo de tipo naften-aromático. Además, la concentración de los 16 Hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA) prioritarios de la EPA (Environmental Protection Agency, U.S.A.) es de 1.264 mg/kg, con un índice de toxicidad equivalente de 49,7. Se constató que el fuel recogido en el mar, alcanzaba un contenido de hasta un 45-50% de agua.

El CEDRE (2004) realizó una interesante comparación entre las propiedades del fuel del Prestige con el fuel del Erika y del Baltic Carrier, los dos accidentes más importantes con fuel pesado más recientes en Europa. El fuel del Prestige es similar al producto vertido por el Baltic Carrier en 2001 en Dinamarca, el cual se caracterizaba por una densidad relativa elevada (0,9753 kg/l), próxima a la del agua y una fuerte viscosidad inicial (611 cSt a 50°C). El fuel del Prestige, al igual que el del Erika y del Baltic Carrier, muestra una baja tasa de evaporación y de dispersión natural, así como una tendencia a emulsionarse con agua de mar para formar una masa extremadamente viscosa. En la Tabla 5.1. se muestra un análisis del fuel del Prestige en comparación con los hidrocarburos de los vertidos del Erika y del Baltic Carrier.

Tabla 5.1. Composición química global de una muestra de fuel del Prestige, recogida el 18/11/02 en una mancha en el mar.

Buque	Hidrocarburos saturados (%)	Hidrocarburos aromáticos	Resinas (%)	Asfaltanos (%)
Prestige	48.5 ± 1.0	37.6 ± 1.9	8.3 ± 0.8	5.6 ± 0.6
Erika	22.2	55.6	15.6	6.6
Baltic Carrier	40.9	37.9	11.5	9.7

Estos resultados indican que la composición global del fuel del Prestige comparada con la del Erika está formada por una fracción aromática menos importante y es más comparable con el fuel del Baltic Carrier.

De manera general, dentro de un hidrocarburo como el fuel del Prestige, los compuestos de mayor toxicidad son los aromáticos. En la Figura 5.1 se representa el contenido en compuestos aromáticos que se pueden identificar y cuantificar en el fuel del Prestige. En la Figura 5.2 se muestra esta composición en comparación con la del Erika y el Baltic Carrier.

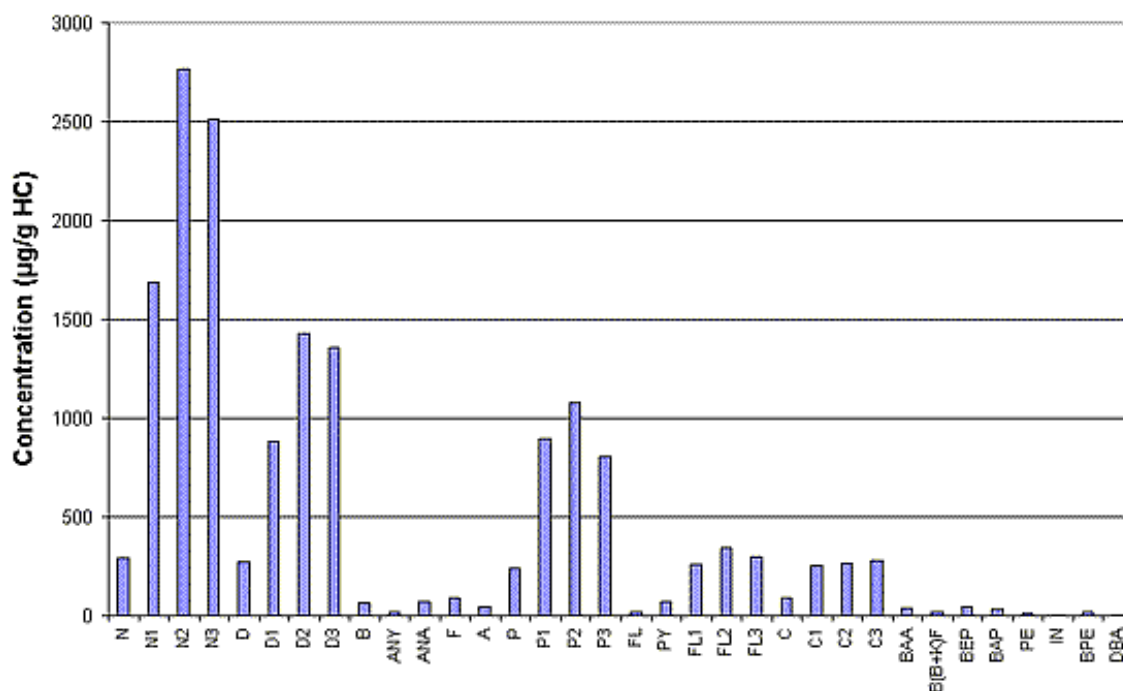


Figura 5.1. Contenido de los 16 HAP (Hidrocarburos aromáticos policíclicos) de la lista de la EPA y sus derivados alquilos, así como ciertos compuestos de azufre (Dibenzotiofeno) (CEDRE, 2004).

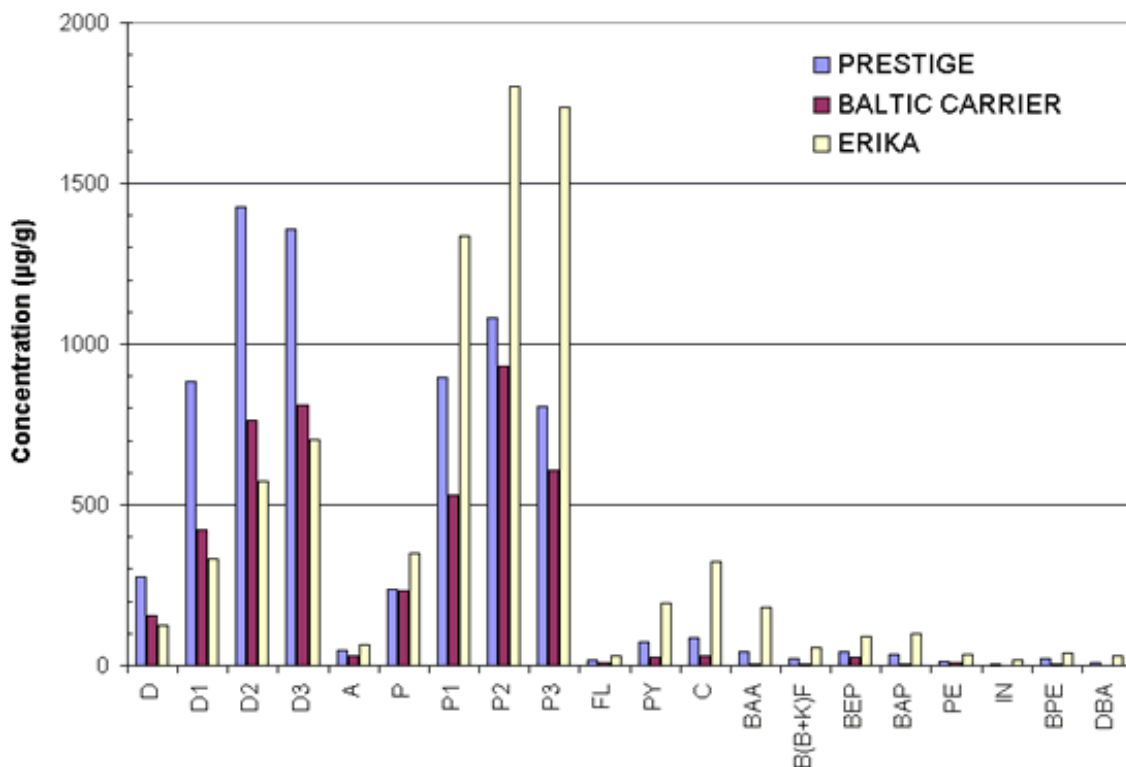


Figura 5.2. Comparación de la composición aromática del fuel del Prestige, del Erika y del Baltic Carrier. Expresada como contenido de los 16 HAP (Hidrocarburos aromáticos policíclicos) de la lista de la EPA y sus derivados alquilos, así como ciertos compuestos de azufre (Dibenzotiofeno) (CEDRE, 2004)

En general se observa que el fuel del Prestige presenta contenidos menores en compuestos aromáticos que el del Erika, Pero en cambio, es más rico en Dibenzotiofenos (D, D1, D2, D3).

5.2.1.2. Residuo de fuel recogido en el mar

El Prestige vertió una importante cantidad de fuel pesado al mar. En este medio, el hidrocarburo tiende a formar una emulsión con un contenido aproximado en agua del 42 %. Esta emulsión presentaba además, una mayor viscosidad que el fuel original, lo cual dificultaba en gran medida las tareas de recogida. La medida de la viscosidad de la emulsión a 15 °C fue de 100 000 cSt, es decir, mayor que los 30.000 cSt del fuel original, y con una densidad también mayor, de 1,01 kg/l frente a 0,992 kg/l del fuel original (CSIC, 2002 y CEDRE, 2004). Esta masa emulsionada permanecía compacta en forma de manchas o placas en la superficie del agua. En estas mismas condiciones ambientales, la emulsión procedente del Erika, con un contenido en agua del 50% presentaba una viscosidad de 60 000 cSt (también a 15°C) (CEDRE, 2004).

A los dos meses de permanencia en el mar, las pérdidas por evaporación y disolución no alcanzan el 5% y su biodegradabilidad en el medio es desconocida. Se estima, no obstante, un porcentaje de biodegradación inferior al 10 % en los primeros meses (CSIC, 2002).

El Prestige vertió un total de 63.000 t de fuel al medio marino, de las cuales se recogieron unas 23.400 t en el mar y aproximadamente 19.800 t en la costa (Tabla 5.2). El resto de fuel, (aproximadamente 20.000 t) se dispersaron en el mar, se biodegradaron o, más probablemente, se encuentran depositadas todavía en las costas y fondos marinos de Galicia.

Tabla 5.2. Balance masas de los residuos recogidos asociados al vertido provocado por el Prestige. (CEDRE, 2004)

Zona de recogida	Residuo Total (t)	Relación fuel/residuo	Fuel Puro (t)	Otros Residuos (t)
Costa gallega	67883	0.18	12219	55664
Costa cantábrica	21855	0.16	3497	18358
Costa francesa	25470	0.16	4075	21395
Mar abierto	55543	0.42	23388	32155
Total	170751	~0.25	43179	127572

En el mar se recogió una importante cantidad de fuel, tarea que se desarrolló por barcos anticontaminación venidos de todo Europa y, sobre todo, gracias a la intensa labor de los marineros de bajura, los cuales recuperaron una gran cantidad de fuel empleando para ello sus propias embarcaciones y herramientas poco adecuadas para la tarea.



Figura 5.3. Recogida de fuel en el mar, realizada principalmente por los marineros (La Voz de Galicia, 2003).

El residuo de fuel recogido en el mar se compone casi exclusivamente de fuel y agua, con un contenido medio en agua del 42 %. La gestión de este residuo es sencilla, ya que existen diversas técnicas de separación de agua y fuel, como el demulsionado, uso de aditivos, tratamientos térmicos, etc. Estos procesos son relativamente sencillos y suelen poder hacerse en refinerías o instalaciones similares. Además se consigue la revaloración del residuo ya que el resultado obtenido es un fuel de peor calidad que el original pero que puede ser vendido como combustible.

5.2.1.3. Residuo de fuel recogido en la costa

Del total de fuel, unas 22.000 toneladas se recogieron entre Galicia, la costa Cantábrica y el golfo de Vizcaya. La recogida de estos residuos se realizó en playas y acantilados, por lo que fue

mucho más compleja que la realizada en el mar. Dado el lugar de recuperación, el fuel venía acompañado de muchas otras sustancias que habían sido impregnadas por el fuel, tales como agua, rocas, arena, algas, etc. Adicionalmente, por una gestión ineficiente, a este residuo se le unieron gran cantidad de plásticos. Por todas estas razones, en Galicia aunque sólo se recogieron un total de 12.300 toneladas de fuel, el total de residuos recuperados fue muy superior: 67.900 toneladas.

En la catástrofe del Prestige no existía una estructura organizativa preparada para responder a una emergencia como la acaecida. Sin embargo, sí se actuó con premura y exhaustividad, ya que se limpiaron todas las playas y acantilados accesibles. En las primeras fechas tras la marea negra las tareas de limpieza se desarrollaron gracias al trabajo desinteresado de miles de voluntarios y, en posteriores fechas, un gran número de operarios contratados entre los trabajadores afectados por la marea negra: pescadores, mariscadores, etc.

La composición del residuo que se recogió en la costa dependía mucho de los medios disponibles y de la formación de los trabajadores. El trabajo de los voluntarios fue indispensable para conseguir limpiar las playas (Figura 5.4 y Figura 5.5), sin embargo, el objetivo era ese: limpiar. De este modo los voluntarios recogieron el fuel y todos los materiales manchados de hidrocarburo, y todos estos residuos se depositaron de manera conjunta en el único contenedor que existía, sin separación entre fuel casi puro, elementos un poco manchados e incluso ropa y calzado. Por causa de esta gestión no separativa, el residuo contenía una mayor cantidad de espurios lo cual dificultaría la gestión.

Este modo de gestionar la recogida de residuos fue eficaz ya que se limpiaron las costas, pero ineficiente, ya que el residuo generado tenía una difícil gestión. La Administración se vio sobrepasada por la magnitud de la tragedia: le fue difícil gestionar el volumen de acciones de voluntariado, dotarlos de medios de protección, de herramientas, gestionar los residuos, etc. Esta situación se agravó además dada la enorme extensión de la zona afectada.

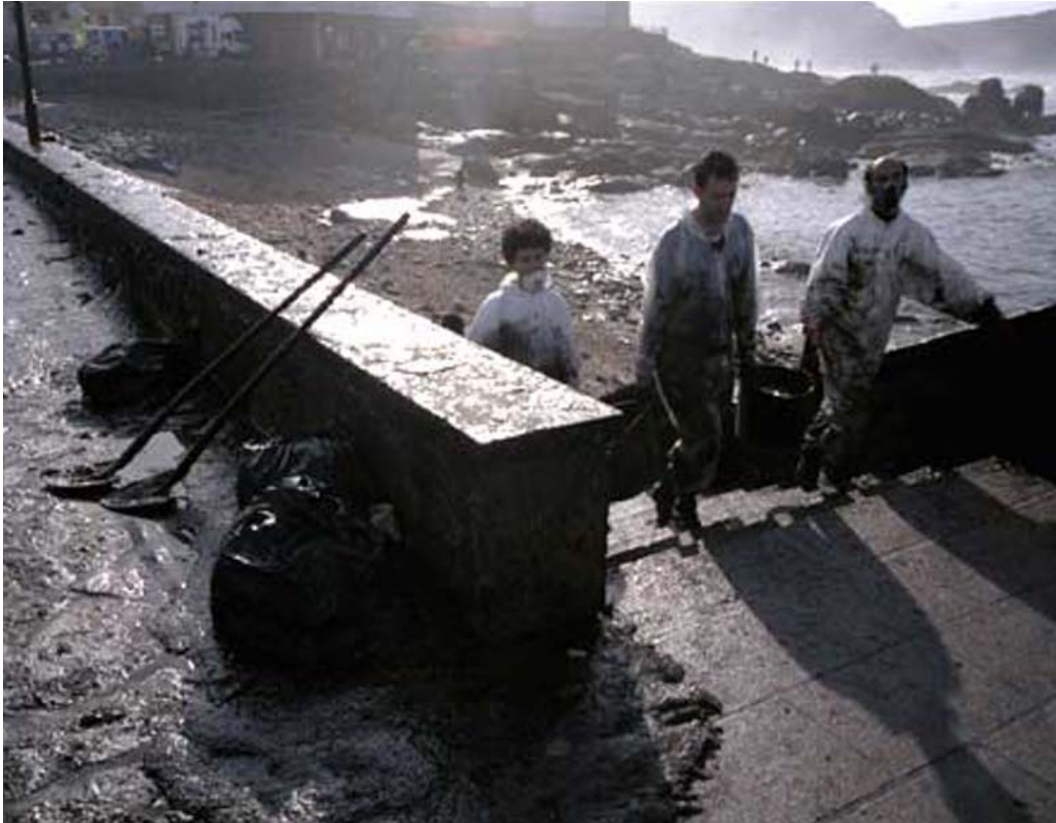


Figura 5.4. *Voluntarios trabajando en el paseo marítimo de Muxía. (La Voz de Galicia, 2003)*



Figura 5.5. *Voluntarios trabajando en la costa de Muxía. (La Voz de Galicia, 2003)*

Gracias a la ingente labor de miles de personas se consiguió limpiar la costa. Sin embargo, el residuo generado en este proceso evidenciaba los problemas de gestión, ya que existían unos

únicos contenedores que eran utilizados para depositar todos los residuos. Estos contenedores se transportaron hasta balsas provisionales que almacenaban los residuos de cada zona. Existió un número indeterminado de balsas y muchas de ellas se situaron en instalaciones ya existentes como fábricas, vertederos municipales, etc.

Tras los primeros meses de recogida intensiva de los residuos se comenzó a plantear la necesidad de gestionar esos residuos, tarea que no parecía sencilla. Este trabajo se le encomendó a la empresa SOGARISA (Sociedad Gallega de Residuos Industriales de Galicia), empresa en la cual se construyó una balsa cubierta para dar cabida a estos residuos (Figura 5.6). Tras la construcción de la balsa se comenzó a transportar todos los residuos del Prestige que había en balsas provisionales por todo el territorio gallego, tarea que finalizó en 2005.

Tal y como se puede ver en la Figura 5.6 el residuo almacenado contiene una gran cantidad de materiales espurios, incluso de gran tamaño como cajas, bidones, etc (Figura 5.6). Este residuo tiene una textura semisólida de carácter muy viscoso y con gran adhesividad a todas las superficies. Según indicaciones de los técnicos de la empresa SOGARISA en el conjunto del residuo predomina, por orden, el agua, el fuel, la arena y los plásticos. En las catas que se realizaron se encontraron espurios de todo tipo, desde latas de refresco hasta calzado de los voluntarios. Este es el residuo que hay que gestionar.



Figura 5.6. *Balsa de almacenamiento de los residuos de fuel del Prestige. SOGARISA, As Pontes.*

5.2.1.4. Muestras de residuo de fuel

Para la realización de la presente tesis se han empleado muestras obtenidas de la balsa en la cual se almacenan los residuos del Prestige. Estas muestras fueron suministradas por la empresa SOGARISA, a quien se agradece toda su colaboración. El residuo que está depositado en esta balsa es una mezcla de fuel, agua de mar, arena, piedras, algas, maderas, bolsas de plástico y herramientas e indumentaria de trabajo. Según datos de la empresa gestora, la ratio *fuel/no fuel* (F/NF en adelante) del residuo conjunto es de aproximadamente 0,25. Este residuo, además de no ser homogéneo, tiene una composición muy diferente en las distintas partes de la balsa.

Dada la escasa uniformidad del residuo, es complejo definir una muestra representativa del conjunto del residuo. Es por esto que se decidió emplear dos muestras distintas, una con un alto contenido en fuel y otra con un contenido medio, más parecido al del residuo conjunto. A continuación se describen ambas muestras:

- *Residuo puro:* es una muestra de residuo de fuel que contiene principalmente fuel emulsionado con agua, presenta además pequeñas cantidades de arena y algún plástico. Se trabajó con un volumen muestral $0,3 \text{ m}^3$ que presentaba un ratio F/NF con valor 0,75. Se ha establecido que esta muestra representa el límite superior en cuanto a cantidad de fuel que pueden contener los residuos del Prestige. Esta muestra ha sido la empleada en la mayoría de los ensayos.
- *Residuo impuro:* se trata de una muestra de residuo de fuel que contiene una gran cantidad de otros restos. Se disponía de un volumen de trabajo cercano a $1,5 \text{ m}^3$ con un ratio F/NF de aproximadamente 0,25 (Figura 5.7). Esta muestra, en conjunto, era muy variable en composición. Sirva de ejemplo el hecho de que se han encontrado plásticos, arena, rocas, alambres e incluso calzado. Se ha establecido, para el desarrollo de la investigación, que este lote de residuo refleja lo que puede haber en el conjunto.



Figura 5.7. *Muestra de residuo impuro.*

Para determinar las proporciones de residuo de fuel, cal viva y serrín de granito se ha trabajado con el residuo puro. Esto implicaba admitir que si se alcanzaba una dosificación que estabilizase este residuo con mucho fuel, esa misma dosificación sería válida para un residuo impuro con menor contenido en fuel. Esta hipótesis tenía que ser puesta a prueba, y para ello se llevó a cabo una experiencia de estabilización con residuo impuro, para así corroborar que las proporciones que sirven para el residuo puro no presentan problemas con otros lotes de residuo que contengan menor cantidad de fuel.

5.2.2. Cal viva

En el proceso de estabilización se ha empleado cal viva como agente estabilizante, se trata de una cal viva convencional, usada habitualmente en la industria y en la agricultura. Ha sido cedida por la empresa CEDIE, a quien se agradece su colaboración. Según datos del suministrador, la pureza de CaO es del 77%, y más del 92% de los granos tienen un tamaño no mayor de 6 mm. La Figura 5.8 muestra una difracción de rayos X de este material. Aparte de la cal (CaO), se encuentran presentes una cierta cantidad de periclusa (MgO), silicato bicálcico (Ca₂SiO₄) y algo de portlandita (Ca(OH)₂).

Tras los primeros ensayos de la segunda línea de esta investigación se desveló que la integración del residuo estabilizado en mortero de cemento podía desarrollar reacciones expansivas en las probetas. Tras un estudio concienzudo se achacó tal fenómeno a la presencia de partículas de cal viva, que por su gran tamaño, permanecían parcialmente hidratadas tras el proceso de es-

tabilización. Estas partículas desarrollaban su reacción final al contactar con el agua de amasado durante la fabricación de los morteros, provocando de este modo una expansión tardía en el seno del mortero. Este problema se controló tras someter la cal viva a un proceso de tamizado en el cual se limitó el tamaño máximo a 0,4 mm. En el análisis de difracción de rayos X se contrastan los resultados de una muestra de cal viva original y de una muestra tamizada, tal y como se puede ver, con el proceso de tamizado se consigue eliminar la portlandita. Tras establecer este proceso no se volvieron a observar reacciones expansivas en las probetas de mortero.

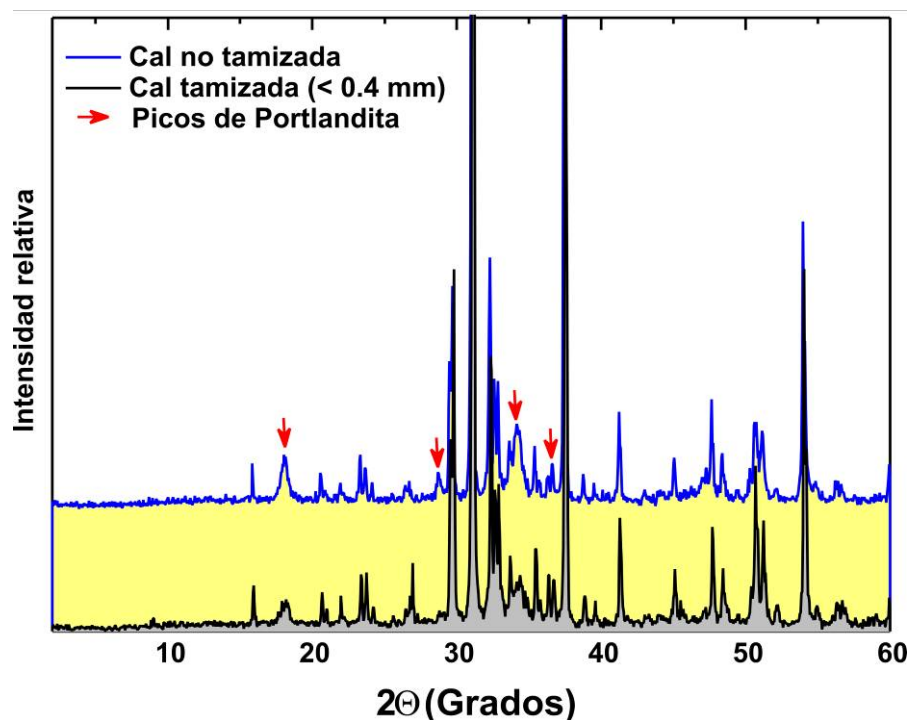


Figura 5.8. *Difractogramas de rayos X de la cal viva empleada (original y tamizada). La mineralogía incluye óxido de cal, periclasa y silicato bicálcico. Las flechas marcan la portlandita en el material no tamizado.*

5.2.3. Serrines de granito

Los serrines de granito son residuos generados por los procesos de corte y transformación de granitos ornamentales. Esta actividad constituye uno de los pilares básicos de la economía gallega, destacando la industria de la localidad pontevedresa de Porriño, que concentra la mayor parte de esta producción.

Los métodos tradicionales de producción de piedra implican una baja generación de estériles (inferior al 2 % del total de la producción). Una parte de ellos, los más gruesos, pueden ser reaprovechados como áridos tras su paso por plantas de machaqueo. Sin embargo, los estériles finos, es decir, aquellos que se producen durante las tareas de corte y pulido de la piedra (“*serrines de granito*”) no tienen aplicaciones específicas concretas y deben ser gestionados, por tanto, como residuos.

Sólo en esta zona de Porriño se generen más de 300.000 m³ anuales de serrines, que van directamente a vertedero. Esta ingente cantidad de residuos, así como las perspectivas de crecimiento del sector, han propiciado una sensibilización creciente entre los productores y la Administración, quienes deben encontrar para los serrines aplicaciones económicamente sostenibles y una estrategia de gestión ambiental asumible. En esta línea, se han desarrollado trabajos de investigación muy interesantes, como los de Barrientos (2007), sobre caracterización de los serrines y aplicaciones en ingeniería civil, y los de Vázquez (2008), sobre el empleo de serrines de granito como barrera de sellado de vertederos.

Los serrines de granito empleados en la presente tesis provenían de la Asociación Gallega de Graniteros sita en Porriño, y se obtuvieron gracias a la colaboración de Barrientos (2007). Este autor además realizó, en el marco de su tesis doctoral, una caracterización completa de los serrines de granito procedentes de Porriño; de este estudio se presentan algunos datos básicos a continuación.

Los serrines se producen en las plantas de transformación durante las operaciones de corte, pulido y acabado de bloques de roca extraídos de las canteras de la comarca o bien importados desde muy diversos orígenes. El proceso de corte de bloques de roca suele hacerse mediante el empleo de telares con flejes metálicos refrigerados con agua. Para facilitar el proceso de corte, al agua se le añade cal y una granalla metálica. De ese modo, la mineralogía de los lodos está conformada por los propios minerales de la litología aserrada, virutas metálicas (resultado del desgaste de los flejes y de la granalla) así como una serie de minerales secundarios, producto de distintos procesos físico-químicos y de alteración (Tabla 5.3).

Tabla 5.3. Composición química (% en peso) de los elementos mayores de los serrines de granito determinados mediante fluorescencia de rayos X. M1, M2, M3: serrines de telar; M4: serrines de disco. (Barrientos, 2007)

Óxidos (% peso)	Muestra			
	M1	M2	M3	M4
SiO ₂	66,1	66	67,5	69,7
Al ₂ O ₃	13	14,4	13,6	15,8
Fe ₂ O ₃	6,6	6	5,3	1,59
CaO	5,4	4,2	3,6	1,8
K ₂ O	4,7	4,8	5	4,5
Na ₂ O	3,01	3,22	3,00	4,00
MgO	0,52	0,5	0,39	0,5
TiO ₂	0,23	0,25	0,26	0,18
P ₂ O ₅	0,13	0,37	0,23	0,2
MnO	0,08	0,071	0,07	0,03

Como se puede ver, la composición química de los serrines de granito se sitúa en el entorno de los valores normales para rocas graníticas, con valores mayores de lo normal en Fe_2O_3 atribuibles a la granalla metálica y, en cal, debido a que ésta se añade para mejorar la lubricación del corte.

La separación del serrín del agua de recirculación que lo contiene se puede hacer empleando distintos métodos: balsas de decantación, sacos filtrantes o filtros-prensa. Esta última técnica es la más eficaz para grandes producciones, ya que extrae el serrín con un contenido de humedad ligeramente superior al de su límite plástico, lo cual mejora su manipulación y facilita el almacenamiento (Figura 5.9).

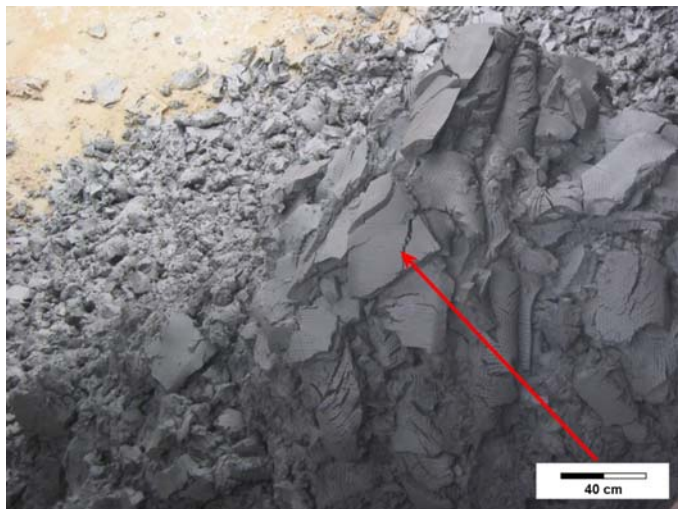


Figura 5.9. *Aspecto de los serrines de granito a su salida de los filtros-prensa en una empresa transformadora de O Porriño. Las tortas que se observan en primer plano tienen unas dimensiones aproximadas de 40x40 cm*

Como se ha visto en la figura anterior, los serrines de granito muestran un color gris, aspecto homogéneo y además, no presentan agregados a simple vista. El tamaño de las partículas de serrín es muy fino (Figura 5.10), por lo que los serrines se clasificarían como material limo-arcilloso según las clasificaciones habituales de suelos. Sin embargo este material no se comporta como un material arcilloso convencional ya que sus partículas son muy diferentes. Una arcilla convencional proviene de la degradación de filosilicatos lo cual le confiere una morfología laminar. Sin embargo, en el caso de los serrines las partículas no son tan laminares y, por tanto, tienen un comportamiento similar al de un material granular de grano fino.

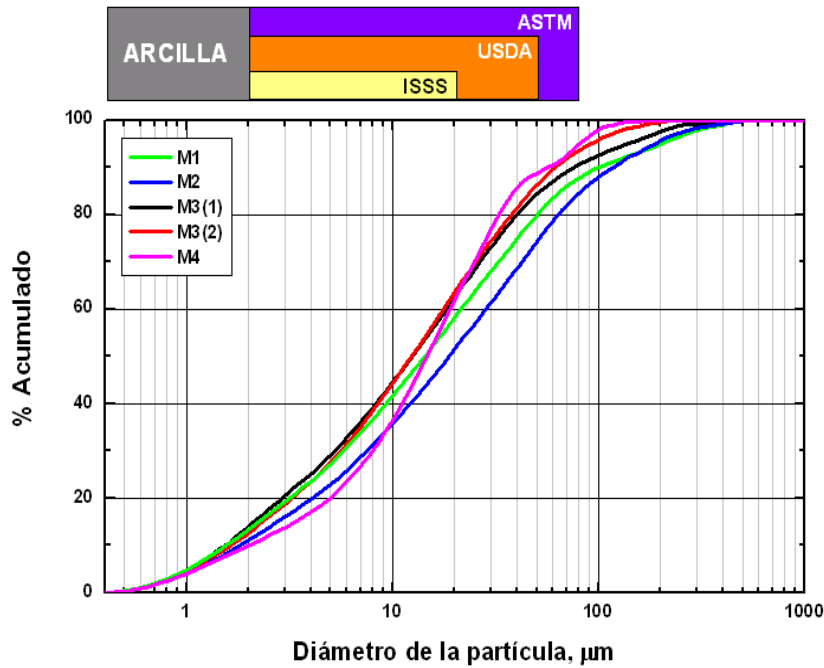


Figura 5.10. Análisis granulométrico (% acumulado) de las muestras de serrín de granito de corte con telar (M1, M2, M3(1) y M3(2)) así como de corte con disco (M4). Los recuadros situados sobre el gráfico se corresponden con el límite de tamaño de grano de partículas tipo arcilla (2 mm) así como el rango de diámetros para partículas tipo limo, de acuerdo con distintas referencias. ISSS: Internacional Society of Soil Science; USDA: U.S. Department of Agriculture; ASTM: American Society for the Testing of Materials (Barrientos, 2007)

Los serrines de granito se recuperan de los lodos a la salida de los filtros prensa, momento en el que presentan una humedad importante (35-40%). Con el paso del tiempo los serrines se secan formando terrones de escasa consistencia. Es sencillo desapelmazar estos terrones mediante aplicación de fuerza o impacto, obteniendo como resultado un material pulverulento.

Los serrines de granito que se han empleado en los ensayos de estabilización, primero se secaron en estufa a 105°C hasta masa constante, para luego desapelmazarlos mediante una máquina de ensayo de Los Angeles, constatándose que, con un número reducido de revoluciones, (100) se conseguía un serrín totalmente pulverulento. Sería también posible emplear el serrín directamente tras la salida de los filtros prensa pero, al estar húmedo, se consumiría más cal durante el proceso de estabilización. Por tanto, lo más recomendable para poder utilizar el serrín de granito como agente estabilizante sería realizar un secado y un desapelmazamiento, pudiendo éste último acoplarse en la propia mezcladora que efectúa la estabilización.

En el contexto de esta tesis se ha estudiado el empleo de los serrines de granito con el único fin de ser un material que, en conjunción con la cal, facilite la estabilización. Sin embargo, una investigación paralela realizada por Vázquez (2008), ha demostrado que los serrines de granito también son válidos para construir barreras de impermeabilización.

5.2.4. Materiales empleados en morteros

Uno de los objetivos planteados era el de reciclar el residuo estabilizado incluyéndolo como árido en morteros de cemento. Estos morteros se componían de dos áridos, residuo estabilizado y arena, y también incluía cemento, agua y aditivo superfluidificante (para mejorar la docilidad).

De entre todas las mezclas estabilizadas ensayadas se seleccionó una de ellas, la mezcla estabilizada M3, compuesta por un 30 % de residuo de fuel, un 35% de cal viva y 35% de serrín de granito. Se seleccionó esta porque presentaba una textura pulverulenta adecuada para la separación del residuo estabilizado en fracciones granulométricas.

La arena empleada fue una arena caliza de tamaño 0/4 mm en la cual se le eliminó la fracción menor de 0,4 mm para que los finos del mortero fuesen únicamente el residuo estabilizado.

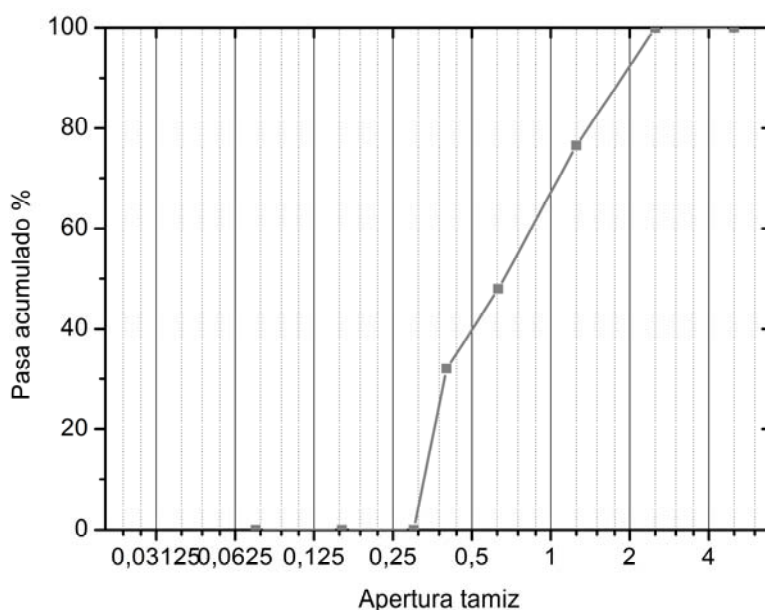


Figura 5.11. *Granulometría de la arena utilizada en la que ha sido retirada la fracción menor de 0,4 mm para su empleo en morteros.*

El cemento que se seleccionó fue del tipo Pórtland puro CEMI, ya que de este modo no se introducían variables adicionales en la dosificación. De entre los 6 tipos de cemento Pórtland puro que la norma define (UNE-EN 196-1), en la práctica, los datos del IECA (2005) revelaron que sólo se fabrican cementos de tres categorías: CEM I 42.5R, 52.5N y 52.5R. De entre ellos, se optó por el primero, de menor avidéz por el agua y generador de un calor de hidratación más controlado.

El aditivo superfluidificante que se ha utilizado es Melcret 222 y, en las etapas finales, se empleó también de manera limitada Glenium C355, ambos de la empresa BASF, a la que se agradece su colaboración.

5.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

5.3.1. Estabilización / solidificación

El residuo de fuel que se ha de gestionar es una amalgama de fuel, agua, arena, rocas, plásticos, etc. Mediante la aplicación de un tratamiento de estabilización se consigue que el residuo de fuel se transforme en un residuo sólido. Para este proceso se emplean dos materiales, cal viva y serrín de granito en cantidades variables, con lo que se consiguen resultados diferentes. En general, cuanto mayor contenido en residuo de fuel, más grueso es el resultado y, si se supera el 50 % de residuo de fuel no es viable la estabilización.

Se han realizado dos experiencias de estabilización empleando para ello dos lotes diferentes de residuo de fuel: uno con mucho fuel y pocos elementos espurios (plásticos, arena, etc.) al que se ha denominado “*residuo puro*”, y otro con un alto contenido de espurios, el “*residuo impuro*”. Ninguna de las muestras empleadas es representativa del conjunto, ya que para poder conseguir esa muestra representativa sería preciso cuartear un volumen de residuo no manejable a escala de laboratorio. Sin embargo, la muestra de residuo puro representa el límite máximo de fuel que se pueda encontrar en los residuos del Prestige y, en este punto, se admitió como válida la hipótesis de que si se conseguía estabilizar este residuo puro, sería posible estabilizar cualquier lote de residuo del Prestige. De este modo, se ha trabajado sobre todo con el lote de residuo puro, realizando diversos ensayos de estabilización, los cuales se resumen en la Tabla 5.4. Adicionalmente se realizó una experiencia de estabilización empleando el lote de residuo impuro para corroborar la validez del proceso de estabilización con un residuo con más espurios, más representativo del conjunto.

Tabla 5.4. Nomenclatura y composición de las mezclas ensayadas.

Nomenclatura de la mezcla	Composición (% en peso)		
	% Residuo de fuel	% Cal viva	% Serrín de granito
M1	30	70	0
M2	40	60	0
M3	30	17.5	52.5
M4	30	35	35
M5	30	7	63
M6	40	30	30
M7*	30	35	35
M8*	30	35	35
M9	50	50	0
M10	30	0	70
M11	40	15	45

(*) Mezclas realizadas con residuo impuro de fuel

El proceso de estabilización consistió en un amasado manual en el que también se emplearon pequeñas herramientas para facilitar las operaciones. El mezclado manual tenía una duración de 15-30 min, hasta alcanzar una mezcla completamente homogénea. Tras la estabilización era necesario un tiempo de reposo variable (entre 2 horas y varios días) hasta que el residuo se solidificaba completamente. En general, cuanto mayor era el contenido en fuel, más tiempo se requería para la reacción de estabilización. Una vez que el residuo estaba solidificado, era posible separar los elementos espurios mediante tamizado, aunque esta operación únicamente se realizó en la estabilización del residuo impuro.

5.3.2. Caracterización básica

Tras la estabilización del residuo de fuel con cal viva y serrín de granito se consigue un material sólido de textura similar a la de la arcilla seca. Al tratarse de un residuo sólido se consiguen importantes ventajas en cuanto a la manejabilidad del residuo. Esto supone un avance importante aunque, para poder profundizar en la búsqueda de métodos de gestión del residuo es necesario conocer las propiedades más elementales del material estabilizado.

La caracterización básica que se ha realizado consta de medidas de humedad, densidad de partículas y análisis termogravimétrico. Este último ensayo tiene por objetivo delimitar las fases presentes en el residuo una vez estabilizado.

Se constató que el material estabilizado tiene un fuerte carácter hidrófobo, por lo que ha sido difícil e incluso imposible realizar algunos ensayos sobre el material. A esto también ha contribuido la naturaleza de las partículas, que son un aglomerado de material pulverulento fácilmente desmenuzable. De este modo, un ensayo simple como el de granulometría no se ha podido realizar, ya que por tamizado en seco, el residuo tupía los tamices y, por vía húmeda, la hidrofobia del material falseaba los resultados. En otros casos, como en la determinación de la densidad de las partículas, se ha conseguido encontrar un método alternativo para la realización del ensayo.

5.3.3. Caracterización geotécnica

Uno de los objetivos planteados era el desarrollo de una solución para el almacenamiento definitivo de los residuos de fuel del Prestige. El desarrollo de esta línea se orienta desde la perspectiva de la construcción de un vertedero, el cual debería alcanzar características portantes suficientes para albergar el residuo estabilizado de una forma permanente y segura. Teniendo esto como objetivo se planteó la realización de un conjunto de ensayos geotécnicos, que se desglosan a continuación:

Corte directo: la determinación de las propiedades del corte permite conocer el comportamiento resistente que tendría un relleno hecho del material estabilizado. Mediante este ensayo se obtiene datos de cohesión y de ángulo de rozamiento interno. Por causa de la hidrofobia del material no ha sido posible realizar el ensayo de corte directo en condiciones saturadas, por lo que se ha realizado del único modo posible: en seco.

Consolidación: el estudio de la consolidación de suelos permite conocer como se asienta un terreno ante las cargas que sufre. La consolidación se simula mediante los ensayos edométricos, que estudian la deformación que produce en el tiempo una carga aplicada sobre una muestra de suelo. El ensayo que se ha realizado es análogo al edométrico, es decir, se ha seguido en la medida de lo posible el procedimiento normalizado de la UNE-EN 103405 pero, a causa de la hidrofobicidad de la mezcla, ha debido ser desarrollado en seco. Esto está en contraposición con los estudios de consolidación habituales en los que se mide la disipación de la presión del agua al aplicar presión, en lo que se conoce como consolidación primaria. Después de que la muestra ha liberado toda el agua en exceso, y que la presión de agua es la hidrostática, comienza la consolidación secundaria que representa la deformación de la estructura granular del suelo. De este modo, en el ensayo que se ha realizado, se está midiendo la consolidación secundaria del material estabilizado desde el principio.

Estabilidad al calentamiento: existían ciertas dudas sobre la estabilidad del residuo estabilizado ante las temperaturas que se podían dar si se mezclaba en un vertedero de residuos sólidos urbanos. La temperatura máxima a la que el residuo podría estar sometida se estimó en 60 °C. Para simular estas condiciones con margen de seguridad se sometió el material estabilizado durante 24 h a una temperatura de 105°C. Tras este proceso se estudiaba visualmente la textura de la muestra en busca de una refluidificación o un cambio de aspecto.

Compactación: los ensayos habituales de compactación se emplean para optimizar la humedad más adecuada para la compactación de suelos y terrenos. Se ha utilizado como referencia el ensayo Proctor en el cual se determina la humedad que produce la máxima densidad del suelo. Al igual que en otros ensayos geotécnicos, la hidrofobia del material dificulta la realización estricta del ensayo habitual de compactación. Sin embargo, se ha utilizado esta medida para poder comparar las diferentes mezclas estabilizadas entre sí.

Ensayo CBR: mediante este ensayo es posible determinar la capacidad resistente de explanadas y bases de carretera. De este modo se puede clasificar un terreno compactado en función de su utilidad como apoyo para las carreteras. Al igual que en otros ensayos, éstos han sido realizados en seco debido a la hidrofobia del material.

5.3.4. Fabricación y ensayo de morteros

El objetivo planteado inicialmente consistía en incluir el residuo estabilizado dentro de algún material de base cementosa. Para alcanzar este objetivo se decidió fabricar mortero que incluyese como árido el residuo de fuel estabilizado. Se estableció fabricar morteros en vez de hormigones debido a que la fabricación de estos últimos incluiría la adición de árido grueso, lo cual complicaría el ajuste de la dosificación sin aportar información.

No existen métodos de dosificación de mortero con fuel, por lo que las dosificaciones deben obtenerse mediante un proceso iterativo de prueba-error. Una vez conseguidas estas dosificaciones adecuadas se pueden fabricar probetas que permitan evaluar la resistencia y la durabilidad de este tipo de morteros.

5.3.4.1. Dosificaciones

Dada la complejidad de la obtención de una dosificación se comenzó la aproximación mediante una serie de experiencias piloto. Para ello, se tomó como patrón un mortero convencional dosificado según una proporción de tres partes de arena por una de cemento, muy habitual en la construcción. Tomando este mortero como partida se procedió a ajustar las dosificaciones en un entorno de incertidumbre de muchas variables. Tras una serie de aproximaciones fue posible establecer los parámetros de las dosificaciones de morteros:

- De entre todas las mezclas estabilizadas probadas se seleccionó una de ellas, la mezcla estabilizada M4, con un 30 % de residuo de fuel, un 35% de cal viva y 35% de serrín de granito. Esta fue la elegida porque combinaba una textura pulverulenta y una buena economía.
- En la dosificación de los morteros se sustituye arena por residuo estabilizado, manteniendo siempre constante el ratio de (Arena + residuo estabilizado) / cemento = 3 (en peso) que es una relación habitual en morteros.
- La cantidad de cemento empleada ha sido de 450 kg/m³. Es una cantidad alta, pero necesaria para alcanzar resistencias adecuadas. La introducción de la mezcla estabilizada modifica a la baja las prestaciones mecánicas y la durabilidad, y en este sentido un alto contenido de cemento compensa los efectos.
- El aditivo superfluidificante se ha limitado al 2,5% de peso de cemento. Permite corregir la trabajabilidad, por lo que el valor final dependerá del parámetro anterior. La variabilidad de este parámetro intentará ajustarse a la lógica obtención de mezclas que, en estado fresco, permitan el amasado y la fabricación de probetas en moldes con similares consistencias. Se ha utilizado el aditivo Melcret 222 y en las etapas finales se ha empleado también Glenium C355 con el que se han obtenido mejores resultados de resistencia a compresión.

- La relación agua/cemento se mantiene en el rango de 0,5 a 0,65 en peso. Esta relación marca dos parámetros fundamentales: el primero es la categoría resistente del producto final, mayor cuanto menor sea la ratio apuntada; el segundo es la trabajabilidad de la mezcla, mayor a medida que crece tal ratio.
- Contenido de residuo de fuel = 5% a 14 %. Este fuel se introduce en forma de residuo estabilizado (30 % de residuo de fuel, 35 % de cal viva y 35 de serrín de granito). Por tanto, un porcentaje dado de fuel implica que en el mortero se ha introducido una masa de residuo estabilizado 3,3 veces superior. Los límites en la introducción de fuel quedan fijados por la unión de dos razones. La primera es de índole económico: porcentajes menores al 5% exigirían la fabricación de volúmenes enormes de material para reciclar una parte significativa del fuel existente. La segunda es de carácter técnico: porcentajes por encima del 14% hacen inviable la fabricación de un mortero.

La combinación de los distintos parámetros del amasado produce un total de 18 dosificaciones diferentes que incluyen residuo estabilizado de fuel. Se añaden además cuatro morteros sin residuo estabilizado, que sirven de referencia. La nomenclatura de las dosificaciones se compone de la letra “D”, el céntuplo de la relación agua cemento y finalmente un guión que indica el porcentaje de residuo de fuel que incluye el mortero. Este último parámetro se obtiene de multiplicar la cantidad de mezcla estabilizada por el contenido de residuo de fuel, por tanto, el contenido de residuo estabilizado es 3,33 veces superior al contenido de residuo de fuel. Como ejemplo de designación, una dosificación con relación a/c 0,65 y un contenido en residuo de fuel del 10% se denomina D65-10.

En la Tabla 5.5 se muestran las nomenclaturas de todas las dosificaciones realizadas.

Tabla 5.5. *Nomenclatura de las dosificaciones empleadas*

Grupo	Nomenclatura de dosificación	Relación a/c	% Residuo de fuel
D65	D65-0	0,65	0
	D65-8	0,65	8
	D65-9	0,65	9
	D65-10	0,65	10
	D65-11	0,65	11
	D65-12	0,65	12
	D65-13	0,65	13

Grupo	Nomenclatura de dosificación	Relación a/c	% Residuo de fuel
D60	D60-0	0,60	0
	D60-8	0,60	8
	D60-9	0,60	9
	D60-10	0,60	10
	D60-11	0,60	11
D55	D55-0	0,55	0
	D55-8	0,55	8
	D55-9	0,55	9
	D55-10	0,55	10
D50	D50-0	0,50	0

5.3.4.2. Ensayos sobre morteros

Se planteó la fabricación de morteros que incluyesen residuo estabilizado en sus dosificaciones. Estos morteros se han sometido a un conjunto de ensayos encaminados a determinar sus propiedades reológicas, físicas y mecánicas. Además, para obtener conclusiones sobre la influencia del contenido de fuel se realizaron también morteros de contraste en los que no se sustituyó ninguna fracción de la arena por mezcla estabilizada.

Con las diferentes dosificaciones se fabricó un importante número de probetas para someterlas a los diferentes ensayos. Se emplearon, sobre todo, probetas prismáticas de 160x40x40 mm y algunas probetas cúbicas de 100x100x100 mm. En todos los casos la relación entre la dimensión mínima de la probeta y el tamaño máximo del árido siempre superó el valor de 10, por lo que las probetas son plenamente representativas.

A continuación se describen los ensayos a los que se sometieron todos los morteros:

- Consistencia en fresco mediante el procedimiento de ensayo empleado por Vázquez (2000) que determina la energía de compactación empleando la compactadora de probetas. La energía se mide en función del número de golpes de compactadora necesarios para que la masa de hormigón alcance el extremo opuesto del molde tras retirarse una barrera previamente dispuesta.
- Densidad, porosidad y coeficiente de absorción según UNE 83-820-94 EX

- Flexotracción según UNE 196-1. Este ensayo se realiza mediante un pórtico IBERTEST PEV-300, de 300 kN de capacidad máxima, en control por carga y con la ayuda de un dispositivo tipo capilla para el ensayo.
- Compresión según UNE 196-1. Se realiza mediante una prensa IBERTEST MEH-3000, de 3000 kN de capacidad máxima, en control por carga y con la ayuda de un dispositivo tipo capilla para el ensayo.
- Determinación del módulo elástico según la UNE 83316.
- Ensayo hielo-deshielo siguiendo la UNE 67028. Se aplicaron un total de 20 ciclos en los que se sometía a las probetas a 18h a -10°C y 6h a +15°C sumergidas en agua.
- Se decidió realizar también ensayos de desgaste por rozamiento siguiendo la EN 1339.

Capítulo 6. Proceso de estabilización

6.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos de la presente tesis doctoral es conseguir transformar el residuo líquido en uno sólido más fácil de gestionar. Esto se ha conseguido empleando una técnica de solidificación/estabilización con cal viva. Además, en el desarrollo de la investigación, se ha mejorado el procedimiento en virtud del empleo de serrín de granito, un residuo, como sustituto parcial de la cal viva.

La estabilización de los residuos de fuel del Prestige había sido estudiada por las empresas SOGARISA y AGROAMB. En ambos casos se había establecido que mediante la adición de cal viva a los residuos de fuel, éstos se transformaban en un residuo sólido y, por tanto, más manejable. Tomando como base esta experiencia se decidió continuar por esta línea de investigación, profundizando en ella para conocer la manera más adecuada de solidificar el residuo y, a partir de ahí, poder proponer métodos de gestión de estos residuos estabilizados.

Las cuestiones que se han de tratar en el estudio del proceso de estabilización son, por un lado, como realizar la estabilización, es decir, establecer las proporciones necesarias de agentes estabilizantes y, por otro lado, medir las propiedades básicas de los residuos estabilizados. Conocidos estos datos, será posible proponer usos para los residuos estabilizados.

6.2. PROCESO DE ESTABILIZACIÓN

La técnica de estabilización consiste en mezclar un residuo con sustancias que lo solidifiquen y lo encapsulen. La efectividad de este proceso está directamente vinculada con las proporciones de mezcla entre residuo y estabilizante. Por tanto, el primer paso necesario es establecer las dosificaciones más adecuadas para la realización del proceso. Las primeras pruebas de estabilización de los residuos del Prestige se realizaron con cal viva, pero se decidió introducir también serrín de granito, un residuo de la producción de piedra ornamental. Al añadir esta sustancia se constató que se obtenía un resultado análogo, al mismo tiempo que se ahorraba una cantidad

significativa de cal viva. En consecuencia, se han buscado dosificaciones que solidifiquen el residuo de fuel mediante su mezcla con cal viva y serrín de granito en diferentes proporciones.

Las proporciones de la estabilización se han establecido con un residuo puro, pero en realidad, el residuo general contiene menor cantidad de fuel que la muestra de residuo puro. Surge, por tanto, la posibilidad de reducir la cantidad de estabilizante y ajustar la dosificación para el caso de un residuo impuro. Por tanto, se debería encontrar un método para variar la dosificación de acuerdo al contenido de fuel del residuo, pues esto es, económica y ambientalmente, más correcto.

6.2.1. Estabilización de residuo puro del Prestige

Los objetivos planteados para gestionar el residuo de fuel del Prestige incluían una estabilización con cal viva, similar a la realizada en las experiencias previas. Tras esto, se pretendía buscar metodologías de gestión de estos residuos solidificados. Como fruto de la investigación, se ha conseguido mejorar el proceso de estabilización, añadiendo un material estabilizante más, el serrín de granito. Por tanto, con estas variables de partida se han buscado dosificaciones que consiguieran solidificar y hacer manejable el residuo de fuel, por mezcla con cal viva y serrín de granito.

Los ensayos de mezcla se realizaron siempre de la misma manera: manualmente y amasando durante 15-30 min hasta lograr la homogeneidad de la mezcla. Tras esto se dejaba en reposo, dando tiempo al progreso de la reacción química. Tras un periodo de tiempo variable, el residuo estabilizado cambiaba de textura, convirtiéndose en un material similar a la tierra seca. Algunas de las mezclas, con sólo dos horas de reposo alcanzaron un estado pulverulento, mientras que otras requirieron más de 15 días para alcanzar un estado análogo.

En la Figura 6.1 y la Figura 6.2 se muestra, a modo de ejemplo, los materiales empleados en una de las dosificaciones y el resultado final obtenido. En este caso se trataba de una mezcla en peso de 30 % de residuo de fuel, un 35 % de cal viva y un 35 % de serrín de granito.



Figura 6.1. *Materiales empleados para la estabilización.*



Figura 6.2. *Resultado obtenido tras la estabilización y un reposo de 2 horas.*

Las proporciones ensayadas se basaron en cantidades fijas de residuo de fuel, del 30, el 40 y el 50 % en peso (Tabla 6.1). A este residuo se le añadió un agente estabilizante compuesto de cal viva y serrín de granito en cantidades variables, donde la cal viva se encontraba dentro de la horquilla del 10 al 100%. Por lo tanto, el serrín de granito está presente, en el agente estabilizante, en una proporción que va del 0 al 90 %. Esto se justifica por la imposibilidad de estabilizar únicamente con serrín de granito, ya que éste no posee suficiente actividad química. Sin embar-

go, la adición de serrín de granito ha resultado muy positiva, ya que facilita el amasado de la mezcla y además permite ahorrar cal viva, mucho más costosa.

Tabla 6.1. *Nomenclatura y composición de las mezclas ensayadas.*

Nomenclatura de la mezcla	Dosificación (en peso)		
	% Residuo de fuel	% Cal viva	% Serrín de granito
M1	30	70	0
M2	40	60	0
M3	30	17.5	52.5
M4	30	35	35
M5	30	7	63
M6	40	30	30
M7	30	35	35
M8	30	35	35
M9	50	50	0
M10	30	0	70
M11	40	15	45

Las mezclas de 50% de residuo de fuel dan como resultado un material viscoso y pegajoso y que por tanto no cumple adecuadamente el objetivo de solidificar el residuo. Del resto de proporciones, las mejores, en relación con la calidad del material obtenido, son las de 30 % de fuel, ya que proporcionan un material pulverulento. No son, sin embargo, las más económicas, ya que si se emplean mezclas con un 40 % de residuo de fuel se obtiene un material con grumos, pero no viscoso ni pegajoso y que permite una estabilización más económica con una textura grumosa, válida para algunos usos concretos.

En la Tabla 6.2 se presenta una valoración de las cualidades de cada una de las mezclas. Se ha definido una clasificación por colores, reservándose el verde para las más adecuadas, el rojo para las menos y el amarillo para las que presentan aspectos positivos y negativos. Esta categorización se realiza en función del aspecto y la manejabilidad del producto resultante. Para ello se tienen en cuenta cuestiones como: el tiempo de estabilización, ventajas económicas, la viscosidad del material resultante, la cantidad de grumos, etc. Esta catalogación, pese a estar basada en valoraciones subjetivas, ha resultado útil para seleccionar las mezclas más válidas.

Tabla 6.2. Mezclas estabilizadas ensayadas. Los porcentajes de composición se dan en peso.

Muestra	% Fuel	% Cal viva	% Finos de granito	Valoración	Comentario del proceso de estabilización
M1	30	70	0	Muy Buena ●	Al acabar de amasar está pegajoso. Tras 2 h desde el amasado se convierte en un material pulverulento.
M2	40	60	0	Buena ●	Al acabar de amasar está pegajoso. Aspecto terroso tras 3 h.
M3	30	17.5	52.5	Muy Buena ●	Similar a M2.
M4	30	35	35	Muy Buena ●	Similar a M1 pero no tan pegajosa tras el amasado. Tamaño de grano fino.
M5	30	7	63	Buena ●	Material de aspecto terroso con grumos entremezclados
M6	40	30	30	Buena ●	Tras amasar, se forman grumos de 10-50 mm. Tras 3-5 h, la apariencia es de un material terroso oscuro
M7	30	35	35	Muy Buena ●	El color es más claro que el resto de mezclas. Tras amasar se forman grumos que se deshacen tras 2 h de reposo. El fuel empleado contenía más arena
M8	30	35	35	Muy Buena ●	El color es más claro que el resto de mezclas. Tras amasar se forman grumos que se deshacen tras 2 h de reposo. El fuel empleado contenía más impurezas que se pudieron separar por tamizado
M9	50	50	0	Mala ●	Durante más de 3 meses permanece como una masa pegajosa y plástica. Tras esta fase se deshace en grumos de aspecto arcilloso
M10	30	0	70	Regular ●	Tras el amasado, se forma grumos de 20-70 mm. Tras 15 días expuesto al aire pierde viscosidad y se puede deshacer en las manos
M11	40	15	45	Buena ●	Tras el amasado, se forma grumos de 20-100 mm. Tras 5 días expuesto al aire pierde viscosidad y se puede deshacer hasta 10 mm de grano

La información descrita en la tabla anterior sobre los porcentajes empleados en los ensayos de mezcla y la valoración de las mismas se concentra en el siguiente diagrama ternario (Figura 6.3), que contiene todos los ensayos de estabilización acometidos. En esta figura se pueden observar unos límites claros de que mezclas son válidas. En primer lugar destaca que no es posible introducir más de un 50 % de residuo de fuel en las mezclas, ya que no se consigue solidificar adecuadamente el residuo. Tampoco se han considerado mezclas con poco fuel por ser éstas poco interesantes desde el punto de vista del rendimiento del proceso de estabilización, tanto económico, por el mayor consumo de cal, como ambiental, ya que el volumen de residuo estabilizado es mayor. Respecto del uso de serrín de granito la conclusión que se extrae es que

no es posible una estabilización únicamente con serrín pero que, empleando incluso una porción pequeña de cal viva ya se consigue una estabilización aceptable.

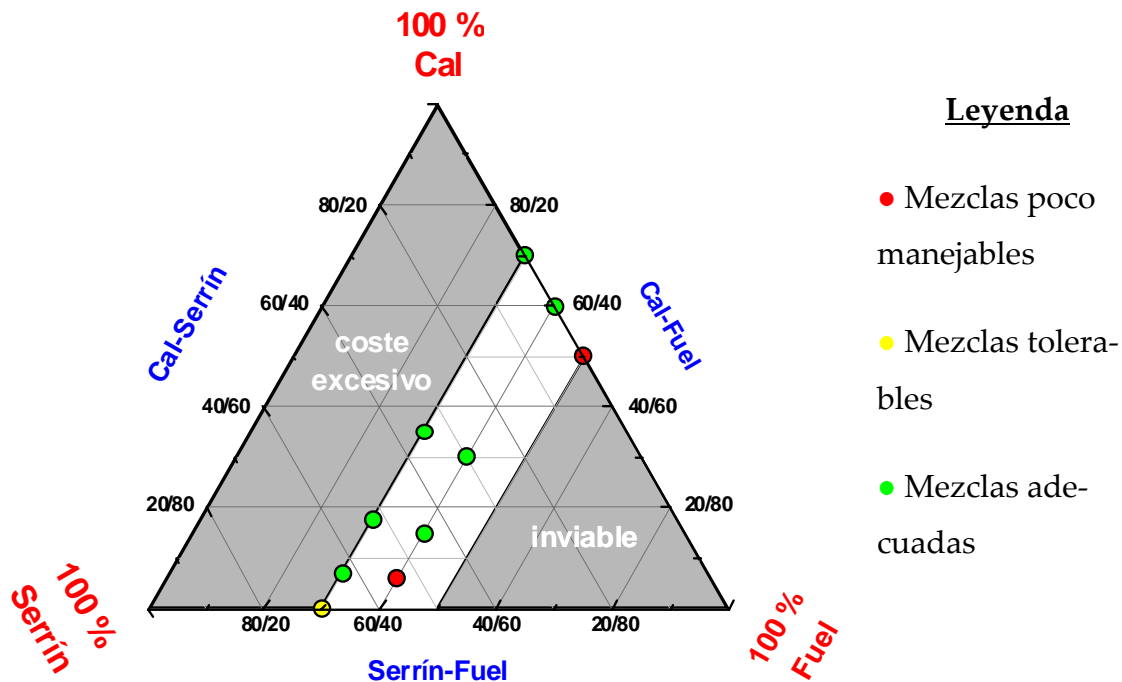


Figura 6.3. Mezclas estudiadas y valoración de las mismas.

La apariencia general del producto estabilizado es la de un material terroso de color variable (Figura 6.4). Ésta tonalidad depende de la dosificación empleada, resultando de un color más oscuro a medida que el porcentaje de fuel aumenta. Además, las mezclas estabilizadas poseen un olor característico propio de la presencia de hidrocarburos en la mezcla, aunque ésta no es una propiedad determinante ni limitativa.



Figura 6.4. Aspecto de algunas de las mezclas estabilizadas. La inferior contiene mayor porcentaje de fuel.

Otra característica del material estabilizado que ha destacado desde el principio es su hidrofobicidad, es decir, el material repele el agua y no se mezcla con ella. Este fenómeno se manifiesta claramente al verter gotas de agua sobre la mezcla, ya que éstas deslizan sobre el material en vez de mojarlo (Figura 6.5). Esta propiedad resulta muy interesante de cara a la seguridad de las aguas que entren en contacto con el residuo estabilizado, ya que es de esperar que el agua no penetre en el material. Sin embargo, esta característica ha dificultado la realización de algunos ensayos.



Figura 6.5. *Cápsula que contiene residuo estabilizado. Ha sido puesto en contacto con agua para que se aprecie la hidrofobia del material.*

Durante los ensayos de mezcla se reveló una de las ventajas del proceso de estabilización: en el amasado con cal viva y serrín de granito se consigue separar el fuel de las sustancias espurias, tales como materiales de tipo plástico, metálico, rocas, etc. Esto se debe a que el fuel se encuentra encapsulado, perdiendo por tanto, la adhesividad física que lo une con esas impurezas. Este hecho tiene gran importancia cuando se trata de residuo impuro, el cual contiene gran cantidad de estas sustancias. De este modo, surge la posibilidad de tamizar el residuo estabilizado consiguiendo como resultado dos fracciones, una de fuel estabilizado y otra de sustancias espurias. En la Figura 6.6 se muestra como en uno de los ensayos de mezcla el residuo contenía un fragmento de poliestireno expandido, el cual tras el mezclado quedó liberado.



Figura 6.6. Inicio y fin del proceso de estabilización. Se destaca un trozo de poliestireno expandido que estaba mezclado con el fuel del Prestige. Tras 2 horas de reposo, puede ser separado sin dificultad.

En conclusión, se han obtenido una serie de dosificaciones que permiten solidificar el residuo de fuel. Sin embargo, estas dosificaciones están limitadas por la muestra de residuo puro empleada. Para comprobar que estas mezclas funcionan con un residuo impuro se ha desarrollado un experiencia de estabilización a mayor escala y con este tipo de residuo (6.2.2).

En esta investigación se ha avanzado respecto de las experiencias previas ya que se ha incluido en la estabilización el serrín de granito, con notable éxito, ya que sustituyendo una parte importante de la cal se obtienen los mismos resultados o incluso mejores. Además, el serrín de granito es un residuo, por tanto de muy bajo coste, con lo cual se abarata la estabilización.

El residuo estabilizado es un material similar a la tierra, con un color marrón variable y que tiene algo de olor característico del hidrocarburo que contiene. Además, tiene la peculiaridad de ser hidrófobo, por lo que se abren expectativas para un almacenamiento sencillo y seguro.

Por último, cabe destacar que el proceso de estabilización consigue separar las sustancias espurias como plásticos, rocas, etc. del fuel que las contiene. Es por esto que se podría plantear un tamizado posterior a la estabilización para, de este modo, obtener fracciones diferenciadas de residuo y que puedan ser gestionadas separadamente.

6.2.2. Experiencia a escala media con residuo impuro

En la estabilización de residuo puro del Prestige desarrollada en 6.2.1 se ha empleado una muestra que se componía de fuel con pequeñas cantidades de agua y arena. Con este lote de residuo se establecieron dosificaciones de cal viva y serrín de granito que añadidas al fuel conseguían estabilizar y solidificar el residuo.

Tras conseguir estas dosificaciones se planteó la necesidad de corroborar el funcionamiento del proceso de estabilización en el caso de un residuo más impuro, compuesto de menos fuel y más sustancias espurias, como rocas, arena, plástico, etc. Además, se pretendía comprobar que el tamizado era un método efectivo para la separación de las fracciones del residuo. Por ello se decidió realizar una prueba de estabilización sobre un residuo más representativo del conjunto de los residuos de fuel del Prestige. Se empleó para tal fin una muestra de residuo impuro proveniente de las balsas de SOGARISA (Figura 6.7).

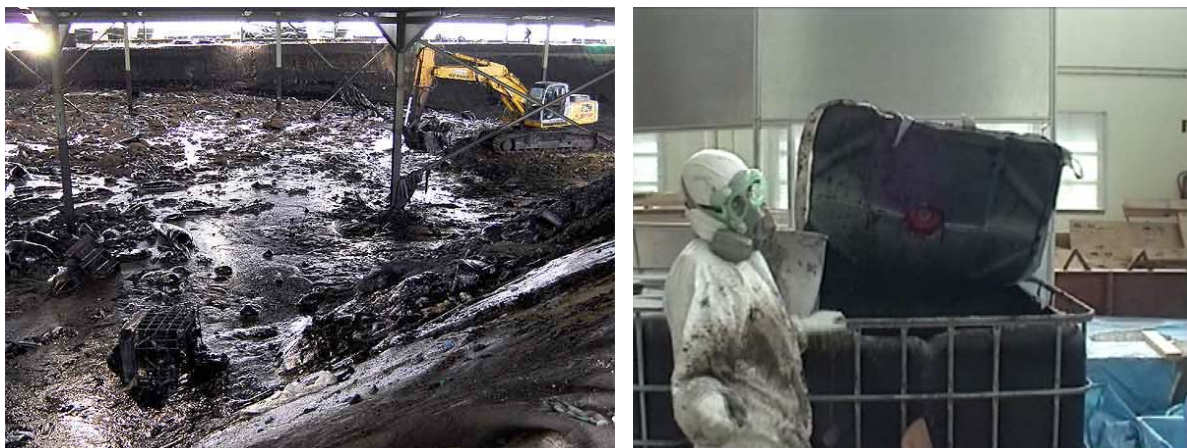


Figura 6.7. *Izquierda: balsa de residuos del Prestige (SOGARISA.) Derecha: Muestra de residuo impuro empleada en la experiencia de estabilización con residuo impuro.*

Para validar el proceso de estabilización se planteó la necesidad de realizar una experiencia con residuo impuro. Además, se planteó tratar una cantidad de residuo importante, que dotara de mayor realismo al estudio de un residuo tan heterogéneo como este. Se estabilizaron, en total, 250 kg de residuo impuro en lotes de 40-50 kg. La dosificación empleada para ello fue la denominada M3, compuesta por un 30 % de fuel, un 35 % de cal viva y un 35 % de serrín de granito. El proceso de dosificación y mezclado se realizó de manera manual apoyándose en herramientas de mano, sin embargo, estos procesos son asimilables a maquinarias industriales (Figura 6.8).



Figura 6.8. *Dosificación y amasado en la experiencia de estabilización con residuo impuro*

Tras el amasado se realizaron pilas con el material estabilizado para que, de este modo, el calor desprendido por la cal viva surtiera mayor efecto. Estas parvas se dejaron orear por un periodo de 24 h tras lo cual se tamizaron por cernido de 4 mm. El retenido se corresponde con diversas sustancias espurias, sobre todo rocas y plásticos. En este retenido también aparecía gran cantidad de grumos de arena y residuo estabilizado que se podrían haber desapelmazado mecánicamente.



Figura 6.9. Tamizado del residuo estabilizado y detalle del retenido tras el cribado en la experiencia de estabilización con residuo impuro

La experiencia de estabilización con residuo de fuel impuro se puede considerar un éxito, ya que se comprobó que la técnica de estabilización desarrollada funciona sobre este residuo de una forma muy similar al caso de residuo puro. En total se consiguió estabilizar 250 kg de residuo de fuel empleando los medios descritos. Tras la estabilización, se procedió al tamizado del residuo quedando retenido un 17 % de media en el tamiz de 4 mm. Con esto, se verifica que la segregación de las fracciones por cribado es posible.

A partir del residuo separado en dos fracciones, sería posible proponer vías de gestión separativas para cada parte. Sin embargo, en la presente tesis únicamente se ha abordado la gestión de la fracción fina del residuo, proponiendo para ello dos líneas de gestión, el almacenamiento definitivo del mismo y, su reciclaje mediante inclusión en materiales de construcción de base cementosa.

La estabilización con residuo impuro aportó más información de la búsqueda inicialmente ya que, tras el procesado de los primeros lotes, se comprobó que el resultado era un residuo más pulverulento que el de las mezclas con residuo puro. Por esto, gracias a la experiencia realizada se ha esbozado un método de ajuste de la dosificación para el residuo impuro (6.2.3).

La estabilización de 250 kg de residuo impuro ha demostrado la viabilidad de esta técnica de tratamiento, pero queda aún por resolver como este proceso se transformaría en uno a gran escala. Por esta razón, en el Anexo A se plantea el programa de una planta piloto de tratamiento

de los residuos de fuel, gracias a la cual se determinarían los medios materiales y mecánicos más adecuados para realizar la estabilización a gran escala.

6.2.3. Ajuste de la dosificación en residuo impuro

Las dosificaciones más adecuadas para la estabilización de fuel con cal viva y serrín de granito se obtuvieron a partir de un lote de residuo puro. Después, se realizó una experiencia para comprobar la eficacia de la estabilización sobre el residuo impuro, el cual, además de fuel, contiene sustancias espurias como plástico, arena, materia orgánica, etc. En el desarrollo de esta experiencia se observó que el residuo estabilizado presentaba una textura más pulverulenta que la usual. Se decidió entonces tratar de mejorar el ajuste de la dosificación para la estabilización del residuo real, que contiene una cantidad variable de fuel.

El tipo de mezcla elegida como adecuada era la M3, que se compone de un 30 % de residuo de fuel (RF), un 35 % de cal viva (CV) y un 35 % de serrín de granito (SG). Esta dosificación permite estabilizar el residuo puro pero, en el caso del residuo impuro no se necesita tanto agente estabilizante. De este modo, para mejorar la dosificación se asimila el residuo impuro a una mezcla de fuel puro con sustancias espurias.

Por tanto, sólo se ha de estabilizar el fuel y no las sustancias espurias, por lo que, se pueden descontar estas sustancias del balance de masas de la dosificación. Para estimar la cantidad de espurios se ha realizado un proceso iterativo, en el que se considera que dentro del residuo estabilizado, la fracción mayor de 4 mm, no proviene del fuel y la menor de 4 mm, sí se considera que es fuel. Adicionalmente, se estableció el criterio de que la proporción entre cal viva y serrín de granito debería permanecer en 50/50. Se han probado varias mezclas entre residuo impuro y agente estabilizante midiendo, tras la estabilización, la cantidad de espurios mayores de 4 mm y de fuel estabilizado menor de 4 mm (Tabla 6.3). El detalle de estos ensayos se puede ver en el Anexo B.

Tabla 6.3. Propuesta de clasificación de las mezclas estabilizadas.

% Residuo impuro ¹ / mezcla estabilizada ²	% espurios ³ / mezcla estabilizada	% espurios / Residuo de fuel	% fuel ⁴ / mezcla estabilizada
30	18.7	62.4	21.4
40	18.4	46.0	27.3
45	17.1	38.0	33.6
50	22.5	45.0	35.4

¹ Residuo impuro del Prestige compuesto de fuel, agua, arena, etc.

² Mezcla de residuo impuro y agente estabilizante, 50% cal viva, 50 % serrín de granito

³ Fracción de la mezcla estabilizada retenida en el tamiz de 4 mm que se identifica con sustancias extrañas al fuel

⁴ Fuel del Prestige, estimado mediante el pasa del tamiz de 4 mm

Al ajustar la dosificación siguiendo este protocolo se alcanza una dosificación más económica con un ahorro importante de agente estabilizante, llegando incluso a una proporción de 50% de residuo impuro y 50% de agente estabilizante. Por ejemplo, para estabilizar una tonelada de residuo puro como el de las muestras iniciales se necesitarían 2,33 t de estabilizante (mezcla de 30% RF / 35% CV / 35% SG). Sin embargo, para una tonelada de residuo bruto, ajustada con el criterio anteriormente descrito, se necesitarían únicamente 1,2 t de estabilizante.

Este ejemplo se detalla a continuación:

Ajuste sobre residuo de fuel puro

1 t residuo bruto + **2,3 t** estabilizante (50% CV/50% SG) = **3,3 t** residuo estabilizado,

Ajuste sobre residuo de fuel bruto (6.2.2 Experiencia con residuo impuro)

1 t residuo bruto + **1,2 t** estabilizante (50% CV/50% SG) = **2,2 t** residuo estabilizado

Tras tamizar las 2,2 t de residuo estabilizado por el tamiz 4 mm quedaría un retenido de 485 kg de residuo. Si este retenido se asimila con sustancias espurias, de la tonelada de residuo impuro se habrán estabilizado 515 kg de fuel.

Si se comparan ambas dosificaciones se desprenden dos conclusiones importantes. En primer lugar, la cantidad de estabilizante a emplear es un 45 % menor que en los ajustes sobre fuel bruto y, en segundo, la cantidad de residuo generado tras la estabilización es un 33 % menor.

Continuando con la idea de mejorar la dosificación se consideró la posibilidad de ajustarla automáticamente en función de la trabajabilidad final del residuo estabilizado. Esto se podría cuantificar, por ejemplo, mediante el par necesario para amasar el residuo bruto con los agentes estabilizantes. Existen, por tanto, expectativas de que se pueda establecer un método de ajuste automático de la dosificación para, de este modo, reducir la cantidad de agente estabilizante necesaria y también la cantidad de residuo estabilizado.

6.3. PROPIEDADES DEL RESIDUO ESTABILIZADO

Tras la estabilización del residuo de fuel con cal viva y serrín de granito se obtiene un material sólido, de aspecto similar a la tierra vegetal seca y que, además, presenta un color variable en función del contenido de fuel y estabilizantes.

La estabilización consigue solidificar el residuo de fuel, lo cual ofrece importantes ventajas en cuanto a la manejabilidad del residuo. Esto supone un avance importante pero, para proseguir en la búsqueda de métodos de gestión, es necesario conocer las propiedades básicas del fuel estabilizado.

La caracterización básica que se ha realizado consta de medidas de humedad, densidad de partículas y análisis termogravimétrico. Este último ensayo tiene por objetivo delimitar las fases presentes en el residuo estabilizado.

Tras las primeras pruebas sobre el residuo estabilizado se constató que es un material hidrófobo, por lo que ha sido difícil e incluso imposible realizar algunos ensayos sobre el material. Concretamente, algo tan sencillo como la granulometría no se ha podido realizar, ya que por tamizado en seco, el residuo tupa los tamices y, por vía húmeda, la hidrofobicidad del material falseaba los resultados. En otros casos, como en la densidad de las partículas, se ha conseguido encontrar un método alternativo.

6.3.1. Textura de los residuos estabilizados

La apariencia del residuo estabilizado es la de un material similar a la tierra vegetal, de un color marrón variable. Su tonalidad es más clara cuando tiene mayor contenido de agentes estabilizadores, y más oscuro al tener mayor presencia de fuel. Esta tonalidad, además, varía con el paso del tiempo, tornándose más clara al envejecer. Todas las muestras tienen un olor común, debido a la presencia de hidrocarburo, aunque esto no es una propiedad limitante.

De acuerdo con la experiencia adquirida con las mezclas estabilizadas, éstas se han catalogado según tres categorías, hablándose de este modo de mezclas *pulverulentas*, *grumosas* y *pegajosas* (Figura 6.10).



Figura 6.10. Ejemplos de residuo estabilizado tipo pulverulento, grumoso y pegajoso.

Las mezclas estabilizadas pulverulentas no se adhieren a las superficies, esto no es así en el caso de las de tipo grumoso y pegajoso, que si que presentan cierta adhesividad. Este aspecto depende directamente de la cantidad de fuel presente en la estabilización, pues cuanto mayor cantidad, más adhesividad tiene el residuo estabilizado, razón por la que se apelmaza. En la Tabla 6.4 se puede ver una descripción de los tres tipos de residuos estabilizados.

Tabla 6.4. *Propuesta de clasificación de las mezclas estabilizadas.*

Tipo	Mezclas	Características
Pulverulento	M1, M3, M4, M7, M8	Entre 2 y 5 h tras el amasado, el material es susceptible de tamizado para separar las impurezas con un tamaño mayor de 1 cm. Se ha empleado como árido para morteros
Grumoso	M2, M5, M6	Entre 2 y 10 h desde el amasado el material presenta grumos que permitirían separar las impurezas mayores de 5 cm, tales como plásticos, rocas, etc.
Pegajoso	M9, M10, M11	Tras 5-60 días desde el amasado, los grumos que se forman pueden desmenuzarse. Podría permitir un depósito en vertedero sin separación de las distintas fracciones del residuo.

6.3.2. Contenido de humedad

Se ha determinado la humedad de todas las mezclas estabilizadas mediante secado en estufa durante 24 horas (UNE-EN 103300). Tal y como era de esperar, la humedad resultó ser muy baja, menor al 0,5 % en casi todas las muestras estabilizadas, lo cual se debe a la reacción de la cal viva. Se consideró además, que podría haber una pequeña distorsión de la medida de la humedad causada por la evaporación de alguna fase volátil del hidrocarburo pero, como el fuel vertido era del tipo pesado, este efecto se ha podido considerar residual.

Es interesante observar que hay cierta relación entre el contenido de humedad y la proporción de cal y serrines de granito. La Figura 6.11 presenta el contenido de humedad de las mezclas estabilizadas M1 a M6. Obsérvese que, a mayor contenido de serrines, mayor humedad del material estabilizado. Con respecto a la cal, se detecta lo contrario.

Esta tendencia puede explicarse teniendo en cuenta que la fracción rica de fuel empleada en la estabilización es, de hecho, una emulsión de agua de mar y fuel. Cuando se mezcla con cal, el agua hidrata a ésta (generando la portlandita) y, en parte, se evapora debido al carácter exotérmico de la reacción de hidratación de la cal. De acuerdo a los datos proporcionados por CALCINOR, las temperaturas que pueden alcanzarse llegan a los 70°C a los 10 minutos de la reacción con el residuo. Cuando se añaden finos de granito en sustitución de la cal, las temperaturas decrecen y, en función de la cantidad de agua presente, puede no agotarse el agua por hidratación o evaporación.

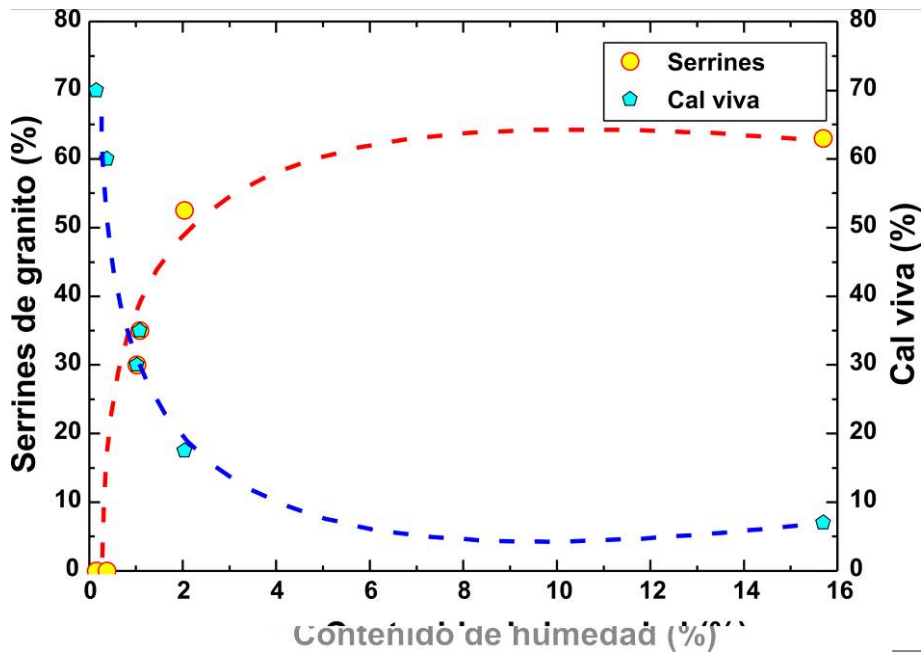


Figura 6.11. Contenido de humedad en relación con la cantidad de cal viva y serrines de granito.

6.3.3. Densidad

Uno de los primeros parámetros que se ha de conocer sobre el residuo estabilizado es la densidad de las partículas sólidas. La medición de esta propiedad presentaba un escollo importante, ya que en el ensayo se ha de sumergir el suelo en agua. Como todas las mezclas estabilizadas tienen una fuerte actividad hidrófoba, en consecuencia, la medida de la densidad obtenida por este procedimiento no sería una medida representativa de la realidad, ya que minoraría el resultado. Por tanto, para medir la densidad se siguió, en la medida de lo posible, el procedimiento de la norma UNE 103302, pero sustituyendo el agua por un líquido de carácter orgánico compatible con el residuo estabilizado.

Se emplearon, como sustitución del agua, dos sustancias orgánicas (alcohol y acetona). La razón de utilizar dos líquidos distintos fue que el fuel es soluble en estos compuestos, aunque más en el alcohol que en la acetona. Además, se pretendía constatar que la viscosidad del disolvente no influía, pues el alcohol es mucho menos viscoso.

En la Tabla 6.5 se pueden observar los resultados de la densidad de las partículas sólidas medidas en las condiciones descritas. Como se puede ver, todas las mezclas presentan una densidad de partículas del orden de 2 kg/l exceptuando las muestras M7 y M8 que se corresponden con el lote de fuel “más impuro”, y que por tanto, contienen más arena proveniente del propio residuo. Por último, cabe destacar que el método de medida parece estar dentro de lo esperado, ya que la mezcla es una combinación de dos materiales pétreos y un fuel de densidad 1 kg/l.

Tabla 6.5. Densidad de las partículas sólidas de las mezclas estabilizadas, medida según un procedimiento adaptado de la UNE 103302

Muestra	%F-CV-SG	Densidad partículas en acetona (kg/l)	Densidad partículas en alcohol (kg/l)	Densidad partículas media (kg/l)
M1	30-70-0	1,95	2,01	1,98
M2	40-60-00	2,32	2,33	2,32
M3	30-17.5-52.5	2,00	2,18	2,09
M4	30-35-35	2,02	2,08	2,05
M5	30-7-63	2,09	2,06	2,07
M6	40-30-30	1,91	2,02	1,96
M7	30-35-35	2,18	2,05	2,11
M8	30-35-35	2,46	2,25	2,35

6.3.4. Análisis termogravimétrico

Con el objetivo de conocer las fracciones presentes en el residuo estabilizado se ha efectuado un análisis termogravimétrico de todas ellas. Para la realización de este ensayo se calentó la muestra hasta 1050 °C, en dos atmósferas diferenciadas, una de aire y otra de nitrógeno, midiendo en continuo la variación de la masa y aplicando un analizador infrarrojo a la salida de los gases. De este modo, se obtienen perfiles de pérdida de masa en los cuales es posible identificar, en función de la temperatura y de los gases de salida, que fases son las que se volatilizan. Los gases desprendidos durante el calentamiento aportaron poca información en este caso, ya que se encontró vapor de agua hasta 120°C y únicamente CO₂ a partir de ahí.

Para entender el análisis termogravimétrico del residuo estabilizado resulta muy útil tener en cuenta el proceso industrial de obtención del fuel. En la destilación del crudo se distinguen dos fases, en la primera se realiza una destilación a presión atmosférica en la cual a diferentes temperaturas se obtienen distintos productos, como queroseno, nafta, gasolina, gasoil, etc. Tras este proceso se aplica una destilación al vacío, y en esta fase se evapora otra fracción del petróleo, concretamente los compuestos que tienen su punto de ebullición entre los 375 y los 550 °C. Este gas, una vez licuado, constituye el fuel pesado. El residuo que se obtiene tras esta destilación se denomina residuo de vacío y es la base de los betunes asfálticos (Wauquier, 2004).

En vista del proceso de obtención del fuel y dado el rango de temperaturas de ebullición, es de esperar que durante el análisis termogravimétrico la totalidad de la masa de fuel se evapore entre los 375 y los 550°C. Aunque también es previsible que, en presencia de oxígeno, parte del carbono se oxide dando CO₂. Sin embargo, esta reacción comenzará a una temperatura menor que la del rango de ebullición del fuel. Esta diferencia se podrá apreciar en los dos análisis diferentes, el realizado en atmósfera de aire, en el cual se dará la combustión del carbono y el de

atmósfera de nitrógeno, en el cual únicamente se producirá la evaporación de las fases. En cuanto a las sustancias espurias que acompañan al fuel en el residuo, cabe destacar algunas cuestiones. Primero, el agua del residuo de fuel está contenida en el hidróxido de calcio. Segundo, algunos espurios sólidos se comportarán como inertes, este será el caso de la arena, pero otros se degradarán con la temperatura, como los plásticos o las algas marinas.

Los otros materiales que hay dentro de la mezcla estabilizada son el serrín de granito y la cal viva, la cual se hidrata durante el proceso de estabilización. En el análisis termogravimétrico no son de esperar pérdidas de masa debidas al serrín de granito, el cual debería ser estable hasta la temperatura de 1050 °C. Sin embargo, la cal sí se transforma durante el calentamiento, ya que entre 700 y 900 °C se descarbonata para pasar a óxido de calcio libre. Además la transformación de la cal interfiere en el resultado del análisis, ya que en el entorno de los 500°C, el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) se carbonata para dar carbonato cálcico (CaCO_3), el cual a una temperatura mayor (700–900 °C) se descompone en óxido de calcio (CaO) (Alarcón-Ruiz, 2005). Es por esta fijación de CO_2 de la cal, por lo que en algunas gráficas se aprecia un incremento de masa en el rango de 400 a 600 °C. Este proceso se evidencia en la Figura 6.13 y la Figura 6.13 que muestran el análisis de una muestra tipo M2, realizado en dos atmósferas diferentes, una de aire y otra de nitrógeno. Tal y como se puede ver, en la muestra ensayada en aire se produce un incremento de masa entre los 450 y los 600 °C, la cual es debida a la carbonatación del hidróxido de calcio. Esta tendencia se reproduce en todos los ensayos realizados, aunque en menor medida en el caso de las que tienen menor cantidad de cal y mayor de serrín. Los resultados completos del análisis termogravimétrico pueden verse en el Anexo B.

En la Figura 6.12, Figura 6.14 y Figura 6.15 se muestran los resultados de tres muestras diferentes ensayadas en una atmósfera de nitrógeno. Las dos primeras se corresponden con una cantidad de 40 y 30 % de residuo de fuel, las dos últimas con la misma cantidad de fuel, pero la última tiene una cantidad de serrín de granito muy superior.

Si se analizan los resultados del ensayo en función de la cantidad de residuo de fuel, de cal y serrín de granito se extraen varias conclusiones, siendo la más importante que cuanto mayor contenido de fuel, mayor es la pérdida de masa. Esta disminución se debe a que el fuel o se evapora o se quema, quedando siempre como residuo a 1050 °C óxido de calcio proveniente de la cal y serrín de granito inalterado, adicionalmente también permanecen algunas de las sustancias espurias que contenía el residuo como la arena. Dada la reacción de descarbonatación de la cal, esto justifica el hecho de en los análisis sobre muestras con más cal la pérdida de masa sea mayor y en las muestras con mucho serrín esta pérdida de masa es mucho menor (Figura 6.14 y Figura 6.15).

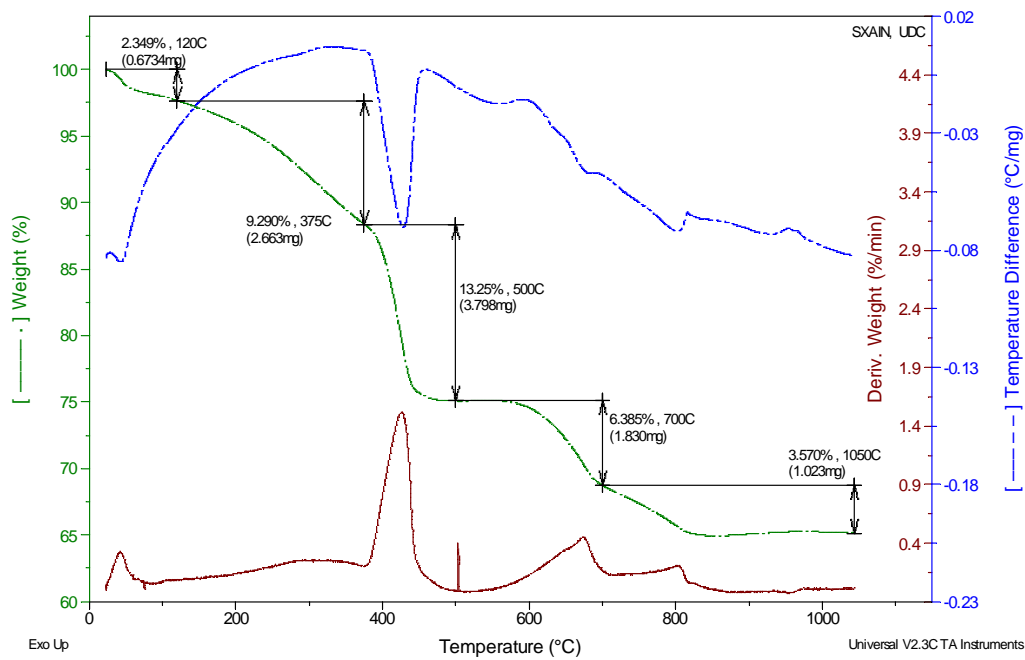


Figura 6.12. Análisis termogravimétrico de una muestra M2, del 40 % de residuo de fuel y un 60 % de cal viva. La atmósfera empleada fue de nitrógeno.

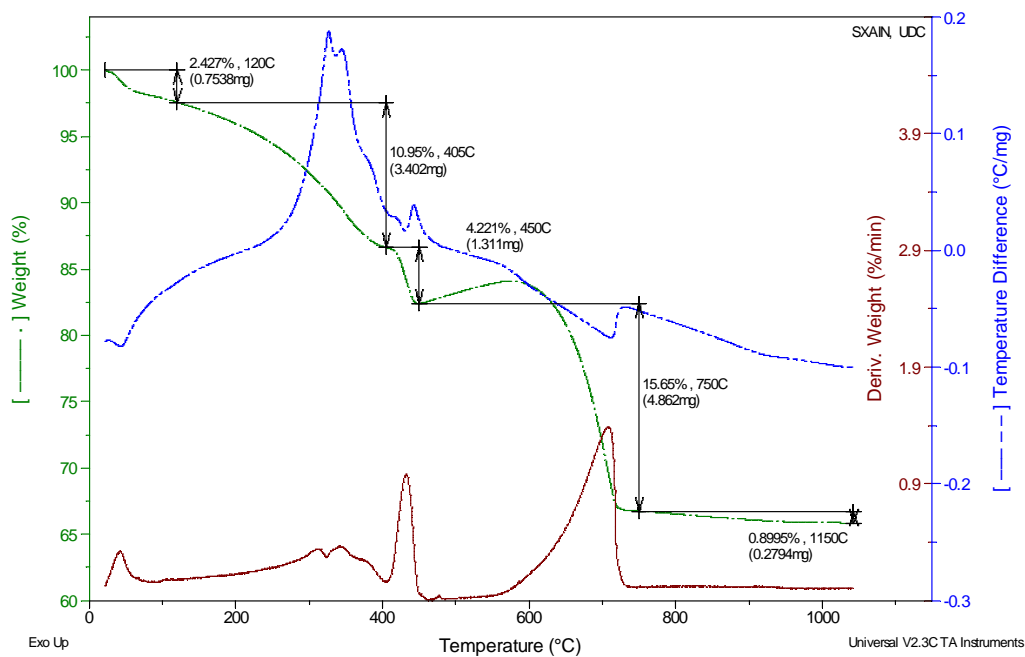


Figura 6.13. Análisis termogravimétrico de una muestra M2, del 40 % de residuo de fuel y un 60 % de cal viva. La atmósfera empleada fue de nitrógeno.

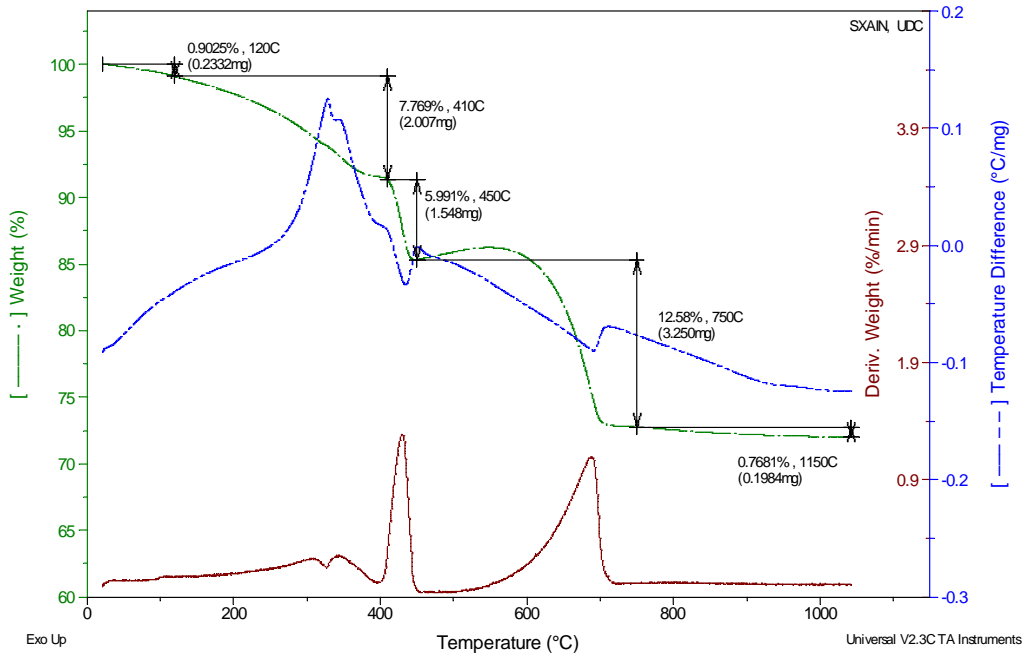


Figura 6.14. Análisis termogravimétrico de una muestra M1, del 30 % de residuo de fuel y un 70 % de cal viva. La atmósfera

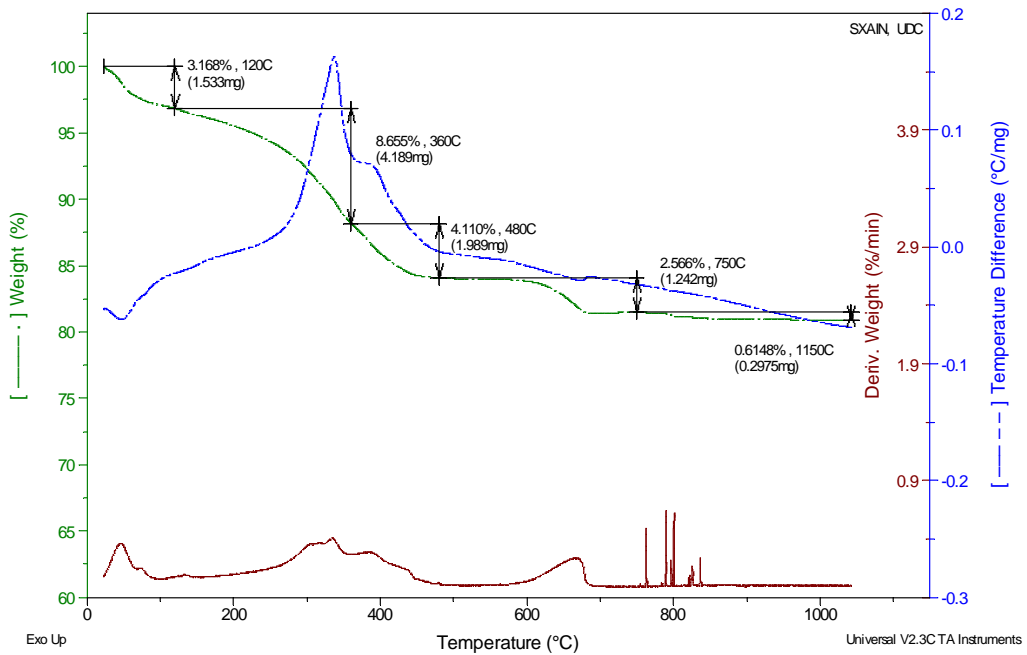


Figura 6.15. Análisis termogravimétrico de una muestra M5, del 30 % de residuo de fuel, un 7 % de cal viva y un 63 % de serrín de granito.

6.4. CONCLUSIONES

En este capítulo dedicado a la estabilización de los residuos de fuel del Prestige se ha partido de algunas experiencias previas de estabilización con cal viva realizadas por la empresa SOGARI-

SA. Tomando esto como base, se ha profundizado en este procedimiento, consiguiendo mejorarlo gracias a la sustitución parcial de la cal viva por serrín de granito. Procediendo de este modo, se mejora el amasado y se abaratan mucho los costes de estabilización. Adicionalmente se le da un uso al serrín de granito, un residuo de la producción de piedra ornamental.

Se ha establecido que la mezcla más adecuada es la de 30 % de residuo de fuel, 35 % de cal viva y 35 % serrín de granito. Con estas proporciones se obtiene un residuo de textura pulverulenta que puede ser fácilmente manipulado. Esta proporción se obtuvo empleando residuo puro, con un alto contenido en fuel. Sin embargo, se ha constatado que para un residuo impuro es posible reducir el consumo de estabilizante.

Los resultados de una estabilización con serrín de granito y cal viva son iguales a los obtenidos sólo con cal viva. La proporción de 25% de cal y 75 % de serrín genera resultados aceptables, pero la mejor proporción para conformar el agente estabilizante es de cal viva y serrín de granito a partes iguales.

Tras la estabilización del residuo de fuel con cal viva y serrín de granito se obtiene un material sólido, de aspecto similar a la tierra vegetal seca y que, además, presenta un color variable en función del contenido de fuel y estabilizantes. Este residuo estabilizado posee una densidad de partículas del orden de 2kg/l. Por último, destaca como propiedad poco usual el que es un material hidrófobo.

El procedimiento de estabilización permite transformar el residuo de fuel en un material seco, no viscoso y de grano fino. Como consecuencia de este cambio de propiedades el fuel libera las sustancias espurias que contiene, tales como: plásticos, piedras, arena, materia orgánica, etc. Esta capacidad permite, mediante tamizado, separar las fracciones del residuo estabilizado y así se ha hecho, separando ambas fracciones por un tamiz de 4 mm. La fracción gruesa debería ser gestionada, en principio, de acuerdo a principios de gestión de residuos inertes o no peligrosos, aunque esta cuestión se debería definir en una planta piloto de estabilización. Para la fracción fina, que es la mayoritaria, sí se han propuesto líneas de gestión. Se han planteado dos métodos para dar salida a esta parte del residuo, el almacenamiento definitivo en vertedero o su inclusión como árido dentro de morteros de cemento.

Para aplicar esta investigación al depósito en vertedero se deberá elegir la dosificación más adecuada según la gestión de residuos que se quiera realizar. Si se decide depositar todo en vertedero sin clasificación, lo más interesante sería una mezcla basada en el 40 % de fuel con la menor cuantía posible de cal viva. Si se pretende clasificar en fracciones el material, lo lógico sería emplear una mezcla que facilitase el tamizado, por ejemplo una basada en el 30 % de fuel que dé como resultado un material pulverulento.

En resumen, el procesado por estabilización de los residuos de fuel del Prestige plantea ventajas e inconvenientes:

Ventajas

- El residuo sólido obtenido tras la estabilización puede ser gestionado en instalaciones convencionales y con maquinaria común de movimiento de tierras. Además, el residuo no contamina los medios mecánicos que intervienen en su gestión.
- Es posible separar por tamizado los materiales espurios gruesos como plásticos, rocas, etc. que podrían ser gestionados de manera separativa.
- El residuo estabilizado es un material fácilmente compactable, homogéneo e hidrófobo. Ello facilita su reducción de volumen y además, gracias a la limitada o nula capacidad para formar lixiviados contaminantes no representa un peligro para el medio ambiente.
- Este tratamiento se podría realizar directamente en las balsas provisionales sitas en la costa y además los residuos estabilizados podrían ser trasladados a vertederos locales. Esto eliminaría la necesidad de centralizar los residuos y supondría un importante ahorro en costes de transporte.

Inconvenientes

- El proceso por estabilización implica un importante coste en cal viva y también en procesado y transporte de serrín de granito. Adicionalmente habría que considerar el coste del proceso de mezclado.
- Al añadir sustancias estabilizantes se incrementa la masa de residuo en un factor que como máximo es de 3,3 y como mínimo de 2.
- La aplicación del este tratamiento dificulta la aplicación de una línea de reciclaje que implique la recuperación del fuel como combustible. De todos modos, el poder calorífico del fuel permanece, por lo que podría ser quemado aunque produciría un importante volumen de cenizas.

El proceso de estabilización propuesto es un buen tratamiento de los residuos de fuel del Prestige ya que, en lugar de manipular y gestionar un residuo líquido-viscoso con gran adhesividad, se opera con un residuo sólido, y esto simplifica en gran medida las operaciones. Sin embargo, es preciso definir los métodos de gestión que se aplican sobre este residuo estabilizado. En la presente tesis se han considerado dos posibles vías de resolución, por un lado el depósito definitivo y seguro en vertedero y, por otro, el reciclaje mediante inclusión en morteros y hormigones.

Capítulo 7. Almacenamiento definitivo

7.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos establecidos desde el principio fue buscar una solución para el almacenamiento definitivo y seguro de los residuos de fuel del Prestige. Dado que legalmente no se puede construir un vertedero permanente de líquidos era imprescindible tratar los residuos antes de su depósito permanente. El tratamiento que se ha desarrollado es una estabilización del residuo de fuel con cal viva y serrín de granito, que ha sido expuesto en el capítulo 6. Como resultado de esta estabilización se genera un residuo sólido pulverulento.

Las opciones de gestión de este residuo estabilizado están directamente vinculadas a las propiedades del mismo. Por ejemplo, si se tratase de un material tóxico, la única solución sería su depósito en un vertedero adecuado, pero si se trata de un residuo no peligroso pueden considerarse otros destinos fuera de vertedero.

Se ha trabajado en dos posibilidades de almacenamiento definitivo, por un lado el depósito en vertedero y, por otro, el empleo como material de relleno en zonas deficitarias de tierras. Esta última posibilidad estaría vinculada a una obra que implicase movimiento de tierras, como una carretera o una urbanización.

Partiendo, entonces, de estas dos posibilidades, depósito en vertedero o aplicación en rellenos, es preciso conocer las propiedades del material que permiten esos usos. Sobre todo, la cuestión más importante es conocer el comportamiento a la lixiviación, es decir, la capacidad que el residuo estabilizado tiene de contaminar el agua. Además, para cualquier aplicación geotécnica como las propuestas, es necesario conocer el comportamiento del material en cuanto a corte directo, consolidación, compactación y capacidad portante.

7.2. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

Se han planteado dos posibles soluciones para el almacenamiento definitivo del material estabilizado, una es el depósito en vertedero y la otra el empleo como material de relleno. Para ambos usos es necesario establecer las propiedades geotécnicas del residuo estabilizado.

La Tabla 7.1 muestra la batería de ensayos relevantes UNE-EN utilizados para determinar los parámetros geotécnicos de interés del producto estabilizado. Es necesario aclarar que, debido a las características intrínsecas del material, que es hidrófobo, algunos ensayos se han modificado según se explicará en los apartados correspondientes.

Tabla 7.1. *Parámetros geotécnicos y ensayos desarrollados.*

Parámetro	Norma UNE-EN
Próctor modificado	103501 (1994)
Próctor normal	103500 (1994)
CBR	103502 (1995)
Corte directo	103401 (1998)
Consolidación	103405 (1994)

7.2.1. Mezclas ensayadas

En el capítulo 6 se ha descrito el proceso de estabilización realizado sobre el residuo de fuel. Se estudió un amplio abanico de mezclas de fuel con cal y serrín de granito pero, muchas de ellas fueron rechazadas, unas por inviábiles y otras por poco económicas. Finalmente se seleccionó un conjunto de mezclas adecuadas para la estabilización, y sobre éstas se ha realizado un estudio geotécnico completo cubriendo, de este modo, todo el rango de mezclas estabilizadas útiles.

En la Tabla 7.2 se puede ver la nomenclatura y composición de cada una de las mezclas estabilizadas sobre las que se ha realizado la caracterización geotécnica. Cabe recordar que se emplearon dos lotes de residuo de fuel, el primero con alto contenido en fuel, que se corresponde con las muestras, M1 a M6 en la tabla y otra muestra de residuo con menos fuel, más variable, que se identifica con M7 y M8.

Tabla 7.2. *Nomenclatura y composición de las mezclas empleadas en la caracterización geotécnica*

Muestra	% Fuel (F)	% Cal viva (CV)	% Finos de granito (FG)
M1	30	70	0
M2	40	60	0
M3	30	17,5	52,5
M4	30	35	35
M5	30	7	63

Muestra	% Fuel (F)	% Cal viva (CV)	% Finos de granito (FG)
M6	40	30	30
M7	30	35	35
M8	30	35	35

7.2.2. Corte directo en seco

El estudio de las propiedades del corte permite conocer el comportamiento resistente de un relleno hecho del material estabilizado. Los datos que se obtienen de este ensayo son la cohesión y el ángulo de rozamiento interno, que son básicos para estudiar la estabilidad de taludes o la resistencia de una cimentación sobre un terreno.

Tal y como se ha expuesto anteriormente, debido a la hidrofobia del material no ha sido posible realizar el ensayo de corte directo en condiciones saturadas, por lo que se ha realizado del único modo posible: en seco. Por tanto, no se puede concluir nada sobre las condiciones saturadas del material.

Los ensayos de corte directo se llevaron a cabo mediante un aparato normalizado para presiones normales de hasta 400 kPa. Cada muestra seca fue sometida a cargas normales de 100, 200 y 300 kPa. Tras algunas pruebas de ajuste, se decidió aplicar una velocidad de deformación de corte de 0.25 mm/min. Los desplazamientos horizontales y verticales se registraron mediante un SAD vinculado a un par de LVDTs que actuaban de transductores durante el ensayo. Para la determinar la tensión de corte se empleó una célula de carga acoplada al bastidor de la caja de corte.

A modo de ejemplo de los ensayos realizados, en la Figura 7.1 se muestra la evolución de la tensión de corte respecto del tiempo de una muestra M6, compuesta por un 40% de fuel, un 30% de cal viva y 30% de serrines de granito.

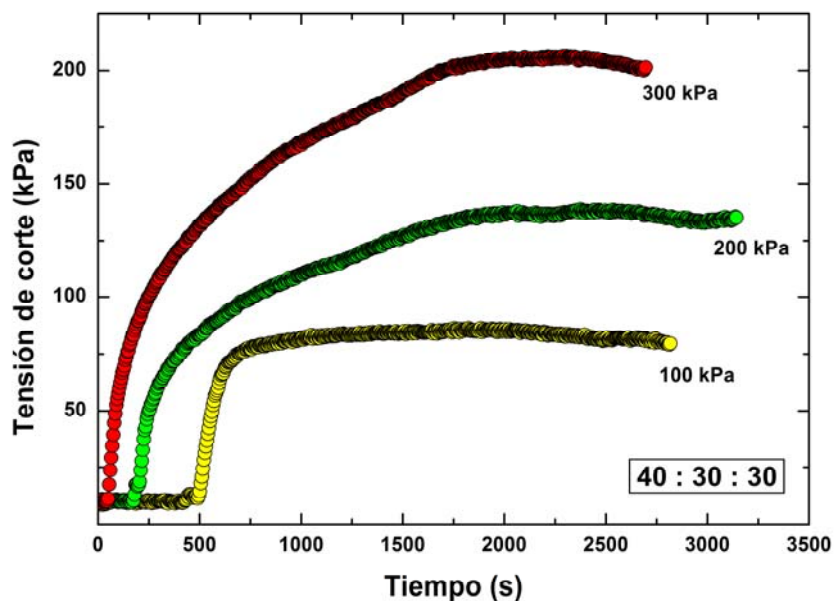


Figura 7.1. Resultados medidos en los ensayos de corte directo en seco para cargas normales de 100, 200 y 300 kPa, empleando una mezcla del 40 % de fuel, 30 % de cal y 30 % de serrines de granito

Se han ensayado a corte directo todas las mezclas de interés, de M1 a M8, presentando en todos los casos un comportamiento similar. En la Figura 7.2 se muestra la síntesis de los resultados de estos ensayos, pudiéndose ver que son similares a los valores medios de los serrines de granito. Esta comparación, sin embargo, sólo es cualitativa, debido a las condiciones no saturadas de las mezclas de fuel.

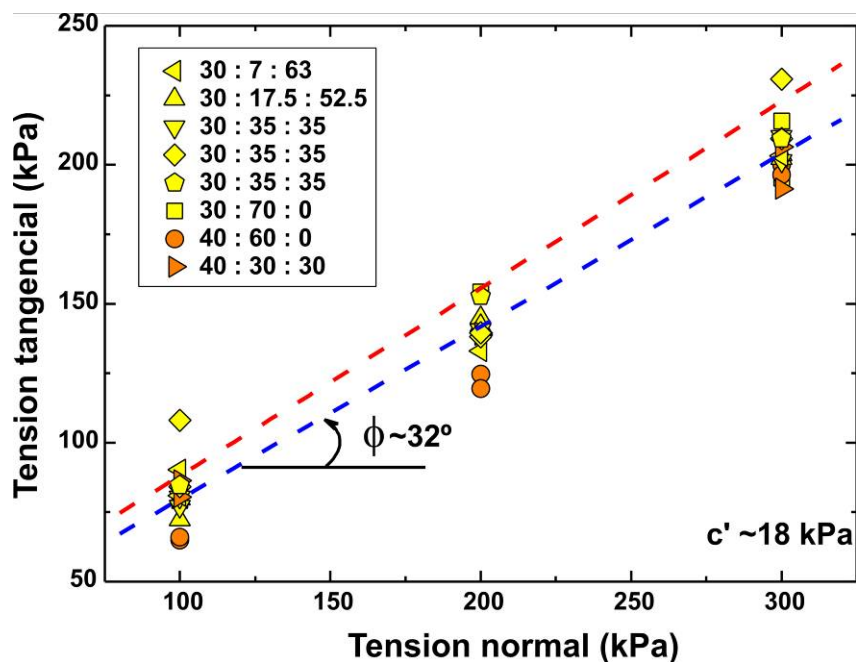


Figura 7.2. En azul, media de las mezclas estabilizadas, en rojo, muestra típica de serrín de granito. Los datos de los serrines de granito provienen de Barrientos (2007).

Los valores de ángulo de rozamiento y cohesión medidos en los ensayos se pueden ver en la Tabla 7.3. El ángulo de rozamiento interno es de aproximadamente 32°, con una cohesión media de 18 kPa. Se aprecia, también, que las menores cohesiones se obtienen para las mezclas con mayor contenido de fuel (puntos de color naranja). En general, los valores de los parámetros determinados son los típicos de cualquier suelo adecuado.

Tabla 7.3. Resultados obtenidos de los ensayos de corte directo para las muestras

Muestra	Proporciones F-CV-SG	Ángulo de rozamiento	Cohesión (kPa)
M1	30-70-00	32,14	18,63
M2	40-60-00	33,56	-
M3	30-17.5-52.5	32,41	13,80
M4	30-35-35	32,43	14,16
M5	30-7-63	31,97	19,13
M6	40-30-30	30,01	24,97
M7	30-35-35	31,80	27,70
M8	30-35-35	31,97	24,10

7.2.3. Ensayos edométricos en seco

El estudio de la consolidación de suelos permite conocer como se asienta un terreno ante las cargas que sufre. Por lo tanto, es un dato fundamental para el proyecto de rellenos y cimentaciones. La consolidación se simula mediante los ensayos edométricos, que estudian la deformación que produce en el tiempo una carga aplicada sobre una muestra de suelo. En un terreno genérico saturado, tras aplicar una tensión, ésta se transmite como presión sobre el agua atrapada pero, con el paso del tiempo, el agua se va descargando, y cede la responsabilidad resistente al esqueleto granular del suelo.

En los estudios de consolidación habituales se mide la disipación de la presión del agua en lo que se conoce como consolidación primaria. Después de que la muestra ha liberado toda el agua en exceso y que la presión de agua es la hidrostática sobreviene la consolidación secundaria que representa una deformación de la estructura granular del suelo. En general, la consolidación primaria es mucho mayor que la secundaria.

El objetivo del ensayo edométrico es medir la deformación sufrida durante la disipación de la presión del agua. El tiempo requerido para esto depende de la permeabilidad del terreno, en terrenos arcillosos, poco permeables, puede ser muy lenta. Sin embargo, en un terreno arenoso esta disipación suele ser rápida. Para relacionar los datos obtenidos en los ensayos de consolidación con la consolidación real se emplean varios parámetros extraídos del ensayo, siendo los más típicos los coeficientes C_v y C_c .

El ensayo que se ha realizado es análogo al edométrico, es decir, siguiendo en la medida de lo posible el procedimiento normalizado de la UNE-EN 103405 pero que, a causa de la hidrofobicidad de la mezcla, ha debido ser desarrollado en seco. Los resultados que este ensayo ofrece, por tanto, no son comparables con los obtenidos habitualmente, aunque sí permiten comparar el comportamiento de las diferentes mezclas estabilizadas.

Para la realización de los ensayos de consolidación se empleó una batería de bastidores edométricos para cargas de hasta 1800 kPa. Los desplazamientos verticales se registraron a través de un sistema de adquisición de datos (SAD) que recogía los datos de una serie de transductores LVDT. El proceso de carga/descarga en los ensayos de consolidación siguió la serie 80:150:300:600:1000/600:150 kPa, y cada carga actuó no menos de 24 horas. Debido a la naturaleza del material, todas las muestras (cilíndricas, de diámetro 50 mm y 20 mm de altura) se emplearon secas.

En este ensayo “edométrico en seco” no se mide la disipación de la presión de poro ya que no hay agua, y solo es posible medir la deformación de la estructura granular del material. Observando las gráficas de índice de poros respecto del tiempo (Tabla 7.3) se observa que la consolidación es rápida, es decir, en menos de un minuto la mezcla estabilizada se acomoda al nuevo escalón de carga. Además, apenas presenta entumecimiento al descargar.

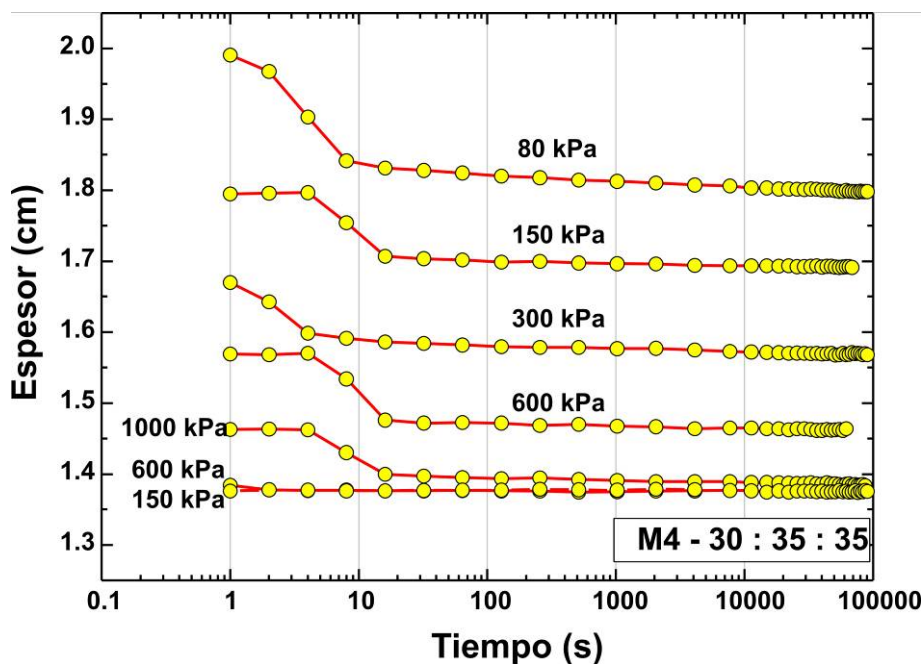


Figura 7.3. Curvas de consolidación de una mezcla estabilizada de 30 % de fuel, 35% de cal viva y 35 % de serrines de granito.

La forma de las curvas de consolidación es típica de numerosos suelos. Sin embargo la comparación debe ser hecha con cautela, ya que las curvas de carga/descarga se obtuvieron en ausencia de agua. La aparente rápida consolidación del material (representativa de todas las

muestras) obedece al hecho de que, en comparación con la conocida teoría de la consolidación, no existiría un aumento de la presión de agua de poro y la concomitante reducción de volumen debida a su disipación.

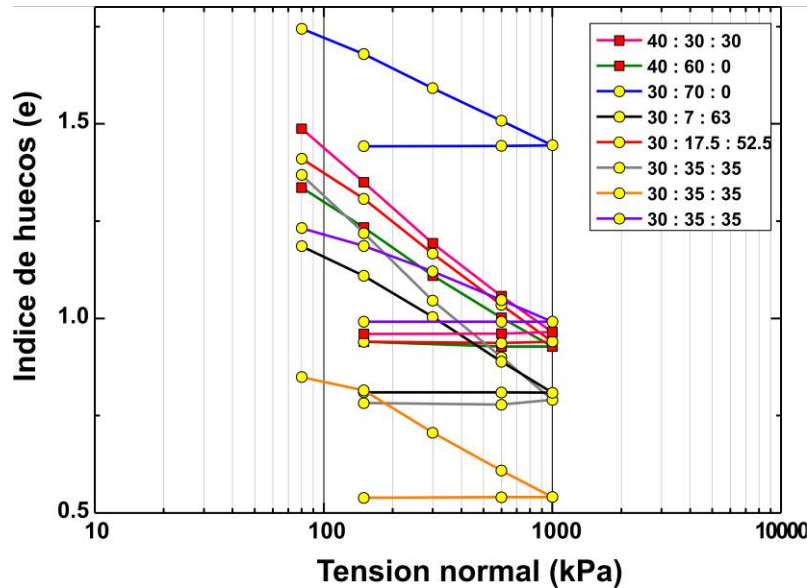


Figura 7.4. Representación del índice de huecos respecto del logaritmo de la tensión aplicada.

Aunque la presión de agua de poro no es determinante en el comportamiento frente a la consolidación del material estabilizado, no está claro que la variación en el índice de huecos tenga lugar como resultado de una reorganización de las partículas o a una deformación del “esqueleto” del material. Si asumimos que el residuo estabilizado está formado por gotas de fuel más o menos fluido encapsulado por un mineral no cohesivo, debería esperarse que cuando la muestra se carga, la deformación que tiene lugar se producirá a expensas de la porosidad.

La tensión normal máxima aplicada sobre las muestras fue de 1000 kPa. Este valor constituye un límite superior práctico, considerando que los gestores del residuo prevén un terraplén, de ser factible, cuyo espesor en ningún caso implicaría presiones superiores a la indicada (aproximadamente 35 ó 40 m). El material, tras este ensayo, no presenta ningún tipo de cambio de textura ni de color. Es interesante destacar que no se aprecia ningún tipo de refluidificación del fuel (Figura 7.5).

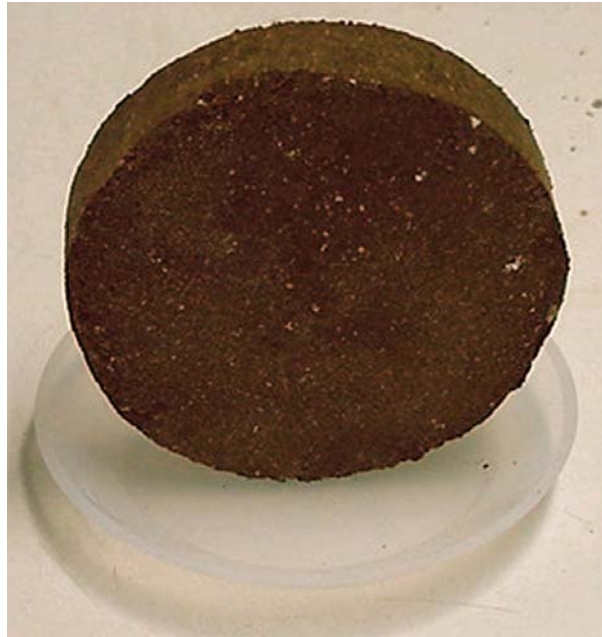


Figura 7.5. *Probeta obtenida tras un ensayo edométrico*

En resumen, del estudio edométrico se ha obtenido importante información sobre la consolidación del material:

- La deformación del terreno frente a la acción de cargas es rápida y asimilable a la de un terreno de tipo arenoso.
- El material no refluidifica por aplicación de tensiones altas, iguales a las que sufriría el material bajo un relleno de 40 m.

7.2.4. Estabilidad frente al calentamiento

La entidad gestora de los residuos del Prestige expresó inquietud por que la alta temperatura que se puede alcanzar dentro de un terraplén o un relleno (estimada en 60 °C) produjera una refluidificación de la mezcla estabilizada. Este temor se fundamentaba en el hecho de que el fuel disminuye mucho su viscosidad al aumentar la temperatura. Para estudiar esta posibilidad se realizó un ensayo que consistía en someter cada mezcla a una temperatura de 105° C durante 24 h, superando ampliamente las condiciones que se podrían dar dentro de un relleno. Tras el ensayo se observaba la muestra en busca de cualquier cambio en la misma. Lo único que se detectó fue una pérdida de masa del orden de 0.1 %, atribuida a la pérdida de agua intersticial. Es destacable que no se apreció ninguna variación en la apariencia ni de la textura del material, es decir, el material no se refluidificaba.

7.2.5. Ensayos de compactación

Los ensayos de compactación se emplean para optimizar el proceso de compactación en suelos y terrenos. En el ensayo más habitual, el Proctor, se determina la humedad que produce la máxima densidad del suelo para un método determinado de compactación. El campo de aplicación más habitual de este tipo de estudios es la preparación de explanadas y bases de carreteras.

Al igual que en otros ensayos geotécnicos, la hidrofobia del material dificulta la realización estricta del ensayo habitual de compactación Proctor. Sin embargo, se ha seguido en la medida de lo posible el ensayo normalizado de compactación Proctor (UNE-EN 103500), pese a que no es físicamente posible variar la humedad de la muestra. Obviamente, los resultados de estos ensayos de compactación no tienen la utilidad habitual de encontrar la humedad óptima de compactación, sin embargo, permiten realizar un análisis comparativo entre las distintas mezclas ensayadas (Tabla 7.4).

Tabla 7.4. Resultado de los resultados de los ensayos Proctor y realizados sobre las mezclas estabilizada en seco, medidas según un procedimiento adaptado de la UNE-EN 103500.

Muestra	%F-CV-SG	Densidad Proctor (kg/l)
M1	30-70-0	1,37
M2	40-60-00	1,34
M3	30-17.5-52.5	1,60
M4	30-35-35	1,58
M5	30-7-63	1,58
M6	40-30-30	1,36
M7	30-35-35	1,34
M8	30-35-35	1,37

Como ya ha sido señalado, sí se han podido realizar ensayos a cada una de las mezclas y, si se estudia la variación de la energía de compactación en función de la compactación, se extrae una interesante conclusión: un mayor contenido de serrines de granito favorece la compactación hasta un máximo a partir del cual ya no crece más la densidad (Figura 7.6 y Figura 7.7). La dosificación que produce la mayor densidad de compactación está señalada en las anteriores figuras con flechas de color gris y se corresponde con una mezcla de, aproximadamente, 35% de fuel, 50 % de serrines de granito y un 15% de cal viva.

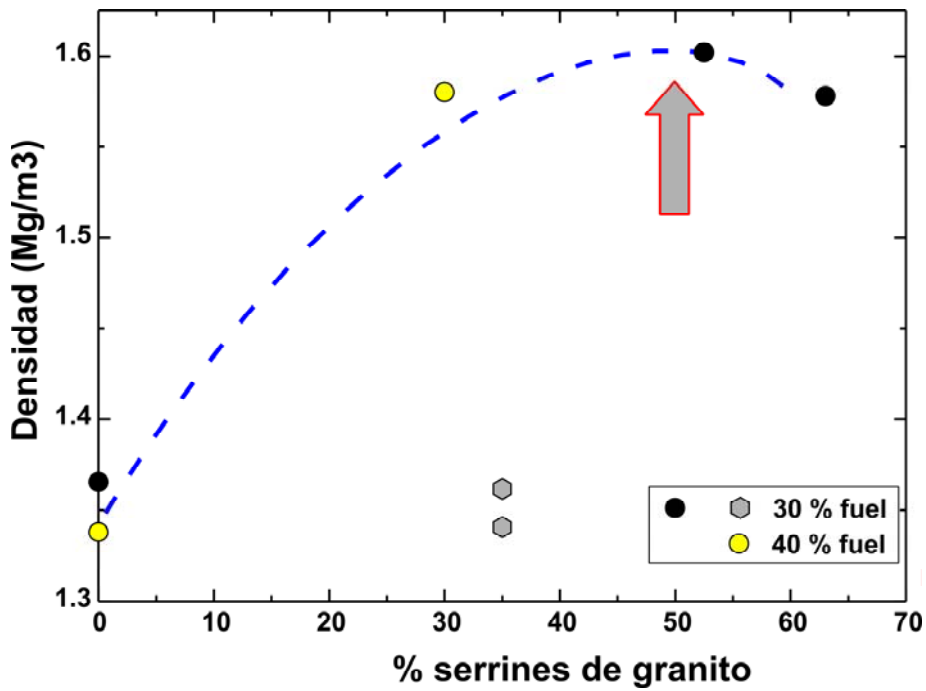


Figura 7.6. Curva de densidad de compactación del ensayo Proctor en función del contenido de finos de granito en el total de la mezcla.

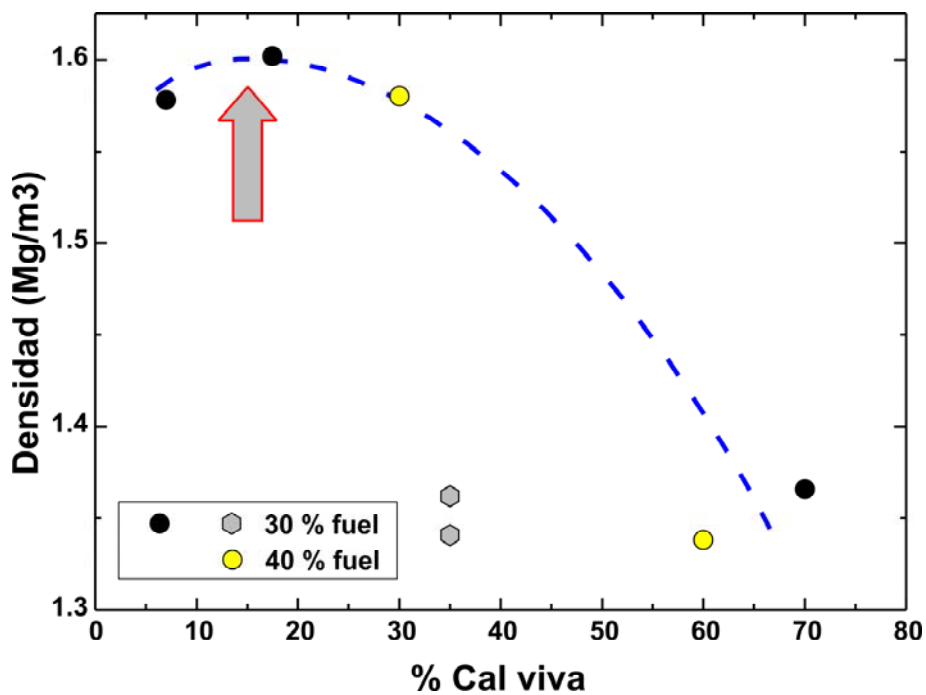


Figura 7.7. Curva de densidad de compactación del ensayo Proctor en función del contenido de cal viva en el total de la mezcla. Téngase en cuenta que 100%= fuel + cal viva+ serrines de granito. Los puntos en gris se corresponden con mezclas realizadas con una fracción de residuo bruto y no con el rico en fuel, por lo tanto no son directamente comparables.

En cuanto a los valores de densidad alcanzados tras la compactación, son en general bajos y comprendidos en el rango de 1,3 a 1,6 kg/l. No obstante si se tiene en cuenta que la densidad

de las partículas es aproximadamente 2 kg/l, se puede afirmar que el material se compacta razonablemente bien.

7.2.6. Ensayos CBR

El ensayo CBR permite determinar la capacidad resistente de explanadas y bases de carretera. De este modo se puede clasificar un terreno compactado en función de su utilidad como apoyo para las carreteras.

Al igual que en otros ensayos, éstos han sido realizados en seco debido a la hidrofobia del material. Además, las muestras se compactaron mediante el procedimiento Proctor modificado antes de ser ensayadas. En la Tabla 7.5 se expresan los resultados de los ensayos CBR realizados, sin embargo, debido a dificultades, tras múltiples intentos sólo se consiguió medir con éxito dos muestras extremas, la M1, con una gran cantidad de cal y la M5 con mucho serrín de granito. Analizando los resultados conseguidos parece existir una correlación entre un alto contenido de serrines de granito y una mejor capacidad portante en las mezclas estabilizadas. La Figura 7.8 muestra una de las muestras ensayadas, donde se puede observar que por aplicación de presión puntual tampoco se produce refluidificación del fuel.

Tabla 7.5. Resultados de los ensayos CBR por un procedimiento adaptado de la UNE-EN 103502.

Muestra	%F-CV-SG	nº Golpes	Densidad seca (kg/l)	CBR2,5 (%)	CBR5,0 (%)
M1	30-70-0	60	1.44	60	55
		30	1.42	55	52
		15	1.32	23	15
M5	30-7-63	60	1.91	11	13
		30	1.91	21	25
		15	1.69	20	19

El Pliego general de condiciones para la construcción de explanadas de carreteras establece una catalogación del terreno en función de su capacidad portante (Tabla 7.6). Si se presentan los resultados comparados con esta catalogación se puede observar que las mezclas estabilizadas compactadas entrarían en una catalogación E3, de un suelo muy poco deformable.

Tabla 7.6. Categorías de explanadas recogidas en el PG-3 (Ministerio de Fomento, 2002).

Categoría de Explanada	Características	Índice CBR
E1	Deformable	5 < CBR < 10
E2	Poco deformable	10 < CBR < 20
E3	Muy poco deformable	CBR > 20



Figura 7.8. *Probeta sometida a un ensayo CBR fabricada con una mezcla M5*

7.3. ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN

Para estudiar la posibilidad de un almacenamiento definitivo de los residuos estabilizados es imprescindible estudiar su lixiviación. De este modo, en la ley de vertederos se establecen tres categorías de residuos, inertes, no peligrosos y peligrosos, que están catalogadas principalmente en función de su lixiviación. Por tanto, un residuo es más peligroso cuanto mayor potencialidad tenga para contaminar el agua con la que contacte. En el caso de las mezclas estabilizadas se corroboró que la peligrosidad de la interacción entre el residuo estabilizado y el agua era baja, por lo que el residuo se podría catalogar como no peligroso.

Los ensayos de lixiviación se han realizado, sobre cada muestra, de acuerdo a la norma UNE-EN 12457-2 y DIN 38414. Los lixiviados se filtraron con un tamiz de $0.45 \mu\text{m}$ MILLEX HN y se han analizado con un ICP-MS VGEelemental, modelo Quadrapolar PlasmaQuad-II S.

La Tabla 7.7 y la Tabla 7.8 presentan los resultados obtenidos en los ensayos de lixiviación que fueron realizados sobre las mezclas M1 a M6. Todos los componentes se expresan según mg/kg de muestra seca. La conductividad en mS cm^{-1} . Los valores de referencia (dos últimas columnas) para la clasificación de residuos ($L/S = 10 \text{ L /kg}$) se corresponden con la Directiva europea 1999/31/EC de abril de 1999 sobre vertederos y la Decisión del Consejo 2003/33/CE del 19 de Diciembre de 2002, criterios de estabilización y procesos para la aceptación de residuos en vertederos.

Tabla 7.7. Resultados de los ensayos de lixiviación siguiendo la UNE-EN 12457-2.

Parámetro mg/kg	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Residuo inerte (DOCE, 2003)	Residuo no peligroso (DOCE, 2003)
pH	11.94	12.26	11.82	11.79	11.98	11.83	-	> 6
Conductividad (mS/cm)	8.69	8.95	7.85	8.11	5.56	8.80	-	-
As	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	0.5	2
Ba	6.93	4.48	0.99	1.48	0.73	1.27	20	100
Cd	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.04	1
Cr	0.15	0.19	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15	0.5	10
Cu	0.06	0.07	<0.02	<0.02	0.06	0.04	2	50
Hg	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.01	0.2
Mo	0.02	0.03	0.16	0.04	0.15	0.08	0.5	10
Ni	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	10
Pb	0.46	0.45	0.07	0.21	0.03	0.16	0.5	10
Sb	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	0.06	0.7
Se	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	0.1	0.5
V	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	-	-
Zn	0.3	0.34	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	4	50
F-	14.4	15.7	12.4	10.9	10.9	15.9	10	150
Cl-	3277	3311	3544	1756	3230	4391	800	15000
SO ₄ ²⁻	88.1	129	94.1	122	31.6	83.3	1000	20000

Tabla 7.8. Resultados de orgánicos de los ensayos de lixiviación siguiendo la UNE-EN 12457-2.

Parámetro	M1	M2	M3	M5	M6	M7	M8	F1	F2	Residuo inerte (DOCE, 2002)
HOI (mg/kg)	4,13	1,60	1,20	1,10	1,98	2,30	0,87	3,8	2,8	500
BTEX (µg/L)	1470,3	98,6	48,4	238,9	5,5	8,4	11,6	34,7	3,7	6000
PAH (µg/L)	63,2	80,5	94,8	57,0	35,3	56,3	40,2	38,5	13,5	-
PCB (ng/L)	71,8	280,2	17,8	91,2	93,4	227,0	36,4	109,2	37,6	10 ⁶
Fenol _{TOT} (µg/L)	688,0	1033,8	1260,3	1000,0	846,8	758,0	657,0	592,2	224,8	-

A la vista de los resultados es posible concluir que las mezclas estabilizadas ensayadas son catalogables como residuo no peligroso según la normativa europea (DOCE, 1999 y 2003). Además, únicamente incumplen la clasificación de residuo inerte por dos motivos, la cantidad de

materia orgánica que contiene, y en el lixiviado inorgánico por el contenido de fluoruros y cloruros, lo cual es lógico si se tiene en cuenta el alto contenido de agua de mar que incorpora la emulsión de fuel.

7.4. CONCLUSIONES

El objetivo propuesto en este capítulo era evaluar la posibilidad de un almacenamiento definitivo del residuo estabilizado. Para ello se consideraban dos métodos, depósito en vertedero o su empleo como relleno en terraplenes. Para conocer la adecuación del residuo a estas dos vías se realizó una caracterización que consistió en la determinación de las propiedades geotécnicas del residuo y la medición de su lixiviación.

La primera conclusión de la caracterización realizada es que todas las muestras tienen un comportamiento análogo, por lo que ha quedado demostrado que es igual de eficaz la estabilización con cal que la realizada con cal y serrín de granito. Esto representa una ventaja ya que el serrín es mucho más barato.

El residuo estabilizado es hidrófobo, por lo que las propiedades geotécnicas del residuo estabilizado han sido medidas en seco. Las conclusiones extraídas son que el residuo estabilizado es similar a un suelo granular común, con una resistencia al corte convencional y una consolidación rápida. Por tanto, es posible construir de manera segura, rellenos y terraplenes sin la necesidad de consideraciones especiales.

En cuanto a las propiedades de compactación, la hidrofobia del residuo resulta contraproducente, ya que no se puede emplear el efecto beneficioso de la humedad en la reorganización del esqueleto granular. Una vez compactado, el material ha demostrado ser resistente y sería adecuado incluso para servir de explanada de sustento de infraestructuras de diverso tipo.

Los ensayos de lixiviación son los que más limitan los usos del residuo estabilizado ya que se clasificaría como no peligroso, lo cual hace que el destino más adecuado para el mismo sea un vertedero controlado. Quedaría, de este modo, descartada la posibilidad de empleo en rellenos genéricos.

En resumen, el residuo una vez estabilizado tiene buenas características geotécnicas y atendiendo a la lixiviación una clasificación de residuo no peligroso según la legislación vigente. Por tanto, sería posible construir un vertedero para el depósito definitivo del residuo estabilizado sin tener que considerar la necesidad de ninguna barrera especial anticontaminación.

Capítulo 8. Reciclaje del residuo de fuel por inclusión en morteros de cemento

8.1. INTRODUCCIÓN

En esta línea paralela de investigación se intenta reciclar los residuos del Prestige mediante su inclusión en un material de base cementosa, específicamente morteros, micro-hormigones u hormigones. Este proceso se puede llevar a cabo de dos maneras: añadiendo directamente el fuel en el amasado o bien aplicándole un tratamiento previo que facilite el trabajo.

Las primeras experiencias con el proceso revelan la necesidad de emplear la segunda vía, es decir, fabricar la mezcla introduciendo el residuo de fuel en forma de material estabilizado. Las razones de esta forma de operar se justifican en los siguientes términos:

- Se resuelve óptimamente el problema de la separación de los materiales contaminantes, es decir, plásticos, materia orgánica, etc., que no son admisibles en el mortero u hormigón.
- Se desacopla el ciclo productivo, ya que la estabilización, la separación de las fracciones y el amasado del hormigón se pueden ejecutar de manera independiente.
- Se puede emplear maquinaria convencional de la industria del hormigón.

Es, por tanto, necesario determinar cual es la mezcla estabilizada más adecuada de entre todas las ensayadas. Desde el principio se eligieron dos proporciones como candidatas, que por su composición, propiedades y aspecto se revelaron como las más adecuadas. Se trata de las mezclas M1, de 30 % de residuo de fuel y 70 % de cal viva y M4, de 30 % de residuo de fuel, 35 % de serrín de granito y 35 % de cal viva. Tras las primeras aproximaciones, se detectó que la mezcla M4 generaba mejores resultados para el empleo en morteros, por lo que se decidió restringir el estudio únicamente a esta mezcla.

Para poder constatar que se podía incluir el residuo estabilizado en materiales de construcción de base cementicia era preciso fabricar morteros y hormigones que lo incluyesen. Se deci-

dió comenzar con la fase de mortero y posponer la de hormigón, ya que éste último exige considerar más variables y requiere del éxito de la primera. La diferencia fundamental entre ambos materiales es el tamaño máximo del árido, clasificado como arena para mortero y gravilla o grava para el hormigón. En definitiva, si se pueden fabricar morteros parecería evidente la posibilidad de fabricar hormigones.

La fabricación de morteros u hormigones no supone de por sí una solución a ningún problema, pero constituye una vía de reciclaje de aplicación puntual. Los buenos resultados son necesarios como paso previo a la ejecución de elementos constructivos fabricados con el nuevo material. Con morteros pueden fabricarse algunos productos in situ y, en el ámbito de la prefabricación, algunas piezas para pavimentos de exigencia variable en función de su uso y ubicación. Con hormigón el rango de uso es más amplio, desde piezas in situ con exigencias variables hasta una variada gama de piezas prefabricadas.

No puede esperarse, a priori, que la consecución de estos materiales vaya a reportar prestaciones por encima de los morteros y hormigones convencionales. Por ello parece razonable descartar cualquier uso estructural, limitando las posibles aplicaciones a elementos de acabado o de tránsito. Asimismo, la ejecución de las dosificaciones con la inclusión de un material estabilizado planteará, como se verá, una serie de variaciones respecto a los materiales convencionales. Por ello no parece adecuado, inicialmente, contemplar procesos de fabricación que no se ciñan, fundamentalmente, al ámbito de la prefabricación, en la que es más sencillo controlar más y mejor el proceso productivo.

8.2. FABRICACIÓN Y ENSAYOS DE MORTEROS

El objetivo planteado era incluir la fracción fina de la mezcla estabilizada dentro de algún material de base cementicia. Para alcanzar este objetivo se decidió fabricar mortero que incluyese como árido el residuo de fuel estabilizado. Los morteros, con un número reducido de componentes, permiten ajustar óptimamente las dosificaciones. No existen métodos de dosificación para este caso concreto, por lo que las dosificaciones deben obtenerse mediante un proceso iterativo de prueba-error. Una vez conseguidas estas dosificaciones adecuadas se pueden fabricar probetas que permitan evaluar la resistencia y la durabilidad de este tipo de morteros.

8.2.1. Ajuste inicial de dosificaciones

Dada la complejidad de la obtención de una dosificación, se comienza la aproximación mediante una serie de experiencias piloto. Inicialmente, se ha utilizado como referencia un mortero convencional con una proporción de tres partes de arena por una de cemento, tal y como es habitual en la construcción. Tomando este mortero como partida se procedió a ajustar las dosifi-

caciones en un entorno de incertidumbre en muchas variables. Tras la fase de aproximación se llegó a las siguientes conclusiones sobre la dosificación:

- Es necesario eliminar la fracción de cal de tamaño mayor a 0,4 mm, ya que de otro modo los morteros desarrollan fuertes expansiones (Figura 8.1). Ha quedado completamente demostrado que esta expansión se debe a la presencia de los granos gruesos de cal viva, los cuales permanecen parcialmente hidratados tras la estabilización. Este problema se eliminó completamente tras retirar por tamizado la fracción mayor de 0,4 mm de la cal viva.



Figura 8.1. *Probeta afectada por expansiones causadas por reacciones diferidas de la cal viva. Este problema se solucionó al eliminar la fracción de la cal superior a 0,4 mm.*

- Se decidió delimitar la relación en peso entre cemento, arena y mezcla estabilizada; ésta última directamente vinculada al porcentaje máximo de fuel incluido en el mortero.
- De entre todas las mezclas estabilizadas se seleccionó la mezcla estabilizada M3, con un 30% de residuo de fuel, un 35% de cal viva y 35% de serrín de granito, ya que combinaba una textura pulverulenta y una buena economía.
- Se emplea la relación agua cemento como uno de los parámetros básicos.
- Es necesario definir el tipo de cemento a emplear (categoría resistente y composición).
- Se ha constatado que es necesario emplear un aditivo fluidificante y, en su caso, el tipo y cantidad a disponer.

8.2.2. Dosificación de morteros con fuel

La dosificación de morteros que incluyen residuo estabilizado se planteó en dos etapas. En primer lugar se realizaron unas pruebas de ajuste inicial para delimitar las distintas variables de las dosificaciones. A continuación, para alcanzar dosificaciones adecuadas se emplearon los resultados de estos tanteos, acotando la importancia de las variables. De este modo fue posible definir los parámetros básicos de las dosificaciones de mortero, las cuales se han mantenido en todos los morteros ensayados:

- (Arena + mezcla estabilizada)/ cemento = 3 (en peso). Es una relación habitual en morteros y, en definitiva, el proceso de mezcla se basa en una sustitución de arena por material estabilizado.
- Agua/cemento = 0,5 a 0,65 en peso. Esta relación marca dos parámetros fundamentales. El primero es la categoría resistente del producto final, mayor cuanto menor sea la ratio apuntada. El segundo es la trabajabilidad de la mezcla, mayor a medida que crece tal ratio.
- Cemento = 450 kg/m^3 . Es una cantidad alta, necesaria para alcanzar resistencias adecuadas. La introducción de la mezcla estabilizada modifica a la baja las prestaciones mecánicas y la durabilidad, y en este sentido un alto contenido de cemento compensa los efectos. El cemento a emplear fué de tipo Pórtland puro (CEMI según la normativa española), ya que no se deseaba introducir más variables en el complejo estudio de la dosificación. Aunque la norma contempla hasta 6 tipos de cemento Pórtland puro, en la práctica los datos del IECA (IECA, 2008) revelan que en España sólo se fabrican cementos de categoría CEM I 42,5R, 52,5N y 52,5R. De entre ellos se optó por el primero, de menor avidez por el agua y generador de un calor de hidratación más controlado.
- Superfluidificante limitado a 2,5% de peso de cemento. Permite corregir la trabajabilidad, por lo que la dosis final dependerá del parámetro anterior. La variabilidad de este parámetro se orientó a la obtención de mezclas que, en estado fresco, permitiesen el amasado y la fabricación de probetas en moldes con similares consistencias. Se ha utilizado el aditivo Melcret 222 (BASF) y en las etapas finales se ha empleado también Glenium C355 (BASF) con el que se han obtenido mejores resultados de resistencia a compresión.
- La arena empleada ha sido una arena caliza de 0/4 mm en la que se eliminó la fracción menor de 0,4 mm para que los finos del mortero fuesen únicamente mezcla estabilizada.
- Contenido de fuel = 5% a 14 %. Este fuel se introduce en forma de residuo estabilizado (30 % de residuo de fuel, 35 % de cal viva y 35 de serrín de granito). Por tanto, un porcentaje dado de fuel implica que en el mortero se ha introducido una masa de residuo estabilizado 3,3 veces superior. El contenido en fuel se ha empleado como uno de los parámetros básicos de las dosificaciones. Los límites en la introducción de fuel quedan acotados por dos razones. La primera es de índole económico: porcentajes menores al 5% exigirían la fabricación de volúmenes enormes de material para reciclar una parte significativa del fuel existente. La segunda es de carácter técnico: porcentajes por encima del 14% hacen inviable, como se mostrará, la fabricación de un mortero.

Como resultado de la combinación de los distintos parámetros del amasado se diseñaron un total de 18 dosificaciones diferentes (Tabla 8.1). Como se puede ver, también se fabricaron cuatro morteros sin residuo estabilizado, que sirven de referencia sobre la influencia del fuel. Todas

las dosificaciones surgen de la variación de los dos parámetros fundamentales, la relación agua cemento y la cantidad de fuel de la muestra. Es por esto que se identifican mediante la combinación de la letra D, el céntuplo de la relación a/c y por último el contenido de residuo de fuel. Por ejemplo, una dosificación con relación a/c 0,65 y un contenido en fuel del 10% se denomina D65-10.

Al definir las variables principales, porcentaje de fuel y relación agua cemento, se pueden obtener el resto de materiales que intervienen en el amasado. Como se ha dicho, siempre permanece constante la cantidad de cemento y la relación entre cemento y áridos, de 1:3 en peso. El árido de este mortero, tal y como se ha mencionado, viene dado por una mezcla de la arena y mezcla estabilizada. Por último se añade siempre una cantidad de aditivo superfluidificante inferior al 2,5 % del peso de cemento para conseguir una consistencia aceptable.

Tabla 8.1. Dosificaciones de morteros con residuo de fuel.

Grupo	Dosificación	a/c ¹	Fuel (%)	Cemento (g)	Agua (g)	Mezcla ² (g)	Arena (g)	Superfluidificante ³ (g)	Superfluidificante (% en peso de cemento)
D65	D65-0	0,65	0	451,6	293,5	0	1354,9	0	0
	D65-8	0,65	8	451,6	293,5	560	794,8	6,77	1,5
	D65-9	0,65	9	451,6	293,5	630	724,8	6,77	1,5
	D65-10	0,65	10	451,6	293,5	700	654,8	6,77	1,5
	D65-11	0,65	11	451,6	293,5	770	584,8	9,03	2,0
	D65-12	0,65	12	451,6	293,5	840	514,8	11,29	2,5
D60	D65-13	0,65	13	451,6	293,5	910	444,8	11,29	2,5
	D60-0	0,60	0	456,5	273,9	0	1369,6	0	0
	D60-8	0,60	8	456,5	273,9	560	809,6	6,85	1,5
	D60-9	0,60	9	456,5	273,9	630	739,6	6,85	1,5
	D60-10	0,60	10	456,5	273,9	700	669,6	11,41	2,5
	D60-11	0,60	11	456,5	273,9	770	599,6	11,41	2,5
D55	D55-0	0,55	0	461,5	253,8	0	1384,6	0	0
	D55-8	0,55	8	461,5	253,8	560	824,6	9,23	2,0
	D55-9	0,55	9	461,5	253,8	630	754,6	11,54	2,5
	D55-10	0,55	10	461,5	253,8	700	684,6	11,54	2,5
D50	D50-0	0,50	0	466,7	233,3	0	1400	0	0

¹ La relación agua cemento no tiene en cuenta el agua añadida en el superfluidificante

² La mezcla estabilizada empleada está compuesta por un 30 % de residuo de fuel, un 35 % de cal viva y un 35 % de serrín de granito

³ El tipo de superfluidificante empleado fue Melcret 222 y Glenium C355 (BASF) obteniendo mejores resultados con éste último (Tabla 8.2 y Tabla 8.3).

8.2.3. Ensayos sobre morteros con residuo de fuel

Se realizaron múltiples ensayos sobre estos morteros, en los que se buscó una caracterización completa de la variación de propiedades reológicas, físicas y mecánicas en función de la adición de fuel del Prestige. Además se realizaron morteros de contraste en los que no se sustituyó ninguna fracción de la arena por mezcla estabilizada. Como se ha dicho, los materiales empleados para fabricar estos morteros han sido: mezcla estabilizada, arena, cemento, agua y aditivo fluidificante (Figura 8.2).

Con las diferentes dosificaciones se fabricó un importante número de probetas para someterlas a diferentes ensayos. Se emplearon, sobre todo, probetas prismáticas de 160x40x40 mm y, para determinados ensayos, probetas cúbicas de 100x100x100 mm. En todos los casos la relación entre la dimensión mínima de la probeta y el tamaño máximo del árido siempre superó el valor de 10, por lo que las probetas son plenamente representativas.



Figura 8.2. *Materiales empleados en la fabricación de morteros*

A continuación se describen los ensayos a los que se sometieron todos los morteros:

- Consistencia en fresco mediante el procedimiento de ensayo empleado por Vázquez (2000) que determina la energía de compactación empleando la compactadora de probetas. La energía se mide en función del número de golpes de compactadora necesarios para que la masa de hormigón alcance el extremo opuesto del molde tras retirarse una barrera previamente dispuesta.
- Densidad, porosidad y coeficiente de absorción según UNE 83-820-94 EX

- Flexotracción según UNE 196-1. Este ensayo se realiza mediante un pórtico IBERTEST PEV-300, de 300 kN de capacidad máxima, en control por carga y con la ayuda de un dispositivo tipo capilla para el ensayo.
- Compresión según UNE 196-1. Se realiza mediante una prensa IBERTEST MEH-3000, de 3000 kN de capacidad máxima, en control por carga y con la ayuda de un dispositivo tipo capilla para el ensayo. La Figura 8.3 muestra los métodos de ensayos mecánicos.

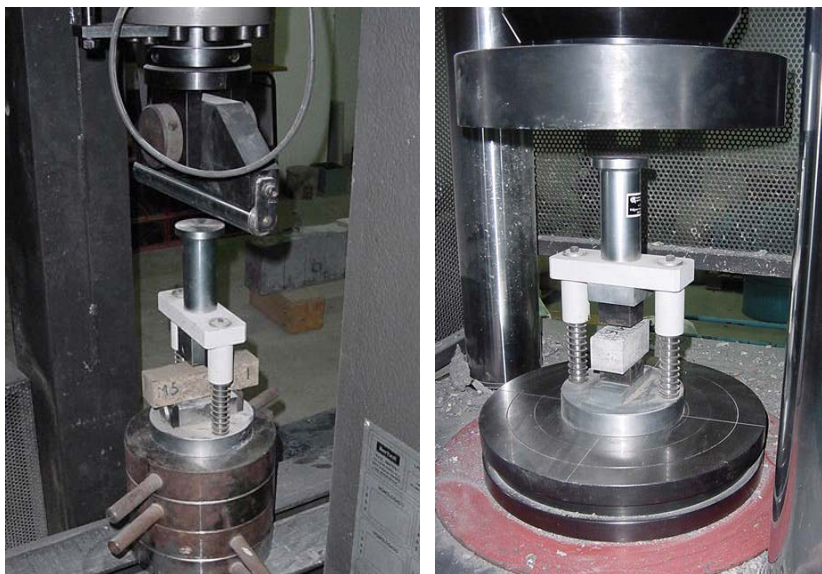


Figura 8.3. *Ensayos mecánicos de morteros. Izquierda, flexotracción. Derecha, compresión*

- Determinación del módulo elástico según la UNE 83316.
- Ensayo hielo-deshielo siguiendo la UNE 67028. Se aplicaron un total de 20 ciclos en los que se sometía a las probetas a 18h a -10°C y 6h a $+15^{\circ}\text{C}$ sumergidas en agua.
- Lixiviación según UNE-EN 12457.

8.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SOBRE MORTEROS

A continuación se presenta una tabla resumen de los principales parámetros medidos en los ensayos. Se refleja el contenido en fuel, la relación agua cemento, la cantidad de aditivo, la energía de compactación y las resistencias a compresión y flexotracción a 7, 14 y 28 días (Tabla 8.2 y Tabla 8.3). En el Anexo B se presentan los resultados completos de los ensayos realizados.

Tabla 8.2. Resultados de los ensayos reológicos y mecánicos sobre morteros empleando superfluidificante Melcret 222.

Dosif.	a/c	Fuel (% en peso)	Nº de probetas	Energía de compactación (nº de golpes)	Resistencia a flexión f_{tf} (MPa) a los días:			Resistencia a compresión f_c (MPa) a los días:		
					7	14	28	7	14	28
					D65	0,65	0	18	8	-
0,65	9	6	15	5,0		5,5	6,3	15,5	15,7	22,9
0,65	10	6	23	5,3		5,7	6,3	12,9	19,3	21,4
0,65	11	6	26	5,0			6,9	12,6		21,7
0,65	12	6	31	4,7		5,3	6,1	17,8	21,4	19,7
0,65	13	6	32	5,0		6,2	5,4	14,7	20,1	20,0
D60	0,6	0	12	11	-	-	9,0	-	-	35,3
	0,6	8	6	15	6,8	7,0	6,6	15,2	24,4	27,2
	0,6	9	6	26	6,6	4,9	6,7	21,2	21,0	25,9
	0,6	10	6	20	6,3	5,5	6,6	22,4	22,2	27,3
	0,6	11	6	46	6,5	5,5	5,2	19,7	19,9	24,3
D55	0,55	0	9	20	-	-	8,8	-	-	38,7
	0,55	8	6	24	5,7	6,6	8,4	24,0	26,0	28,8
	0,55	9	6	38	6,2	7,2	6,0	22,4	22,3	28,0
	0,55	10	6	56	6,3	6,7	6,1	18,2	24,8	25,0
D50	0,5	0	3	51			8,6			42,8
	0,5	8	6	44	6,6	7,4	6,5	27,2	29,8	27,3
	0,5	9	6	128	5,9	6,0	7,5	24,2	27,8	24,1

Tabla 8.3. Resultados de los ensayos reológicos y mecánicos sobre morteros empleando superfluidificante Glenium C355.

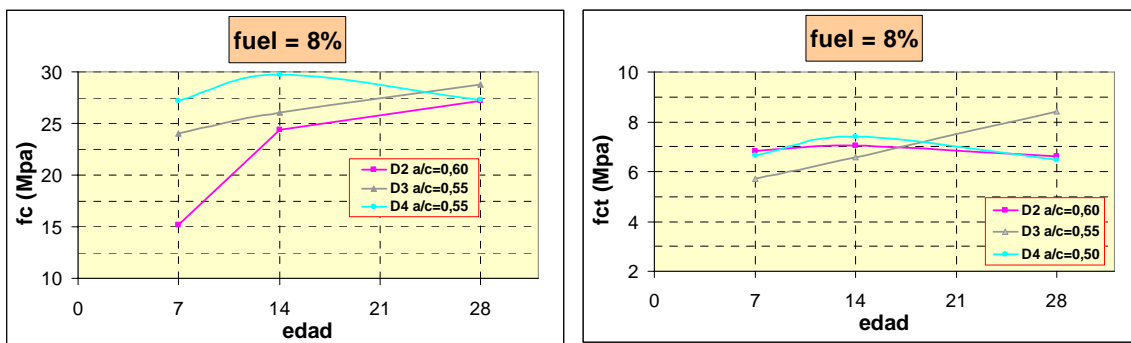
Dosif.	a/c	%fuel en peso	Nº de probetas	Energía de compactación (nº de golpes)	Resistencia a flexión f_{tf} (MPa) a los días:		Resistencia a compresión f_c (MPa) a los días:	
					7	28	7	28
					D65	0,65	0	3
0,65	8	3	9	4,41		4,23	21,78	25,29
0,65	9	3	44	4,68		4,10	23,18	24,58
0,65	10	3	39	4,13		4,25	22,4	25,15
0,65	11	3	22	4,80		5,13	23,33	26,45
0,65	12	3	17	4,10		4,68	23,44	27,10
0,65	13	3	53	4,29		4,15	21,52	25,87

Dosif.	a/c	%fuel en peso	Nº de probetas	Energía de compactación (nº de golpes)	Resistencia a flexión f_{tr} (MPa) a los días:		Resistencia a compresión f_c (MPa) a los días:	
					7	28	7	28
D60	0,6	0	3	19	7,10	7,64	32,82	37,65
	0,6	8	3	37	4,95	5,01	25,3	28,76
	0,6	9	3	-	4,76	4,89	25,46	29,64
	0,6	10	3	13	4,37	4,56	26,82	30,75
	0,6	11	3	19	4,37	5,56	25,33	29,36
D55	0,55	0	3	21	5,97	7,41	36,59	40,73
	0,55	8	3	16	5,54	4,97	30,26	32,60
	0,55	9	3	17	4,95	6,44	30,6	34,44
	0,55	10	3	31	4,60	6,01	28,78	34,03
D50	0,5	0	3	52	6,75	7,80	39,92	45,63
	0,5	8	3	56	5,81	5,77	34,25	39,18

Tal y como se puede apreciar en ambas tablas, el comportamiento es diferente al cambiar de aditivo superfluidificante. Los valores de resistencia a compresión son mucho mayores con Glenium, alcanzándose un 40% más a 7 días y un 25% más a 28 días. Sin embargo los valores de resistencia en el caso del Melcret son aceptables, siendo superiores, en general, a los 15 MPa a 7 días y a los 20 a 28 días.

8.3.1. Evolución de resistencias

Las curvas de la Figura 8.4 se presentan la evolución de resistencias a compresión y tracción. Se observa que el desarrollo resistente es normal hasta 28 días. Queda constatado además que la resistencia disminuye en valor absoluto y a todas las edades al aumentar tanto la relación a/c como el contenido en fuel.



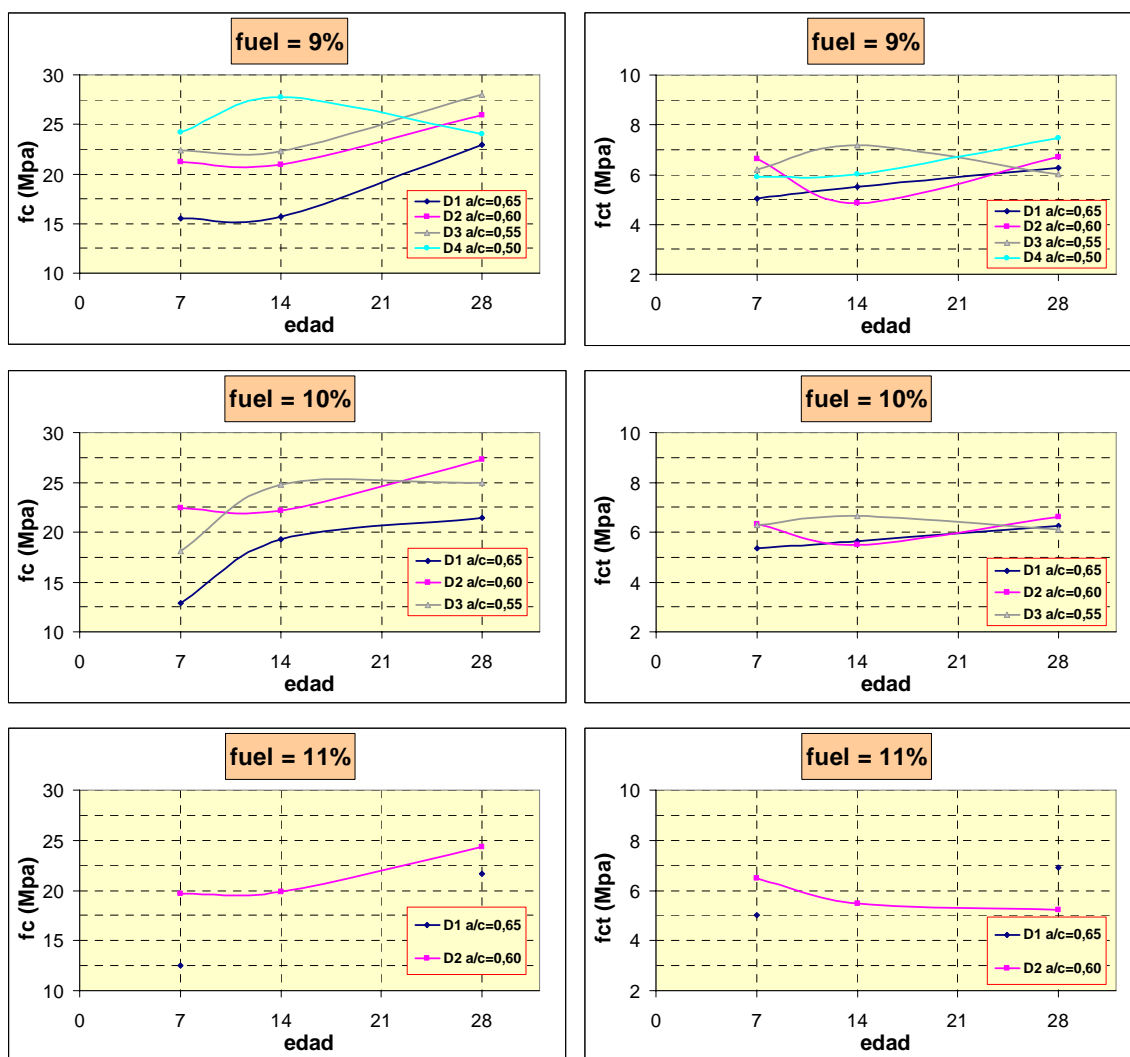


Figura 8.4. Evolución de resistencia a compresión y tracción hasta 28 días en las diferentes proporciones de fuel

Para conocer la resistencia a largo plazo de los morteros con fuel se conservaron un pequeño grupo de probetas para romper a varios años. En la Tabla 8.4 se pueden ver los resultados obtenidos y su comparación con la resistencia a 28 días. Se aprecia que a largo plazo el mortero que contiene fuel alcanza unos valores altos de resistencia, pero a corto plazo son más bajas. Este comportamiento se puede atribuir a la presencia de fuel pues es conocido que los compuestos orgánicos retrasan el fraguado y endurecimiento de los morteros de cemento (Valls, 1998).

Tabla 8.4. Resultados comparativos de resistencia a compresión a 28 días y 3 años.

Dosificación	a/c	% fuel	fc,28 (MPa)	fc,3 años (MPa)
D65-10	0,65	10	21,4	38,5
D65-12	0,65	12	17,89	38,3
D65-13	0,65	13	20,71	34,8
D55-8	0,5	8	20,35	45,7

En la Figura 8.5 se representa la resistencia a compresión y tracción en función de los parámetros básicos de amasado, la relación agua/cemento y el porcentaje de fuel en el mortero.

El aumento en el porcentaje de fuel disminuye el valor absoluto de las resistencias, al igual que la relación agua/cemento. Este fenómeno parece claro en el caso de la resistencia a compresión pero esta tendencia no es tan clara en los resultados de resistencia a tracción. Existe un tercer parámetro que ejerce su influencia en algunos casos, por ejemplo en la resistencia a compresión. En efecto, para una relación a/c de 0,5 parece que hay un descenso resistente respecto a una a/c de 0,55. Sin embargo, atendiendo a la consistencia, se aprecia que la primera dosificación requirió 20 golpes y la segunda más de 40. Se deduce por ello que la peor compactación, al estar la mezcla muy seca, es el motivo de esta baja resistencia a compresión para la relación a/c de 0,5.

Es conocida la influencia de la relación a/c en la resistencia, pero no así la del fuel. Téngase en cuenta que el fuel se introduce como material estabilizado pulverulento. La mayor cantidad de fuel implica un mayor contenido en finos, lo que induce una merma de resistencia.

A pesar de todo, es muy destacable observar que se superan los 20 MPa a 28 días en numerosas dosificaciones, siempre que se mantenga la relación a/c por debajo de 0,65 y, simultáneamente, el contenido en fuel no pase del 12%.

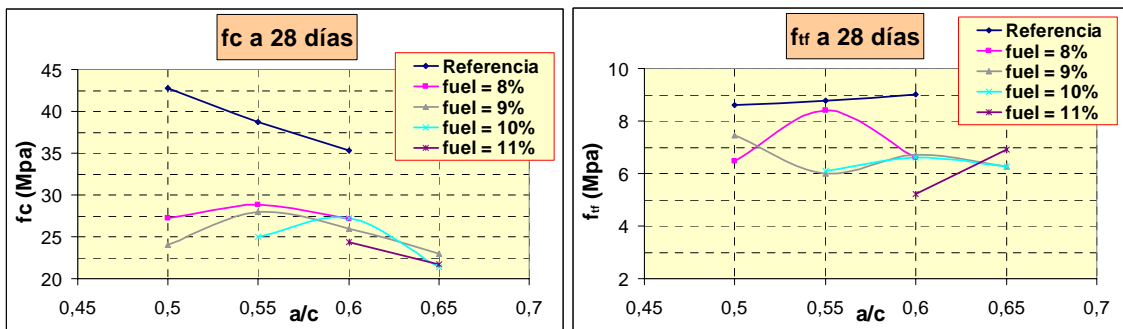


Figura 8.5. Influencia de la relación a/c en la resistencia a compresión y tracción

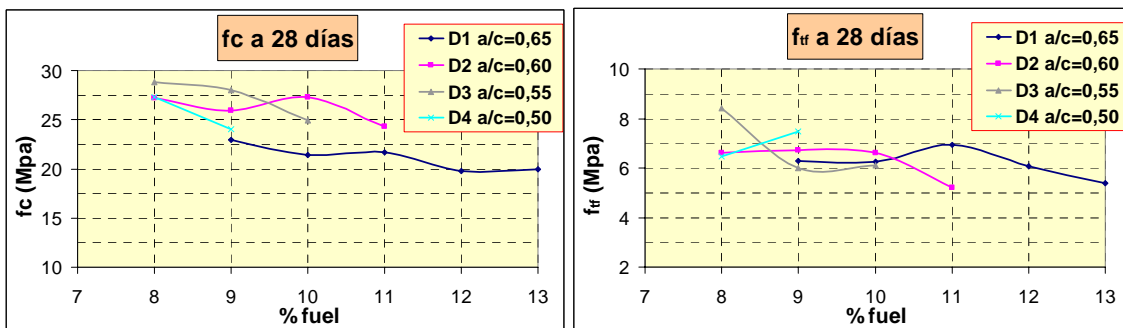


Figura 8.6. Influencia del contenido en fuel en la resistencia a compresión y tracción

Se ha constatado que los morteros con fuel tienen una resistencia a flexión con valores muy altos en comparación con la resistencia a compresión. Si se analiza la ratio resistencia a tracción vs. resistencia a compresión se obtiene en un mortero convencional un valor de un 20% y en el caso del mortero con fuel un valor del 27%. De todos modos, es sabido que la proporción entre resistencia a compresión y tracción varía con la resistencia a compresión del mortero.

8.3.2. Determinación del módulo elástico

El módulo de elasticidad se ha medido de acuerdo con la UNE 83316 en tres ramas de descarga sucesivas tras haber llevado el mortero al tercio de la resistencia a compresión.

Tal y como se puede observar los morteros con fuel tienen un módulo comprendido en el intervalo 11 000 a 16 000 MPa. Los valores se sitúan en el rango habitual de los morteros convencionales.

Tabla 8.5. *Resultados de módulos elásticos sobre morteros empleando superfluidificante Melcret 222.*

Dosificación	a/c	% fuel	fc,28 media cúbicas (MPa)	Ec, 28días (MPa)
D65-8	0,65	8	17,55	15717
D65-13	0,65	13	17,89	13365
D60-9	0,6	9	20,71	11288
D60-11	0,6	11	19,08	13381
D50-8	0,5	8	20,35	12135

8.3.3. Densidad, Porosidad y Coeficiente de absorción

Se ha determinado la densidad, la porosidad y el coeficiente de absorción de todos los morteros programados.

Tal y como se puede observar en la Tabla 8.6, existen diferencias significativas entre los morteros con y sin fuel. En general los morteros con fuel tienen una densidad próxima a 1,9 kg/dm³, mientras que los de referencia aumentan a 2,15 kg/dm³. El coeficiente de absorción es mayor en el caso de los morteros con fuel, lo que parece indicar que los morteros no han heredado la hidrofobicidad de las mezclas estabilizadas.

Tabla 8.6. Resultados de los ensayos de densidad, porosidad y coeficiente de absorción en morteros con fuel y de referencia a 28 días (UNE-EN 1338, UNE 83820).

Dosificación	a/c	Fuel (%)	Densidad (kg/dm ³)	Porosidad (%)	Coef. de absorción (%)
D65-0	0,65	0	2,13	19,57	9,18
D65-8	0,65	8	1,90	21,92	11,53
D65-9	0,65	9	1,86	22,24	11,96
D65-10	0,65	10	1,84	21,59	11,75
D65-11	0,65	11	1,83	20,62	11,26
D65-12	0,65	12	1,82	19,09	10,48
D65-13	0,65	13	1,79	18,51	10,33
D60-0	0,60	0	2,15	18,83	8,76
D60-8	0,60	8	1,93	20,21	10,49
D60-9	0,60	9	1,92	20,39	10,62
D60-10	0,60	10	1,92	17,82	9,29
D60-11	0,60	11	1,89	16,82	8,92
D55-0	0,55	0	2,17	17,81	8,23
D55-8	0,55	8	1,96	18,02	9,22
D55-9	0,55	9	1,96	16,05	8,20
D55-10	0,55	10	1,93	15,68	8,11
D50-0	0,50	0	2,19	16,66	7,62
D50-8	0,50	8	2,02	16,43	8,15

Se observan ciertas tendencias al representar estos tres parámetros respecto a la relación agua/cemento y el porcentaje de fuel. El parámetro con mayor influencia es la relación a/c en todos los casos. Al aumentar ésta disminuye la densidad, aumenta la porosidad y aumenta mucho el coeficiente de absorción.

Las relaciones entre los resultados de los ensayos y el porcentaje de fuel no son muy fuertes, aunque presentan tendencias claras: al aumentar el contenido en fuel disminuye la densidad, lo que es lógico pues la mezcla estabilizada es menos densa que la arena. La porosidad también disminuye, quizá porque al haber más finos se llenan mejor los espacios intergranulares. Y, por último, el coeficiente de absorción presenta una cierta disminución al aumentar el porcentaje de fuel.

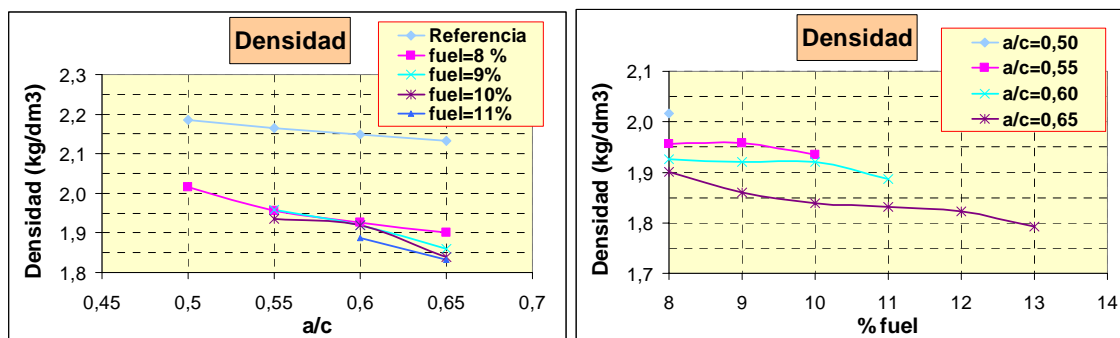


Figura 8.7. Variación de la densidad según la relación agua cemento y el porcentaje de fuel

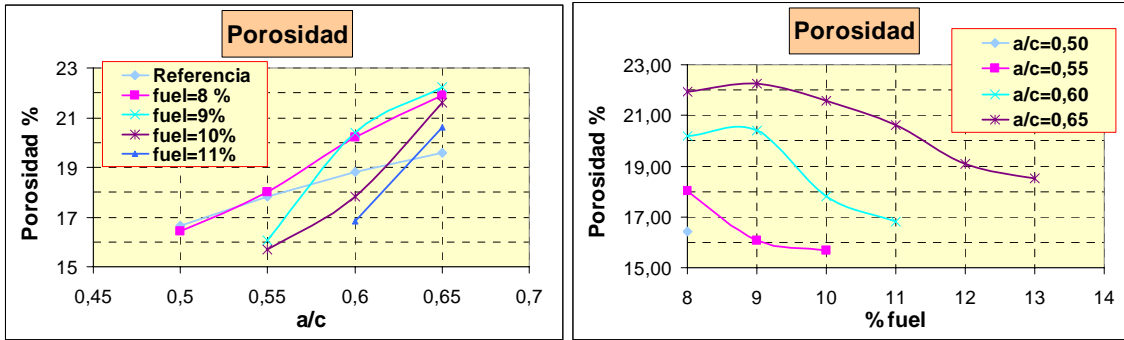


Figura 8.8. Variación de la porosidad según la relación agua cemento y el porcentaje de fuel

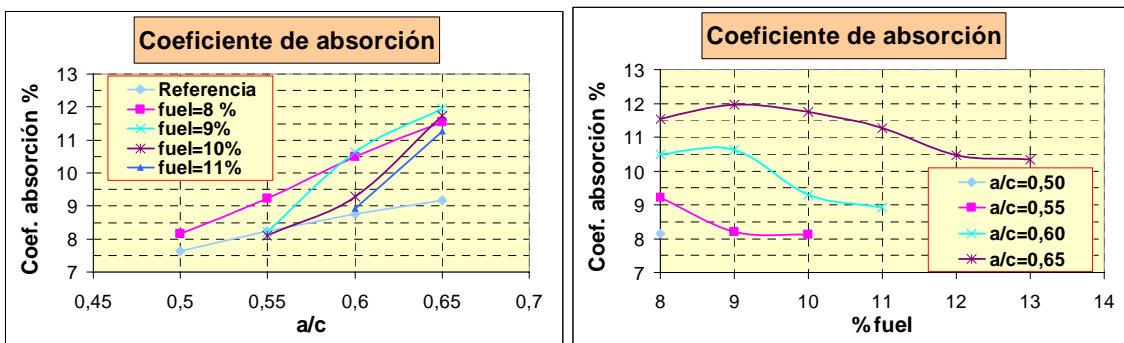


Figura 8.9. Variación del coeficiente de absorción según la relación agua cemento y el porcentaje de fuel

8.3.4. Energía de compactación

La energía de compactación se ha empleado como medida de la consistencia de los morteros. Este ensayo no es normativo, pero está avalado por la experiencia (Vázquez, 2000). Es un ensayo sencillo que aprovecha la máquina de compactación de probetas utilizada en el ensayo EN 196-1, con un procedimiento similar al método de la caja. En este caso se colocan unos obstáculos en los moldes prismáticos de mortero, para luego llenar el hueco sobrante y, a continuación, retirar los obstáculos (Figura 8.10). Aquí comienza el ensayo, que consiste en aplicar golpes de la compactadora hasta que la masa alcanza el extremo del molde. El resultado del ensayo es el número de golpes necesarios y esto representa la energía precisa para alcanzar un determinado nivel de compactación.



Figura 8.10. Ensayo de energía de compactación empleado. Izquierda, retirada de obstáculos. Derecha, estado final tras aplicar los golpes necesarios para que el mortero alcance el extremo opuesto del molde.

La energía de compactación se ha empleado como medida de la consistencia del mortero fresco, un parámetro fundamental de cualquier mortero y hormigón. En la fabricación de las probetas empleadas en el resto de ensayos se realizó una compactación, igual para todas, de 60 golpes en la mesa de sacudidas siguiendo las instrucciones del ensayo EN 196-1. Si una dosificación presentaba una consistencia blanda se conseguía un buen compactado, sin embargo, con morteros muy secos, los 60 golpes podían ser insuficientes para una compactación adecuada. Estas diferencias de consistencia pueden hacer variar las propiedades del mortero, hasta el punto de que en algunos casos de morteros con poco fuel pero muy secos, se daban resistencias bajas debidas a la mala compactación del mortero.

Ya se ha comentado que las mezclas se diseñaron con un patrón común, y que el porcentaje de superfluidificante se ajustó para obtener un material fresco de consistencia, que aunque no igual, sí permitía la labor de llenado de moldes y la compactación. A partir del concepto de energía de compactación, medida con el número de golpes según se ha comentado arriba, no se han aceptado aquellas dosificaciones que conducían a energías de compactación de más de 60 golpes por ser éstas excesivamente secas.

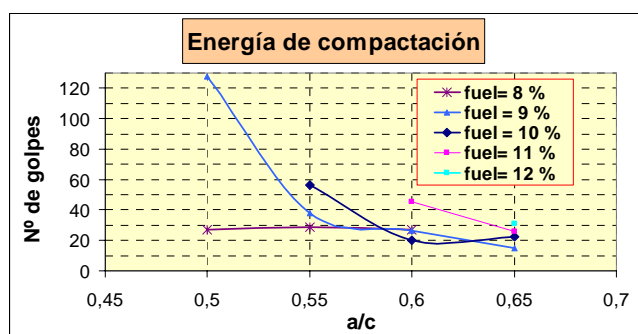


Figura 8.11. Influencia del contenido en fuel y la relación a/c en la energía de compactación

La Figura 8.11 presenta la influencia del porcentaje de fuel y de la relación a/c en la necesidad de energía de compactación. Es de destacar que no parece que el fuel por sí mismo sea el causante de las variaciones en la consistencia. Se conoce perfectamente que la reducción de a/c exige mayores niveles de energía (o mayores dosis de aditivo), pero la influencia del fuel se liga más a su forma de entrar en la mezcla a través de un material pulverulento, con una gran demanda del agua libre de amasado.

La gráfica de la figura debe entenderse en los términos comentados, ya que el parámetro “cantidad de aditivo” es fundamental y se ha variado en cada dosificación tipo. No obstante, es perfectamente asumible el tipo de curvas obtenido, y de hecho resulta de mucha utilidad a la hora de limitar algunos pares (a/c, %fuel) inviables desde el punto de vista de la fabricación.

8.3.5. Ensayos de hielo deshielo

Se han realizado ensayos de hielo-deshielo siguiendo la UNE 67028 sobre un grupo de probetas, tanto de mortero con fuel como de mortero de referencia sin él. Este ensayo consiste en la aplicación de un total de 20 ciclos de dos partes, una de hielo y otra de deshielo, la primera con una duración de 18 horas y una temperatura de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, y la segunda de una duración de 6 horas a una temperatura de $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tras estos ciclos se procede a determinar la resistencia a compresión a 28 días de las probetas, que en general desciende.

Las probetas que no contenían fuel sufrieron una destrucción total tras los 20 ciclos de hielo-deshielo, por lo que fue imposible determinar la resistencia tras los ciclos de helada (Figura 8.12). Sin embargo, los morteros con fuel presentan una buena resistencia a compresión tras someterlos a los ciclos de hielo-deshielo, y además sin apenas pérdida de resistencia (0)



Figura 8.12. *Estado de probetas tras 20 ciclos hielo-deshielo. Izquierda, mortero de referencia sin fuel. Derecha, probeta con un 9 % de fuel*

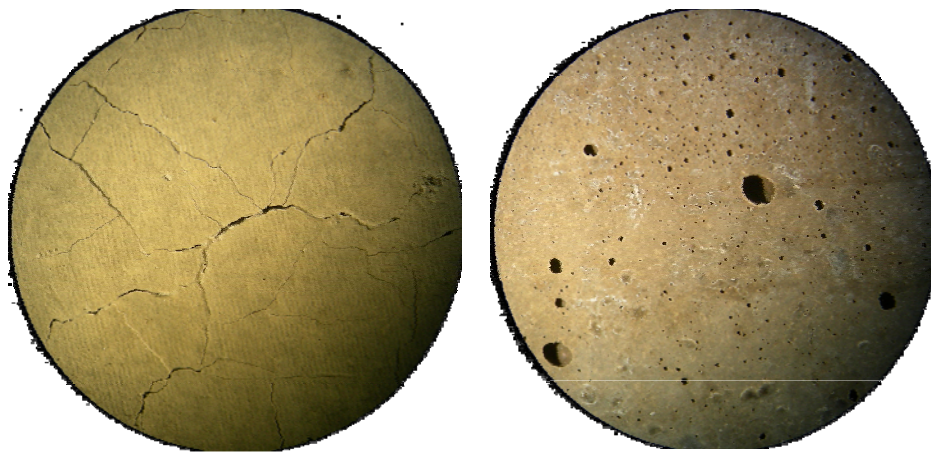


Figura 8.13. Superficie de las probetas tras 20 ciclos hielo-deshielo. Izquierda, mortero de referencia sin fuel. Derecha, probeta con un 9 % de fuel

Tabla 8.7. Resultados de los ensayos de hielo deshielo

Nomenclatura	a/c	Fuel (%)	Resistencia media a compresión a 28 días (MPa)	Resistencia media a compresión a 28 días tras ciclos hielo deshielo (MPa)
D55-0	0,55	0	40,73	Probeta destruida
D55-9	0,55	9	34,4	33,2
D55-10	0,55	10	34,03	33,51
D50-0	0,50	0	45,63	Probeta destruida
D50-8	0,50	8	39,18	37,08

A la vista de los resultados se puede concluir que el fuel aporta al mortero una gran resistencia a la helada, argumento que no sólo se apoya en los excepcionales resultados de los ensayos hielo-deshielo sino también en los del coeficiente de absorción. Este coeficiente se utiliza como medida de la durabilidad frente a heladas de un mortero, aunque en este caso el mortero con fuel resiste muy bien la helada a pesar de que tiene un coeficiente de absorción mayor que otro sin fuel, que sin embargo no supera el ensayo hielo-deshielo.

La mayor durabilidad que presentan las probetas con fuel es debida con toda probabilidad a dos factores: la mayor deformabilidad de estos morteros y sus características químicas.

8.3.6. Ensayos de desgaste

Tras conocer los buenos resultados de los ensayos hielo-deshielo se plantearon expectativas sobre la idoneidad del empleo de morteros con fuel en elementos de pavimentación como baldosas y adoquines. Es por esto que se hace necesaria la determinación de los índices de desgaste. Para la medición de esta propiedad se eligió el método de desgaste por rozamiento siguiendo la EN

1339. En este ensayo se somete una probeta a la acción de un disco abrasivo que la desgasta durante un tiempo dado, y finalmente se obtiene como resultado del ensayo la profundidad de la huella que el disco ha producido en la probeta (Figura 8.14).



Figura 8.14. Probeta empleada en el ensayo de desgaste

Se han desarrollado ensayos sobre varios morteros para determinar la influencia de los parámetros de las dosificaciones en el desgaste (Tabla 8.8). La huella desgastada es similar en todos los morteros y se encuentra situada en el rango de 25-30 mm. Sin embargo, se manifiestan diferencias entre los morteros con y sin fuel, ya que los primeros presentan mayor desgaste que los últimos. Estos resultados eran de esperar dada la menor resistencia mecánica de los morteros con fuel. En el caso de que se llegasen a realizar hormigones o microhormigones que incluyesen fuel el resultado de desgaste es de prever que sería mejor, dado que el árido grueso mejora esta característica.

Tabla 8.8. Ensayos desgaste con disco abrasivo.

Dosificación	a/c	Fuel (%)	Resistencia a tracción a 14 días (MPa)	Resistencia a compresión a 14 días (MPa)	Huella desgaste (mm)
D65-0	0,65	0	8,04	23,17	25,20
D65-8	0,65	8	5,95	20,10	28,70
D65-10	0,65	10	5,64	18,05	29,20
D65-13	0,65	13	5,17	15,70	28,00
D60-9	0,6	9	5,53	21,24	30,90
D60-11	0,6	11	5,35	16,60	28,30
D55-9	0,55	9	5,73	21,04	25,60
D55-10	0,55	10	5,38	18,98	26,00
D50-0	0,5	0	9,39	43,65	26,60
D50-8	0,5	8	6,28	26,04	29,30

Estos ensayos han proporcionado un resultado de huella desgastada que permitiría coleccionar una respuesta adecuada del material para trabajar bajo tráfico ligero y en zonas peatonales.

8.3.7. Ensayos de lixiviación

Se han llevado a cabo ensayos de lixiviación siguiendo la DIN 38414. En la Tabla 8.9 y la Tabla 8.10 se pueden ver los resultados de los ensayos realizados sobre el residuo de fuel, la mezcla estabilizada M3 y los morteros D65-9, D65-11, D65-13. Los valores de referencia para la clasificación de residuos (L/S = 10 L /kg) se corresponden con la Directiva europea 1999/31/EC de abril de 1999 sobre vertederos y la Decisión del Consejo 2003/33/CE del 19 de Diciembre de 2002, criterios de estabilización y procesos para la aceptación de residuos en vertederos.

A la vista de los resultados, los morteros alcanzarían la clasificación de inertes si sólo debieran cumplir los límites de lixiviación. Sin embargo, es imposible que se puedan catalogar como inertes ya que la directiva de residuos no admite como inerte ninguna materia que tenga más de 30 g/kg de carbono y los morteros están compuestos por más de un 10% de fuel. Al menos, está garantizado que son residuos no peligrosos, ya que en esta categoría no existe límite al carbono en masa.

Tabla 8.9. Resultados de inorgánicos en los ensayos de lixiviación sobre morteros.

Parámetro	Fuel	Mezcla M3	Mortero			Residuo Inerte (DOCE, 2003)	Residuo no peligroso (DOCE, 2003)
			D65-9	D65-11	D65-13		
As (µg/g)	0,139	0,067	0,012	0,012	0,013	0.5	2
Ba (µg/g)	0,43	2,2	7	6,8	8	20	100
Cd (µg/g)	0,02	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.04	1
Cr (µg/g)	<0.005	0,261	0,164	0,17	0,236	0.5	10
Cu (µg/g)	0,133	0,047	0,039	0,043	0,053	2	50
Hg (µg/g)	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.01	0.2
Mo (µg/g)	0,09	0,134	0,026	0,031	0,033	0.5	10
Ni (µg/g)	0,0386	0,0129	0,0256	0,0294	0,0343	0.4	10
Pb (µg/g)	0,69	0,29	0,02	<0,010	<0,010	0.5	10
Sb (µg/g)	0,021	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.06	0.7
Se (µg/g)	0,337	0,252	<0.048	0,051	0,058	0.1	0.5
V (µg/g)	0,015	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-	-
Zn (µg/g)	0,12	0,3	<0.01	<0.01	<0.01	4	50
F ⁻ (µg/g)	<25	7,4	<5	<5	<5	10	150
Cl ⁻ (µg/g)	5614,9	2435,8	253,9	309,4	322,3	800	15000
SO ₄ ²⁻ (µg/g)	777,4	35,8	16,8	16	22,4	1000	20000

Tabla 8.10. Resultados de orgánicos en los ensayos de lixiviación sobre morteros. (Véase detalle de resultados en el Anexo B)

Parámetro	Fuel	Mezcla M3	Mortero			Residuo Inerte (DOCE, 2002)
			D65-9	D65-11	D65-13	
H.O.I. (mg/L)	9,45	1,20	2,44	2,18	3,62	500
BTEX (µg/L)	86,68	48,40	2,11	42,00	1,38	6000
HAP (µg/L)	96,33	94,77	91,44	88,82	69,69	–
PCBs (ng/L)	272,87	17,80	500,04	629,63	604,24	10 ⁶
Fenoles (µg/L)	1480,5	1260,3	516,7	595,5	360,0	–

8.3.8. Fabricación de elementos constructivos

El objetivo planteado inicialmente consistía en reciclar el residuo estabilizado mediante su inclusión en algún material de base cementicia. Tras analizar los magníficos resultados de hielo deshielo se planteó la posibilidad de emplear estos morteros con fuel para fabricar elementos de pavimentación como baldosas y adoquines. Este procedimiento de reciclaje cumpliría el objetivo de una manera muy adecuada, pues en una planta de prefabricados sería sencillo implementar la fabricación de elementos que incluyesen el residuo estabilizado como árido.

Para seleccionar el elemento constructivo más adecuado a las propiedades de los morteros se realizó una búsqueda normativa gracias a la cual se estableció que era posible fabricar adoquines con estos morteros (EN 1338). Se tomó como base de ejemplo un tipo de adoquín muy común, de dimensiones 240x120x60 mm. Con este patrón, y empleando un mortero D65-9 se fabricaron varios adoquines de muestra (Figura 8.15).

A la vista de los resultados de los ensayos no se ha conseguido un material de excelentes condiciones, sino uno que tiene unas propiedades aceptables para el uso escogido. Los adoquines que se han fabricado serían perfectamente comercializables como adoquines según un marcado B-F-J (EN 1338).



Figura 8.15. Adoquín fabricado a partir del fuel del Prestige

Ha quedado demostrado que es posible fabricar elementos de pavimentación con una calidad aceptable. Además, aunque el elemento escogido ha sido un adoquín, no está descartado cualquier otro elemento de pavimentación; simplemente se debería ajustar una dosificación de acuerdo a los materiales con los que se fabrique, de forma que se cumplieran las especificaciones del elemento de pavimentación en cuestión. Además, es de esperar que la fabricación de hormigones y microhormigones que incluyan residuo estabilizado como árido resulten con mejores propiedades que las observadas en los morteros. En estas cuestiones se debería profundizar en el caso de plantear esta línea de reciclaje, aunque se consideran alcanzados los objetivos de esta investigación.

8.4. CONCLUSIONES

En este capítulo se ha analizado la posibilidad de reciclar los residuos de fuel del Prestige mediante su inclusión en materiales de base cementicia. Previamente, se estableció la necesidad de realizar una estabilización de los residuos de fuel, y con este residuo estabilizado se logró producir morteros. Una vez establecida la viabilidad, se decidió someter a tales morteros a diversos ensayos con el objetivo de determinar sus propiedades, y poder así dilucidar si estos morteros eran aceptables para su uso como algún tipo de material de construcción. Fruto de esta línea de investigación se han alcanzado una serie de conclusiones:

- La estabilización permite separar las diferentes fracciones del residuo de fuel. Con la fracción fina se ha demostrado que es posible fabricar mortero de cemento.
- La mezcla estabilizada más adecuada para la fabricación de mortero es la de 30 % de fuel, 35% de cal viva y 35 % de serrines de granito.
- Se ha conseguido fabricar morteros con un alto porcentaje de fuel, en torno al 10%, lo que supone que entre el 20 y el 40% de la masa del mortero es mezcla estabilizada.
- La presencia de fuel en el mortero conduce a resistencias a compresión inferiores que las de morteros sin fuel. Pese a todo, las resistencias a compresión son buenas, cercanas a 25 MPa a 28 días de edad. Además, las resistencias a tracción son elevadas en relación con las esperables en un mortero convencional.
- La evolución resistente de los morteros con fuel es normal y algunas probetas a varios años indican que esta resistencia se mantiene.
- Es posible emplear maquinaria convencional en todo el proceso de estabilización y fabricación de mortero.
- Se ha detectado que hay una influencia del porcentaje de fuel incluido en las distintas propiedades observadas. Esta variación depende, más que de la naturaleza del propio fuel, de su forma de entrar en la dosificación, ya que lo hace a través de una mezcla estabilizada pulve-

rulenta. La variación de las propiedades se justifica entonces por la adición de finos más que por la composición.

- El fuel aporta a los morteros una gran resistencia a la helada, y esto se puede afirmar apoyándose tanto en los resultados excepcionales de los ensayos hielo-deshielo como en los del coeficiente de absorción.
- En los ensayos de lixiviación, los morteros reciben una clasificación de residuos no peligrosos, aunque sólo queda separado del tipo de residuo inerte por su alto contenido en carbono (inherente al tipo de material estudiado).

De este modo, se plantearon expectativas sobre la fabricación de elementos prefabricados de pavimentación destinados a soportar tráficos ligeros o peatonales. Concretamente se han fabricado adoquines con mortero que incluía fuel, los cuales además, cumplirían con los requisitos legales para ser comercializados.

Esta línea de investigación podría continuar en la fabricación de hormigones, aunque este desarrollo debería estar ligado a una aplicación concreta de estos materiales. Es decir, ha quedado demostrado que sería posible fabricar un material de base cementicia pero, dependiendo de las exigencias del material concreto que se quiera fabricar (adoquines, baldosas, rigolas, bloques, etc.) se deberían obtener las dosificaciones de hormigones o micro-hormigones necesarias para cumplir los requerimientos concretos de cada caso.

Capítulo 9. Conclusiones y futuras líneas de investigación

9.1. CONCLUSIONES GENERALES

La investigación expuesta en esta tesis tiene por objetivo principal encontrar soluciones para el tratamiento de los residuos del Prestige, que eran una mezcla de fuel, agua, arena, piedras, materia vegetal, plásticos, etc. Este residuo tenía una textura líquido-viscosa, razón por la cual no podía ser depositado directamente en vertedero (Directiva 1999/31). Por tanto, era necesario aplicar algún tratamiento previo a su almacenamiento definitivo.

El tipo de residuo recogido tras el accidente del Prestige no es nuevo ni poco frecuente, aunque en este caso concreto la presencia de espurios en el residuo es mayor que en otros vertidos. Además, el tipo de hidrocarburo también es muy frecuente, ya que el fuel es el carburante de todos los grandes barcos. Es por esto que existen vertidos de fuel no sólo originados por petroleros cargados con fuel sino también por los buques de mercancía general.

La investigación desarrollada en el presente documento se centra en el tratamiento de los residuos del Prestige, pero el ámbito de aplicación de los resultados obtenidos es más general que este único caso concreto, ya que año tras año suceden accidentes marítimos con vertidos similares, aunque a diferente escala. Por tanto esta investigación representa una herramienta útil para ofrecer una solución a la gestión de los residuos líquidos recuperados en la costa en un gran número de incidentes marítimos sucedidos en todo el mundo.

Dada la naturaleza líquida del residuo no es posible un depósito directo en vertedero, además tampoco es sencilla la separación de fracciones dada la gran presencia de elementos espurios como arena, plásticos, algas, rocas, etc. En otros casos, como en el fuel recogido en el mar, es sencillo separar el fuel del agua, incluso si el residuo se compusiese de arena, agua y fuel también sería razonable la separación de las fracciones. Por esta razón, dada la composición del residuo lo más adecuado era plantear un tratamiento de estabilización/solidificación, el cual está dentro de los posibles tratamientos para este tipo de residuo (IPIECA, 2004).

El primer paso en la investigación de la estabilización de los residuos del Prestige lo realizó la propia empresa gestora de los residuos (SOGARISA), la cual estableció que la solidificación más adecuada era la realizada con cal viva. Tomando esta experiencia inicial como punto de partida se planteó la primera línea de investigación, que pasaba por establecer las proporciones adecuadas de residuo de fuel y agentes estabilizantes que consiguieran una correcta solidificación del residuo. Sin embargo, se fue un paso más allá, ya que se incluyó en el proceso de estabilización un agente más, el serrín de granito, un residuo proveniente del corte de piedra ornamental. Este segundo residuo demostró ser de gran utilidad en el proceso de estabilización, ya que para una proporción fuel/estabilizante dada se conseguían efectos iguales empleando únicamente cal viva que utilizando una mezcla de serrín de granito y cal viva.

La utilización del serrín de granito en la estabilización representa un avance importante de esta investigación, puesto que se ha conseguido sustituir la mitad de la cal viva por un material residual que tiene un coste mucho menor. Concretamente una estabilización de un 30% de residuo de fuel, realizada con un 35 % de serrín de granito y un 35 % de cal viva presentaba una textura sólida muy adecuada y similar a la de una estabilización con 30 % de residuo de fuel y 70 % de cal viva.

El efecto positivo del serrín de granito en la estabilización se debe a que dispersa el fuel generando “partículas” del mismo rodeadas por una costra de fuel mezclado con serrín de granito que bloquea la adhesividad del fuel, separando las partículas. La cal también contribuye a este fenómeno, aunque su acción principal es la hidratación que consigue eliminar agua, tanto por combinación como por evaporación. Además, la portlandita formada tras esta reacción aporta resistencia a las partículas de fuel.

Tras el proceso de estabilización el fuel pierde su adhesividad, razón por la cual es posible separar los elementos espurios de tamaño superior a 4 mm tales como plásticos, piedras, etc. Esto abre la puerta a una gestión separada de dos fracciones del residuo estabilizado, por un lado el fuel propiamente estabilizado y, por otro, los elementos espurios.

En cuanto se demostró posible y práctica la estabilización/solidificación del residuo de fuel se planteó una segunda línea de trabajo que tenía por objetivo el desarrollo de una solución completa para el depósito en vertedero de los residuos estabilizados. Esta vía pasaba por la necesidad de conocer el comportamiento resistente del material, de forma que el almacenamiento fuese seguro. Pero también era preciso determinar la lixiviación del residuo estabilizado para garantizar la seguridad ambiental del vertedero.

Para conocer la respuesta estructural de un posible vertedero de residuo estabilizado se desarrolló una caracterización geotécnica completa, aunque no convencional, dado que el resi-

duo estabilizado era hidrófobo, razón por la cual muchos ensayos se tuvieron que adaptar para este material tan peculiar.

Los resultados de la caracterización geotécnica señalan que la construcción de un vertedero con los residuos estabilizados sería estructuralmente segura y sencilla. Además de esto, los resultados de lixiviación indican que se trata de un residuo no peligroso según la catalogación legal (DOCE, 2003), lo cual también simplifica las medidas a adoptar en el caso de construir un vertedero para estos residuos estabilizados. En resumen, el residuo tras ser sometido a la estabilización podría depositarse en cualquier vertedero que admita residuos no peligrosos y sin que sean necesarias actuaciones especiales.

El objetivo de gestionar los residuos de fuel del Prestige planteaba una tercera línea de investigación: el reciclaje de estos residuos. Esto se realizó mediante su inclusión en materiales de construcción de base cemento. Al incorporar el residuo estabilizado no se buscaba mejorar las prestaciones de morteros y hormigones, sino que se trataba de proporcionar una vía de reciclaje para este residuo. En el desarrollo de la investigación se fabricó un importante número de morteros que incluían el residuo estabilizado. En ellos se constató que era posible incluir hasta un 12% de fuel, en peso, dentro del mortero. Las resistencias obtenidas en los morteros con residuo eran menores que las de morteros sin fuel, pero suficientes para un gran número de aplicaciones no estructurales. En contraposición, los morteros con residuo estabilizado presentaron una mejor resistencia a la helada, por esta razón se ha considerado la posibilidad de utilizar estos morteros en elementos de pavimentación. A modo de demostración se fabricaron adoquines de mortero con residuo, los cuales cumplían todos los requisitos técnicos para ser comercializados (EN 1338, 2004).

Adicionalmente, se realizaron ensayos de lixiviación sobre los morteros con residuo, pese a no ser obligatorios ya que se trata de materiales de construcción. Según estos ensayos los morteros recibirían una clasificación de residuo inerte atendiendo únicamente a la lixiviación (DOCE, 2003), pero la catalogación de inerte incluye más condiciones y el mortero incumpliría la limitación del 5 % en peso de materia orgánica. Según esto, para poder ser depositado en un vertedero recibiría una catalogación de residuo no peligroso. Esta situación es común a muchos materiales de construcción, sirvan de ejemplo las mezclas asfálticas empleadas en las carreteras, que obtendrían la misma catalogación.

Esta investigación sobre inclusión de fuel en morteros contribuye al conocimiento del efecto de los residuos en materiales de base cemento, concretamente en los residuos de tipo orgánico, de los cuales existe una limitada experiencia previa. De este modo, esta última línea de investigación además de aportar una solución para reciclar los residuos del Prestige, representa una contribución en el campo de la inclusión de residuos dentro de morteros y hormigones.

9.2. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

Tras la presentación de las conclusiones generales es preciso exponer unas conclusiones específicas para cada una de las tres líneas de investigación desarrolladas, la estabilización/solidificación del residuo, su almacenamiento definitivo en vertedero y su reciclaje mediante inclusión en materiales de construcción en base cemento.

9.2.1. Proceso de estabilización

- En la estabilización de los residuos de fuel del Prestige se tomó como punto de partida las experiencias previas de estabilización con cal viva realizadas por la empresa SOGARISA, encargada de la gestión de los residuos del Prestige. Tomando esta información como base, se ha profundizado en este procedimiento, consiguiendo mejorarlo gracias a la sustitución parcial de la cal viva por serrín de granito. Procediendo de este modo, se mejora el amasado y se abaratan significativamente los costes de estabilización ya que el serrín de granito es un residuo de la producción de piedra ornamental.
- Tras la estabilización del residuo de fuel con cal viva y serrín de granito se obtiene un material sólido, de aspecto similar a la tierra vegetal seca y que, además, presenta un color variable en función del contenido de fuel y estabilizantes, además posee una densidad de partículas del orden de 2kg/l. Es preciso destacar por último una propiedad poco usual, es un material hidrófobo.
- El procedimiento de estabilización permite transformar el residuo de fuel en un material seco, no viscoso y de grano fino. Como consecuencia de este cambio de propiedades el fuel libera las sustancias espurias que contiene, tales como: plásticos, piedras, arena, materia orgánica, etc. Por tanto, aplicando un tamizado tras la estabilización es posible separar las fracciones del residuo, lo cual se ha hecho clasificando ambas fracciones por un tamiz de 4 mm. La fracción gruesa debería ser gestionada, en principio, de acuerdo a principios de gestión de residuos inertes o no peligrosos, aunque esta cuestión se debería definir en una planta piloto de estabilización (Anexo A). Para la fracción fina, que es la mayoritaria se han propuesto dos líneas de gestión: el almacenamiento definitivo en vertedero o su reciclaje como árido dentro de morteros de cemento.
- Se ha establecido que la proporción de estabilización más adecuada es la de 30 % de residuo de fuel, 35 % de cal viva y 35 % serrín de granito. Con estas proporciones se obtiene un residuo de textura pulverulenta que puede ser fácilmente manipulado, si las proporciones de residuo de fuel son superiores (40%-50% de fuel) el material adopta una textura de terrones desmenuzables de unos 10-40 mm.

- Los resultados de una estabilización con serrín de granito y cal viva son iguales a los obtenidos sólo con cal viva. La proporción de 25% de cal y 75 % de serrín genera resultados aceptables, pero la mejor proporción para conformar el agente estabilizante es de cal viva y serrín de granito a partes iguales.
- Es necesario exponer también una consideración importante, las proporciones de estabilización que se han expuesto hasta ahora se obtuvieron empleando una muestra de residuo de fuel puro. Sin embargo, no todo el residuo tiene la misma composición, por lo que se realizaron pruebas con residuo más impuro, compuesto de menos fuel y más sustancias espurias, como rocas, arena, plástico, etc. Con este segundo tipo de residuo se constató que era posible reducir la necesidad de estabilizante, llegando a proporciones de 50% de residuo y 50 % de estabilizante en las que se obtuvo una textura similar a la conseguida con un 30% de residuo más puro y un 70 % de estabilizante.
- Para decidir la proporción más adecuada para un depósito en vertedero se deberá elegir la dosificación más adecuada según la gestión de residuos que se quiera realizar. Si se establece tratar el residuo y luego depositarlo todo junto en vertedero sin clasificación, lo más interesante sería una mezcla basada en el 40 % de fuel con la menor cuantía posible de cal viva. Si se pretende clasificar en fracciones el material, que es la línea de trabajo seguida, lo lógico sería emplear una mezcla que facilitase el tamizado, por ejemplo una basada en el 30 % de fuel que dé como resultado un material pulverulento.

Cabe recordar que no es posible el depósito directo sin tratamiento de los residuos en vertedero ya que la Directiva 1999/31 prohíbe expresamente la admisión en vertedero de residuos líquidos. Por tanto, es necesario tratar los residuos y la estabilización propuesta es uno de los posibles tratamientos a realizar (IPIECA, 2004). A continuación y, a modo de resumen se presentan las ventajas e inconvenientes del tratamiento mediante estabilización:

Ventajas

- La aplicación del tratamiento de estabilización permitiría depositar directamente los residuos en un vertedero.
- El residuo sólido obtenido tras la estabilización puede ser gestionado en instalaciones convencionales y con maquinaria común de movimiento de tierras. Además, el residuo no contamina los medios mecánicos que intervienen en su gestión.
- Es posible separar por tamizado los materiales espurios gruesos como plásticos, rocas, etc. que podrían ser gestionados de manera separativa.

- El residuo estabilizado es un material fácilmente compactable, homogéneo e hidrófobo. Ello facilita su reducción de volumen y además, gracias a la limitada o nula capacidad para formar lixiviados contaminantes no representa un peligro para el medio ambiente.
- Este tratamiento se podría realizar directamente en las balsas provisionales sitas en la costa y además los residuos estabilizados podrían ser trasladados a vertederos locales. Esto eliminaría la necesidad de centralizar los residuos y supondría un importante ahorro en costes de transporte.

Inconvenientes

- El proceso por estabilización implica un importante coste en cal viva y también en procesamiento y transporte de serrín de granito. Adicionalmente habría que considerar el coste del proceso de mezclado.
- Al añadir sustancias estabilizantes se incrementa la masa de residuo en un factor que como máximo es de 3,3 y como mínimo de 2.
- La aplicación del este tratamiento dificulta la aplicación de una línea de reciclaje que implique la recuperación del fuel como combustible. De todos modos, el poder calorífico del fuel permanece, por lo que podría ser quemado aunque produciría un importante volumen de cenizas.

El proceso de estabilización propuesto es una buena solución para el tratamiento de los residuos de fuel del Prestige ya que en lugar de gestionar un residuo líquido-viscoso que no puede ser depositado en vertedero, se opera con un residuo sólido que sí puede ir a vertedero. El siguiente paso en la investigación sobre la estabilización de estos residuos sería la construcción de una planta piloto de tratamiento en la que se pudiesen ajustar la estabilización desarrollada a los procesos industriales, una propuesta sobre este tipo de instalación se recoge en el Anexo A.

Una vez realizado el tratamiento de estabilización quedaría por definir la capacidad del residuo para formar un vertedero seguro y, también, estudiar las posibilidades de reciclaje de las fracciones del residuo estabilizado. En la presente tesis se han considerado dos vías de investigación, por un lado el depósito definitivo y seguro en vertedero y, por otro, el reciclaje mediante inclusión en morteros de cemento.

9.2.2. Almacenamiento definitivo

- Todas las muestras tienen un comportamiento análogo, por lo que ha quedado demostrado que es igual de eficaz la estabilización con cal, que la realizada con cal y serrín de granito. Esto representa un avance muy importante ya que el serrín es mucho más económico que la cal viva.

- El residuo estabilizado es hidrófobo. Razón por la cual las propiedades geotécnicas del residuo estabilizado han tenido que ser medidas en seco. Las conclusiones extraídas de esta caracterización son que el residuo estabilizado es similar a un suelo granular común, con una resistencia al corte convencional y una consolidación rápida. Por tanto, desde una perspectiva geotécnica, es posible construir de manera segura, rellenos y terraplenes sin la necesidad de consideraciones especiales. Cabe destacar también que se ha sometido al residuo a condiciones de alta presión y también de alta temperatura sin que se observase refluidificación del fuel.
- En cuanto a las propiedades de compactación, la hidrofobia del residuo resulta contraproducente, ya que no se puede humedecer el material, pero por otro lado el residuo se compacta rápidamente. Una vez compactado, el material ha demostrado tener suficiente capacidad portante para soportar cargas.
- Los ensayos de lixiviación son los que más limitan los usos del residuo estabilizado ya que lo clasifican como no peligroso. Esta catalogación no descartaría la posibilidad de empleo en rellenos genéricos, sin embargo, la aceptabilidad que pudiera tener por parte de cualquier administración se podría ver afectada por la clasificación obtenida.
- En resumen, el residuo una vez estabilizado tiene buenas características geotécnicas y, atendiendo a la lixiviación, se clasificaría como residuo no peligroso según la legislación de vertederos.

9.2.3. Reciclaje mediante fabricación de materiales de base cemento

Se planteó el reciclaje del residuo estabilizado incluyéndolo en materiales de base cemento. Esta vía de reciclaje nunca se había probado, sin embargo existen algunas experiencias importantes de inclusión de residuos en hormigones, aunque sobre todo de residuos inorgánicos. En el desarrollo de la investigación ha quedado demostrado que es posible fabricar morteros que incluyen el residuo estabilizado como árido.

Una vez establecido que era posible la fabricación de estos morteros, se decidió determinar sus propiedades sometiéndolos a diversos ensayos que permitiesen de dilucidar si estos morteros eran aceptables para elementos prefabricados. Fruto de esta línea de investigación se han alcanzado una serie de conclusiones:

- La estabilización permite separar las diferentes fracciones del residuo de fuel. Con la fracción fina se ha demostrado que es posible fabricar mortero de cemento.
- La mezcla estabilizada más adecuada para la fabricación de mortero es la de 30 % de fuel, 35% de cal viva y 35 % de serrines de granito. Con una dosificación más rica en fuel, el residuo presenta un tamaño de grano más grueso y no es adecuado para fabricar morteros.

- Se ha conseguido fabricar morteros con un alto porcentaje de fuel, en torno al 10%, lo que supone que entre el 20 y el 40% de la masa del mortero es mezcla estabilizada. Todos los morteros que contienen fuel tienen una resistencia menor que aquellos que no lo incluyen.
- La presencia de fuel en el mortero conduce a resistencias a compresión inferiores que las de morteros sin fuel. Pese a todo, las resistencias a compresión son buenas, cercanas a 25 MPa a 28 días de edad. Además, las resistencias a tracción son elevadas en relación con las esperables en un mortero convencional.
- La evolución resistente de los morteros con fuel es normal y algunas probetas a varios años indican que esta resistencia se mantiene.
- Se ha detectado que hay una influencia del porcentaje de fuel incluido en las distintas propiedades observadas. Pero esta variación depende, más que de la naturaleza del propio fuel, de su forma de entrar en la dosificación, ya que lo hace a través de una mezcla estabilizada pulverulenta. La variación de las propiedades se justifica entonces por la adición de finos más que por la composición.
- El fuel aporta a los morteros una gran resistencia a la helada, y esto se puede afirmar apoyándose tanto en los resultados excepcionales de los ensayos hielo-deshielo como en los del coeficiente de absorción.
- En los ensayos de lixiviación, los morteros reciben una clasificación de residuos no peligrosos, aunque sólo incumple la clasificación de residuo tipo inerte por su alto contenido en carbono (inherente al tipo de material estudiado). Ha quedado establecido que la lixiviación es muy baja en todos los casos.
- Ha quedado demostrado que es posible fabricar mortero a partir del fuel del Prestige, aunque sería deseable estudiar con más plazo su durabilidad. Además, es posible emplear maquinaria convencional en todo el proceso.

De este modo y a la vista de los resultados parecía factible la fabricación de elementos prefabricados de algún tipo. Dentro de los posibles elementos prefabricados los más adecuados serían piezas de pavimentación para tráfico ligero. Al fabricar estas piezas se aprovecharía la ventaja competitiva de buena resistencia a la helada que poseen los morteros con fuel. En esta línea se ha conseguido fabricar adoquines con mortero que incluía fuel, los cuales además, cumplirían con los requisitos legales para ser comercializados.

Esta línea de investigación podría continuar en la fabricación de hormigones, sin embargo, este desarrollo debería estar ligado a una aplicación concreta de estos materiales. Es decir, ha quedado demostrado que sería posible fabricar un material de base cementosa pero, dependiendo de las exigencias del material concreto que se quiera fabricar, adoquines, baldosas, rigolas,

bloques, etc. se deberían obtener las dosificaciones de hormigones o micro-hormigones necesarias para cumplir los requerimientos concretos de cada caso.

9.3. TRATAMIENTO REALIZADO SOBRE LOS RESIDUOS DEL PRESTIGE POR LA EMPRESA GESTORA

La empresa encargada de los trabajos de tratamiento de los residuos de fuel del Prestige fue SOGARISA (Sociedad Gallega de Residuos Industriales de Galicia, S.A.). Esta empresa de capital mixto público-privado se enfrentaba a un reto importante, dada la mezcla de elementos diferentes que componían el residuo.

Los técnicos de la empresa consideraban dos posibles líneas de tratamiento:

- Estabilización: la propia empresa había realizado pequeñas experiencias satisfactorias sobre el residuo y colaboraba en este sentido con el grupo de investigación en el que se enmarca la presente tesis, conociendo todos los resultados antes incluso de su publicación.
- Separación de las fracciones del fuel y reciclaje de aquellas que fuese posible. En este sentido existía una pequeña experiencia en el tratamiento de arenas contaminadas con fuel del Erika, además la empresa tenía alguna experiencia en técnicas de lavado de suelos.

La empresa gestora planteó como primera opción la estabilización de todo el residuo para luego depositarlo en los vertederos de los que dispone. Este procedimiento parecía el más aconsejable pero se optó por la solución de reciclar los residuos. Esta decisión se enmarca en un contexto muy mediatizado y politizado en el cual los criterios técnico-económicos no fueron, necesariamente, la guía. De este modo se adoptó la decisión de separar y reciclar las distintas fracciones del residuo de fuel, para lo cual fue necesario proyectar, construir y poner en marcha unas instalaciones pioneras en el mundo, lo cual representa un hito investigador de esta empresa. Además, tuvieron la prudencia de diseñar las instalaciones de modo que una parte se pudiese convertir en una planta móvil de tratamiento de suelos industriales, que también sería posible utilizar en un accidente similar al del Prestige.

La presente investigación no se ha utilizado por tanto para ejecutar el tratamiento de los residuos del Prestige, sin embargo, sí será útil para otros accidentes similares. De todos modos, esta tesis aporta una solución para el depósito seguro en vertedero de residuos de fuel, solución que es más competitiva que el reciclado en muchos casos y sobre todo en los de vertidos de pequeña cuantía.

9.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La investigación desarrollada es muy amplia abarcando varios campos muy distintos, la estabilización/solidificación de residuos de fuel, la caracterización geotécnica de los residuos estabili-

zados para su depósito seguro en vertedero y por último, el reciclado del residuo estabilizado incluyéndolo como árido para morteros y hormigones. En el transcurso de la investigación se ha profundizado en todos los frentes mencionados, sin embargo sería posible ir más allá en estas líneas.

En lo que respecta a la estabilización de los residuos el siguiente paso a realizar sería una prueba piloto con una cantidad mayor de residuo de fuel. Gracias a esta prueba se obtendrían datos sobre tipos de maquinaria, logística, recursos necesarios, etc. que podrían ser directamente extrapolables a la escala industrial. En el anexo A del documento se presenta una propuesta para desarrollar esta línea de investigación, la cual en todo caso debería estar vinculada a una aplicación real del proceso de estabilización.

La caracterización geotécnica realizada sobre el residuo estabilizado permite concluir que es posible un depósito seguro en vertedero. Sin embargo, se podría profundizar en algunas cuestiones. Concretamente:

- Los ensayos de consolidación se realizaron a temperatura ambiente. Además, se constató que aplicando una alta temperatura no se producía refluidificación. Sería interesante comprobar que la combinación de presión y temperatura simultáneas no produciría problemas.
- Los ensayos geotécnicos tuvieron que ser realizados en seco dada la hidrofobia del residuo estabilizado. Sería interesante comprobar a que presión de agua se bloquean las propiedades hidrófobas del material.

En la línea de investigación que trata el reciclaje del residuo estabilizado mediante inclusión como árido de morteros y hormigones se podría profundizar en muchos aspectos diferentes. Sin embargo, lo que más destaca es lo siguiente:

- El desarrollo de esta línea de investigación debería pasar en algún momento por la fabricación de productos prefabricados para lo cual sería necesario contar con la colaboración de alguna empresa interesada. Además, como la inclusión de residuo estabilizado produce morteros de peores resistencias, la susodicha empresa debería contar con incentivos de algún tipo para poder rentabilizar el proceso.

Sería útil realizar un estudio económico de las líneas de actuación propuestas, para así poder comparar de forma directa los costes de las distintas vías. Esto sería una herramienta muy útil para la evaluación de las opciones de gestión en futuras situaciones similares. Cabe destacar que este estudio de costes está directamente vinculado a la escala del vertido, ya que a pequeña escala la estabilización es más competitiva que cualquier técnica que implique la construcción de instalaciones.

Los planes de contingencia para vertidos accidentales deberían tener muy en cuenta en sus procedimientos la gestión de los residuos generados. De este modo se podría evitar o limitar el impacto ambiental y económico de la gestión de una cantidad importante de residuos tóxicos. En este sentido sería interesante desarrollar una investigación sobre la mejora de dichos planes desde la perspectiva de la gestión de residuos, podría servir como punto de partida lo apuntado en el apartado 3.5 y las referencias empleadas en dicho apartado.

Lo expuesto hasta ahora implicaría profundizar más en las líneas ya desarrolladas, sin embargo también sería interesante ampliar la investigación a otros tipos de residuo. Tendría gran utilidad el estudio de técnicas de estabilización sobre otros residuos de catástrofes marítimas, siendo lo más importante la caracterización de residuos de crudo. Cabe destacar en este caso que el petróleo tras un breve periodo de tiempo en el agua, sufre importantes transformaciones: evaporación de los componentes ligeros, precipitación de la parte más pesada y emulsión con agua. Finalmente el residuo que se recoge en la costa guarda un gran parecido al residuo de fuel, mucho más de lo que se parecen originalmente el crudo y el fuel pesado entre sí.

No se ha desarrollado ninguna experiencia con petróleo puro ni envejecido en el mar. Pero es de esperar que los resultados de esta investigación sean razonablemente extrapolables al petróleo, pues, al fin y al cabo, la naturaleza del residuo es la misma.

Otros residuos de gran interés serían los de tipo orgánico con carácter tóxico o muy tóxico, los cuales tras una estabilización y posterior inclusión en morteros y hormigones quedarían completamente aislados y con su capacidad contaminante reducida al mínimo. Los buenos resultados de lixiviación obtenidos indican que esta línea de investigación podría dar unos frutos interesantes.

Bibliografía

REFERENCIAS

- Agüero, A.; Marcos, M.J.; de Pablos, J.L. (2003). *Investigaciones realizadas para el tratamiento de manchas superficiales de fuel con sepiolita*. 15 pp. Informe Ciemat; Enero 2003
- Alarcon-Ruiz L., Platret, G., Massieub, E., Ehrlacher A. (2005) *The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste*. Cement and Concrete research, n. 35, pp. 609-613.
- AMSA. (2008) *National Plan to Combat Pollution of the Sea by Oil and other Noxious and Hazardous Substances*. Australian Maritime Security Authority.
- Barrientos, V. (2007). *Caracterización Geotécnica de los Serrines de Granito y Algunas Aplicaciones en Ingeniería Civil*. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña
- Bilal, H.; Ahmad, R.; Mutassem, E. (2003). *Effect of used engine oil on properties of fresh and hardened concrete*. Construction and Building Materials, 17, pp 311-318.
- BMT Cordah. (2002). *Use of oily drilling wastes in civil engineering applications*. Report BMT Cordah Ltd/COR.027
- Borras, G. (2008). *Mareas negras*. Centro Tecnológico del Mar - Fundación CETMAR http://www.cetmar.org/documentacion/mareas_negras.htm
- Carro, D.; Delgado, J.; Vázquez, A.; Barrientos, V.; Juncosa, R. (2005). *Final Disposal of the Wastes Associated to the Oil Spill of the Tanker Prestige through its Stabilization with Quicklime and Granite Fines*. 25 pp. Congreso INCEED 2005
- Carro, D.; Delgado, J.; Vazquez, A.; Barrientos, V.; Juncosa, R.; (2008) *Final disposal of the wastes associated with the oil spill of the tanker prestige through its stabilization with quicklime and granite fines*. Soil & Sediment Contamination, Volumen: 17, n: 4, pp: 393-410.
- Carro, D.; Fonteboa, B. G.; Martínez, I.; Vázquez, C.; Martínez, F.; Barrientos, V.; Vázquez, A.; Juncosa, R.; Delgado, J.; Pardo, P.; Barra, M.; Vázquez E. (2005) *Fabricación de mortero y hormigón a partir del reciclaje del fuel del prestige*. 12pp. Congreso ACHE 2005
- Carro, D.; Martínez-Abella F.; Pardo P.; Vázquez, E.; Fonteboa. B.G. (2005) *Recycling of wastes associated with the Prestige oil spill through incorporation into cement-based mixtures*. 18 pp. Congreso INCEED 2005

- CCA. (2002) *Hundimiento del buque Prestige. Informe nº 1-7*. Comité científico asesor hundimiento del Prestige. <http://otvm.uvigo.es/referencias/index.jsp>
- CCA. (2003) *Informe sobre neutralización del pecio*. Comité científico asesor hundimiento del Prestige. <http://otvm.uvigo.es/referencias/index.jsp>
- CEDRE. (2004). *Bulletin d'information du Cedre. Spécial accident du Prestige*. Nº 19 Mayo de 2004. 24 pp. Centre de documentation de recherche et d'experimentations sur les pollutions accidentelles des eaux.
- CEDRE. (2008). *Histórico de accidentes catalogados en el Cedre*. www.cedre.fr/accidents/ (en francés)
- CERCLA (1986) *Comprehensive Environmental Response, Compensation & Liability Act* www.epa.gov
- CETMAR. (2008). *Histórico de mareas negras*. http://www.cetmar.org/documentacion/mareas_negras_catastrofes.htm
- CSIC. (2002). *Informe técnico CSIC Prestige Nº 1. Caracterización del vertido y evolución preliminar en el medio*. Centro Superior de Investigaciones Científicas. <http://csicprestige.iim.csic.es/Informes.htm>
- CSIC. (2002a). *Búsqueda bibliográfica sobre "Vertidos de petróleo" en la base de datos internacional Science Citation Index (SCI)*. 2 pp. Informe Técnico CSIC-Prestige Nº 6 (26/12/2002)
- DIN 38414. (1984) *German standard methods for the examination of water, waste water and sludge; sludge and sediments (group S); determination of leachability by water (S 4)*. Deutsches Institut Fur Normung E.V.
- Directiva 1999/31 (1999) *Directiva 99/31/CE del Consejo de 26 de abril 1999 relativa al vertido de residuos*. Diario Oficial Nº 182/L DE 16/07/1999 p. 0001 - 0019
- Directiva 91/156/CEE. (1991). *Directiva 91/156/CEE del Consejo de 18 de marzo de 1991 por la que se modifica la Directiva 75/442/CEE relativa a los residuos peligrosos*. 8 pp. El consejo de las comunidades europeas.
- DOCE. (2003). *Decisión 2003/33/CE del Consejo de 19 de diciembre de 2002 por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE*. Diario Oficial 11/L de 16.1.2003.
- DOCE. (2003). *Decisión del Consejo de 19 de diciembre de 2002, por la que se los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos*. Diario oficial de las comunidades europeas, 16 enero 2003, 23pp.
- EHE. (2008). *Elementos de hormigón estructural*. Ministerio de Fomento. p.476
- El Mundo. (2003). *Catástrofe en Galicia*. Diario el Mundo. <http://www.elmundo.es/especiales/2002/11/ecologia/prestige/>
- El País. (2003). *El fiasco del salvamento del Prestige*. (2003, 14 de Noviembre). Diario El País.

- El País. (2005). *La limpieza del Prestige*. (2005, 18 de septiembre). Diario El País. pp. 32-33
- EMSA. (2004). *Action Plan for oil pollution. Preparedness and Response*. 67 pp. European Maritime Safety Agency
- EPA. (1986). *Handbook for Stabilization/Solidification of Hazardous Wastes*. Hazardous Wastes Engineering Laboratory. EPA.
- EPA. (1993). *Solidification/Stabilization and Its Application to Waste Materials*. Office of Research and Development. EPA/530/R-93/012. www.epa.gov
- EPA. (1994). *National oil and hazardous substances pollution contingency plan. Section 300.310 Phase III—Containment, countermeasures, cleanup, and dis-posal*. www.epa.gov/emergencies/content/lawsregs/ncpover.htm
- EPA. (2000) *Solidification/Stabilization Use at Superfund Sites*. Office of Solid Waste and Emergency Response. EPA. www.epa.gov
- Huijer, K. (2004). *Trends in Oil Spills from Tanker ships 1995-2004*. 14 pp. International tanker owners pollution federation (ITOPF). www.itopf.com
- IECA. (2008). *Fichas de cemento*. Instituto español del cemento y sus aplicaciones. http://www.ieca.es/ficha_cemento.php
- IPIECA. (2000). *A guide to contingency planning for oil spill on water*. 32 pp. IPIECA Report Series Vol. 2
- IPIECA. (2004). *Guidelines for oil spill waste minimization and management*. 24 pp. IPIECA Report Series Vol. 12
- ITOPF. (2007). *Oil Tanker spill Statistics 2007*. International tanker owners pollution federation limited. 8 pp. www.itopf.com
- ITOPF. (2008). *Clean up & Response Disposal of oil and Debris*. www.itopf.com/spill-response/clean-up-and-response/disposal/
- ITOPF. (2008). *Handbook 2008*. 54 pp. International tanker owners pollution federation limited. www.itopf.com
- La Voz de Galicia. (2003). *Reportaje especial del Prestige* (2003, 13 de enero). La Voz de Galicia. www.lavozdegalicia.es/especiales/prestige/
- La Voz de Galicia. (2004). *Álbum de imágenes del Prestige*. http://www.lavozdegalicia.es/especiales/prestige/index_albumes.jsp
- Ministerio de Fomento. (2002). *PG-3 Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*. Orden FOM 1382/02 , de 16 de Mayo, por la que se modifican determinados artículos relativos a la construcción de explanadas, drenajes y cimentaciones.
- Moffatt & Nichol Engineers. (2002). *Estudio de estabilización con cemento de residuos de crudo*. Presentado en la reunión “cement stabilization of contaminated dredged material”.

- Montes, H.J. (2008). *Análisis del accidente del Prestige y propuestas para evitar en el futuro siniestros similares*.
<http://www10.uniovi.es/prestige/informes/Areasseguras/analisis1.htm>
- NRT. (2002). *Selection guide for oil spill applied technologies*. 367 pp. NRT: U.S. National Response Team. www.nrt.org/
- OTVM. (2007). *Ciencia & Prestige. La investigación desarrollada a raíz del accidente del Prestige*. 67 pp. Oficina técnica de vertidos marinos, Universidade de Vigo.
- Puertos del Estado. (2007). *Anuario estadístico. Tráfico portuario 2006*. Ministerio de Fomento
- RD 1481. (2001). *Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*. Boletín Oficial del Estado 25 de 29/1/2002 p. 3507-3521.
- REPSOL. (2004). *Informe de recuperación del fuel del Prestige*. www.repsolypf.com
- Tuncan, M.; Koyuncu, H. (1997). *Stabilization of petroleum contaminated drilling wastes by additives*. Proceedins of the international Offshore and Polar Engineering Conference. vol 1, p 950-953.
- Tuncan, M.; Koyuncu, H. (2000). Use of petroleum-contaminated drilling wastes as sub-base material for road construction. *Waste Management and Research*, vol. 18, n. 5 p 489-505.
- UNE 67028. (1994). Ladrillos. Ensayo de heladicidad. Agencia Española de Normalización
- UNE 83316 (1996) Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión; Agencia Española de Normalización, 5 pp.
- UNE 83820 (1994): Morteros. Métodos de ensayo. Morteros endurecidos. Determinación de la densidad aparente, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 4 pp.
- UNE-EN 103300 (1993) *Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa*; Agencia Española de Normalización, 4 pp.
- UNE-EN 103302 (1994) *Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo*. Agencia Española de Normalización.
- UNE-EN 103401 (1998) *Determinación de los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante en una muestra de suelo en la caja de corte directo*; Agencia Española de Normalización, 34 pp.
- UNE-EN 103405 (1994) *Geotecnia. Ensayo de consolidación unidimensional de un suelo en edómetro*; Agencia Española de Normalización, 10 pp.
- UNE-EN 103500 (1994) *Geotecnia. Ensayo de compactación Próctor normal*; Agencia Española de Normalización, 6 pp.
- UNE-EN 103501 (1994) *Geotecnia. Ensayo de compactación Próctor modificado*; Agencia Española de Normalización, 6 pp.

- UNE-EN 103502. (1995). *Método de ensayo para determinar en laboratorio el índice C.B.R. de un suelo*. Agencia Española de Normalización.
- UNE-EN 12457-2 (2003) *Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 2: Ensayo por lotes de una etapa para una relación líquido-sólido de 10 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 4 mm (con o sin reducción de tamaño)*; Agencia Española de Normalización, 33 pp.
- UNE-EN 12457-2 (2003) *Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 2: Ensayo por lotes de una etapa para una relación líquido-sólido de 10 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 4 mm (con o sin reducción de tamaño)*; Agencia Española de Normalización, 33 pp.
- UNE-EN 1338 (2004) *Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo*. Agencia Española de Normalización, 72 pp.
- UNE-EN 196-1 (1996) *Método de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas*, Agencia Española de Normalización, 31 pp.
- UNE-EN 933-1:1998 *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos del tamizado*.
- Valls, S. (1999) *Estabilización física y química de los lodos de depuradora de aguas residuales y de material de demolición para su utilización en ingeniería civil*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Vázquez, A. (2008) *Modelización geoquímica de los serrines de granito*. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña.
- Vázquez, C. (2000) *Estudio comparativo de las propiedades de adherencia de cordones de pretensado en elementos prefabricados de hormigones de altas prestaciones iniciales*. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña.
- Wauquier J.P. (2004) *El refinado del petróleo*. Editorial Díaz de Santos
- Xunta de Galicia. (2003). *Coordinación do voluntariado no litoral galego. Caso Prestige*; 176 pp. Consellería de Familia, Xuventude, Deporte e Voluntariado.
- Zivica, V. (2005). *Deterioration of cement-based materials due to the action of organic compounds*. Construction and building materials, 20, pp. 634-641.

ENLACES WEB RELEVANTES

Centre de Documentation de Recherche et d'Expérimentations sur les Pollutions Accidentelles des Eaux, CEDRE : <http://www.cedre.fr/>

Centro de Investigaciones Tecnológicas y Medioambientales, CIEMAT – Prestige: <http://www.ciemat.es/sweb/comfos/prestige/>

Comité Científico Asesor para el Desastre del Prestige, CCA : <http://www.ccaprestige.es/>

Consejo Superior de Investigaciones Científicas – Informes Técnicos Prestige:
<http://csicprestige.iim.csic.es/Informes.htm>

Fundación Arao: <http://www.fundacionarao.es/>

Instituto Español de Oceanografía – Prestige:
http://www.ieo.es/prestige/ieo_prestige_intro.html

Internacional Tanker Owners Pollution Federation Limited, ITOPF:
<http://www.itopf.com/>

International Petroleum Industry Environmental Conservation Association,
IPIECA: <http://www.ipieca.org/>

Universidade da Coruña – E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos:
<http://www.udc.es/caminos>

Oil Spill Response Limited, OSRL: <http://www.osrl.org/>

Xunta de Galicia – Consellería de Pesca e Asuntos Marítimos – Prestige:
<http://www.cmm-prestige.cesga.es/>



Anexo A. Propuesta de planta piloto de estabilización

A.1. INTRODUCCIÓN

El siguiente paso de esta investigación requiere la construcción de una planta piloto en la que pueda tratarse el residuo con maquinaria industrial, de este modo se podría establecer exactamente el protocolo de estabilización más adecuado para tratar los residuos del Prestige.

Un grupo de investigadores de la Universidad de A Coruña y de la Universidad Politécnica de Catalunya ha desarrollado un trabajo de investigación con el patrocinio de la Fundación Arao. Bajo el título “*O almacenamento dos residuos de fuel do “Prestige” e a súa reciclaxe como elemento de construción*” el equipo ha centrado sus trabajos en el proceso de estabilización del fuel y, conseguido éste, abre dos líneas posibles de acción con el material estabilizado. La primera incide en su almacenamiento y aborda cuestiones de carácter fundamentalmente geotécnico, mientras que la segunda plantea el reciclaje mediante su incorporación en materiales de base cementosa.

El fuel empleado en los distintos ensayos a lo largo de todos los trabajos fue aportado por SOGARISA, en cuyas instalaciones se acumula la totalidad de los residuos procedentes de las tareas de limpieza llevadas a cabo tras el vertido del Prestige. Además del material, SOGARISA puso a disposición del grupo de trabajo su experiencia previa en el manejo y tratamiento de tales residuos, que incluía diversos procesos de estabilización.

El grupo de trabajo y SOGARISA mantuvieron frecuentes contactos durante el desarrollo de la investigación y la empresa es conocedora de los resultados técnicos que se han obtenido. En la última etapa, las posibilidades que revelaban tales resultados promovieron la petición por parte de SOGARISA de una propuesta de prototipo de planta de gestión de los residuos del Prestige.

Este texto recoge la propuesta hecha a SOGARISA para el desarrollo de la gestión de los residuos de fuel mediante estabilización. Finalmente, las autoridades y la empresa acordaron emplear otro método alternativo de gestión pese a que la estabilización era la primera opción de la empresa.

Se incluye en esta tesis doctoral esta propuesta de planta piloto con el objetivo de que en otra tragedia similar, se puedan valorar la estabilización con un mayor conocimiento desde la perspectiva de proceso industrial.

A.2. PROTOTIPO DE PLANTA DE GESTIÓN

El prototipo de planta de tratamiento de residuos de fuel del Prestige tendría por objetivo obtener datos y experiencias del tratamiento de los residuos de fuel a una escala intermedia entre el laboratorio y la planta de procesado. La planta piloto se ubicaría en las cercanías de las balsas en las que se almacena transitoriamente el fuel, las instalaciones de SOGARISA en As Somozas, provincia de A Coruña.

Este prototipo de planta de gestión toma como partida los ensayos realizados hasta ahora, y pretende resolver la mayor parte de las cuestiones que surgirían en una planta de estabilización real. La escala necesaria del prototipo viene definida por dos parámetros:

- La cantidad de residuo que se considera adecuado emplear. Se propone una cantidad no menor del 1⁰/₀₀ del material almacenado, es decir, unas 70 t de residuo de fuel.
- El tratamiento ha de realizarse con medios automáticos, los cuales deben ser análogos a los que se emplearían a escala real para, de este modo, poder extraer experiencia directa sobre el funcionamiento de la maquinaria en cada proceso.

El prototipo de planta de gestión incluye la estabilización de los residuos para solidificarlos, pero también el almacenamiento definitivo y el reciclaje. Para estudiar el almacenamiento definitivo se propone realizar un pequeño vertedero en el cual se deposite una fracción de los residuos una vez tratados. También se plantea el reciclaje sobre otra parte de los residuos tratados, los cuales serían valorizados como material de construcción.

A.2.1. Diagrama de procesos

Utilizando como base la experiencia de laboratorio se propone un protocolo de gestión de los residuos de fuel. En la Figura A.1 se muestra esta propuesta resumida en forma de diagrama de flujo. Cabe recordar que el residuo que se ha de procesar es una mezcla de fuel, agua, arena, rocas, materia orgánica, plásticos, etc., al que denominaremos “*todo-uno*”, dada su heterogeneidad granulométrica y composicional.

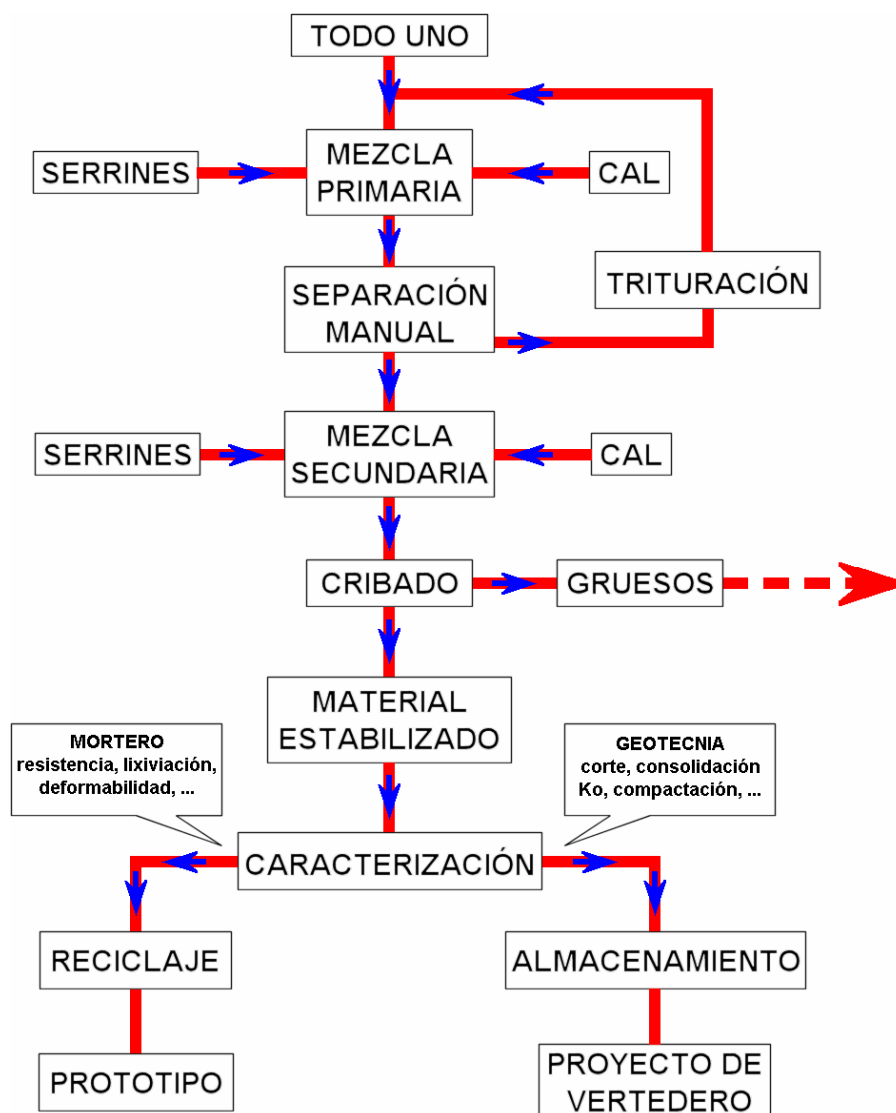


Figura A.1. Diagrama de flujo que resume el proceso de estabilización y las dos vías de gestión del residuo estabilizado.

Este protocolo de gestión se ha demostrado en laboratorio que es viable pero, para ser empleado a escala industrial debería ser ajustado en esta planta piloto. De este modo se podrían optimizar los recursos: economía, tiempo, instalaciones y maquinaria disponible, etc.

A.2.2. Mezcla Primaria o Pre-estabilización

El residuo de fuel que se ha de tratar es un material que tiene una textura de líquido muy viscoso y pegajoso, lo cual dificulta su manipulación. Este proceso de pre-estabilización busca mejorar este aspecto disminuyendo la adhesividad del residuo, que queda, tras ser tratado, con un aspecto y textura análogos a los de una arcilla húmeda.

La mezcla primaria se realiza mediante la adición de pequeñas cantidades de cal viva y serrín de granito, los mismos materiales empleados en la estabilización, pero en cantidades mucho

menores. El orden de introducción de los componentes es el fuel, seguido de la cal y, finalmente, los serrines. Las proporciones para esta preestabilización se determinarán a partir de ensayos en el laboratorio, en los cuales se valorará la variación de la adhesividad del residuo y la mejora en su manipulación.

Este proceso de mezcla primaria no puede realizarse en las balsas de almacenamiento actual, por lo que el residuo debe transportarse a un lugar próximo adecuado para tal mezcla, lo que exige una preparación previa del terreno.

Para la realización de la mezcla primaria se propone crear un depósito de dimensiones aproximadas 10 x 20 x 1 m (~200 m³) cuya misión sería doble:

- Aportar un espacio suficiente para el proceso de mezclado. Sería deseable que estuviese cubierto para así limitar la incorporación de agua de lluvia.
- Tras el proceso de mezcla primaria el depósito debería convertirse en un vertedero experimental para el material estabilizado.

Este depósito debe garantizar su seguridad frente a filtración y lixiviado, por lo que deberá ser construido mediante los métodos y sistemas que se emplearon con éxito en las balsas que contienen actualmente el residuo de fuel. Se debe contemplar además la monitorización del vertedero mediante elementos de medida que informen, con el paso del tiempo, acerca de la bondad de la barrera así creada. Sobre la capa inferior se produciría la mezcla primaria.

Se propone adicionalmente utilizar los serrines de granito como barrera de sellado del vertedero experimental dada su adecuación para tal fin, como ha quedado demostrado en la investigación de Vázquez (2006) y Barrientos (2007).



Figura A.2. Ejemplo de depósito al aire libre en el que se almacenaría el residuo preestabilizado

La cal viva empleada en esta pre-estabilización y en la estabilización principal, deberá ser de gran pureza y finura, para conseguir un desempeño óptimo. Los serrines, procedentes de ex-

plotaciones de corte de granito, se introducirán con su contenido de humedad, aunque ello implique un incremento en las necesidades de cal (Figura A.3).



Figura A.3. *Materiales empleados en el proceso de pre-estabilización y también en el de estabilización. Izq: Cal comercial. Der: Serrines de granito a la salida de los filtros prensa.*

El residuo de fuel deberá contener la menor cantidad posible de agua libre, extraída ésta mediante bombeo o decantación en el proceso de transporte desde las balsas de almacenamiento hasta el depósito de mezclado. La pre-estabilización se realizaría con maquinaria agrícola (Figura A.4) siguiendo los procesos habituales en la mejora de suelos.



Figura A.4. *Ejemplo de maquinaria agrícola que se podría emplear para realizar la pre-estabilización.*

El almacenamiento de la cal viva debe ser observado con detenimiento. Su avidez de agua hace imposible la acumulación a la intemperie, por lo que se plantean dos posibilidades. La primera es la disposición de silos estancos, capaces de garantizar un material en condiciones durante un tiempo prolongado. La segunda es el empleo de material ensacado, que se añadiría a la mezcla primaria mediante tolvas.

A.2.3. Separación Manual de Elementos Gruesos

Tras realizar la pre-estabilización sería necesario extraer los elementos de gran tamaño (mayores que 30 cm) que pudiera contener el residuo. La facilidad de manipulación hace aconsejable extraerlos tras el proceso de mezcla primaria o pre-estabilización. La operación de separación será necesariamente manual con el apoyo de pequeña maquinaria. Estos gruesos podrían contener en su interior restos de residuo de fuel, por lo que deberán ser de nuevo integrados en el proceso de estabilización.

El material grueso separado en esta separación manual se trituraría y volvería a ser dirigido a la mezcla primaria (Figura A.5). El producto resultado se reincorporaría obteniendo un aglomerado semi-estabilizado de sólidos de tamaño pequeño, fuel, cal y serrines.



Figura A.5. *Ejemplo de machacadora que se podría emplear con los gruesos encontrados en la selección manual.*

A.2.4. Mezcla Secundaria o Estabilización

La estabilización tiene por objetivo transformar el residuo de fuel en un material granular no viscoso, lo cual se consigue gracias a la mezcla del residuo con cal viva y serrín de granito. Tras la estabilización, el residuo puede ser clasificado por cribado, quedando por un lado un material pulverulento fruto de la reacción del fuel, la cal y el serrín y, por otro, los materiales espurios que contenía el residuo, tales como plásticos, rocas, etc.

Durante la puesta en marcha de la planta piloto deberían determinarse las cantidades exactas de material estabilizante a emplear. Dada la heterogeneidad en contenido de fuel del residuo, sería recomendable trabajar por lotes de residuos de fuel, sobre los que se realizarían ensayos para establecer la dosificación concreta de cal y serrín de granito. En los trabajos de laboratorio se estableció que una mezcla de un 30% de fuel, un 35 % de cal viva y un 35% de serrín de granito presentaba buenas cualidades, por lo que ésta sería la dosificación de partida.

Para la realización de la estabilización se propone el empleo de sistemas industriales basados en tornillos sinfín (Figura A.6), con una velocidad y longitud de mezcla adecuados alimentados con el residuo de fuel por palas cargadoras y por tolvas que contengan el serrín y la cal.

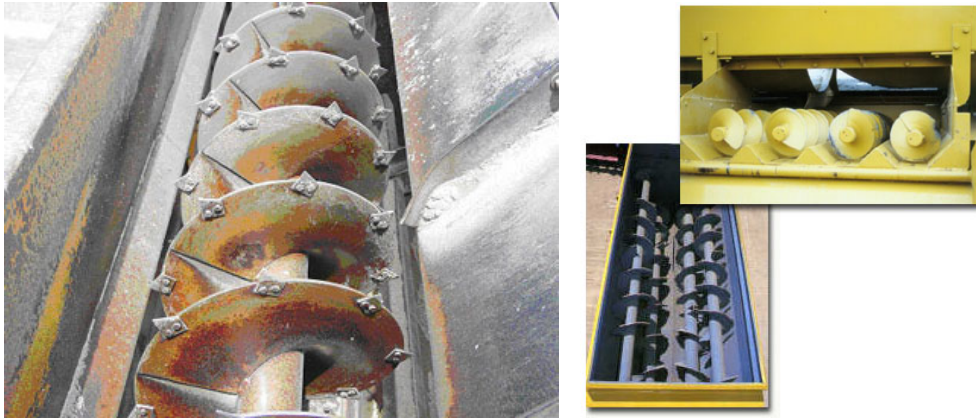


Figura A.6. Ejemplo de tornillos sinfín que podrían ser empleados para la mezcla de los residuos de fuel con la cal y el serrín de granito.

Las experiencias de laboratorio han revelado que, una vez completada totalmente la estabilización, la extracción de sólidos es sencilla y además éstos apenas arrastran fuel.

A.2.5. Cribado y caracterización del material estabilizado

El residuo estabilizado debe reposar un cierto tiempo, del orden de 1 a 3 días, para que la acción química y térmica de la cal se desarrolle completamente. Tras esto, el material estabilizado presentará una textura pulverulenta que incluye en su interior sólidos como roca, plástico, madera, etc., que estarían prácticamente limpios de fuel. A partir de este momento surgen varias opciones de actuación, se puede realizar un almacenamiento definitivo del residuo tal cual está, o también es posible tamizar el material estabilizado (Figura A.7), recuperando los gruesos y gestionándolos separadamente. A partir de aquí sólo se dan propuestas de gestión para la fracción fina del residuo, que podría ser depositada en vertedero definitivo o ser reciclada.

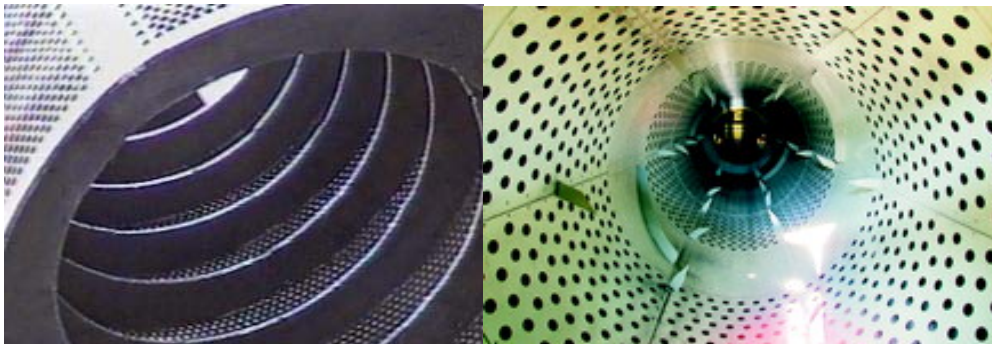


Figura A.7. Ejemplo de trómeles que se podrían emplear para cribar el material estabilizado.

A.2.6. Almacenamiento definitivo y reciclaje

El prototipo pretende situar a escala industrial el proceso de estabilización de los residuos de fuel, tras la estabilización e, independientemente de cómo se haga, se obtendría una gran cantidad de material pulverulento. Con este material estabilizado, a escala laboratorio, se han estudiado dos líneas de gestión, el almacenamiento definitivo y seguro en vertedero, y/o la inclusión de este residuo como material de construcción para morteros y hormigones no estructurales. Ambos procedimientos son técnicamente viables pero, en la planta piloto, deberían estudiarse y valorarse económicamente.

Para llevar a cabo el almacenamiento definitivo en la planta piloto, se realizaría la construcción de un vertedero de dimensiones suficientes para realizar un seguimiento de su comportamiento a corto y medio plazo. El vertedero aprovecharía el depósito ya empleado en las primeras fases del prototipo.

Previamente al almacenamiento en vertedero se debería realizar una caracterización geotécnica de cada lote de residuos estabilizado, incluyendo parámetros como: resistencia al corte, consolidación, compactación, etc. que permitan el diseño final de un vertedero adecuado a sus propiedades: asientos previsibles, taludes estables, etc. (Figura A.8). Cabe destacar que todas las mezclas probadas en laboratorio presentan un buen comportamiento de cara a su depósito definitivo en vertedero.

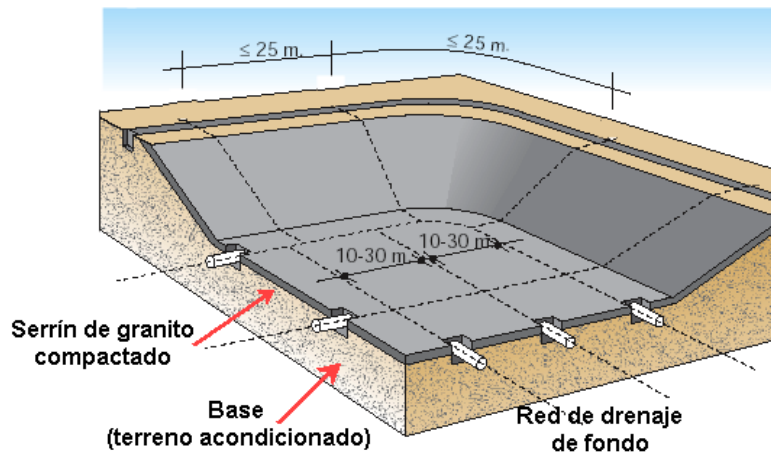


Figura A.8. Ejemplo de prediseño de un vertedero empleando serrines de granito como barrera de impermeabilización. (Vazquez, 2006)

Para llevar a cabo el reciclaje a una escala industrial del residuo estabilizado mediante inclusión en morteros y hormigones sería necesario contar con la colaboración de alguna empresa de materiales de construcción. Se considera especialmente adecuada cualquier empresa que se dedique a elementos prefabricados no estructurales, como baldosas, adoquines, etc. ya que en éstas instalaciones se podría realizar un control directo de las dosificaciones, propiedades, etc.

Para garantizar la adecuación del material estabilizado a este fin se propone realizar en la planta piloto un control sobre morteros realizados con esta mezcla y que consistirían por lo menos en ensayos de evolución de resistencias

A.3. CONCLUSIONES

Después de todas las experiencias de laboratorio se ha demostrado que es técnicamente viable el tratamiento de residuos de fuel mediante estabilización, y que esto permite su almacenamiento seguro o su reciclaje como material de construcción. A partir de este punto, es necesario vincular el proceso desarrollado con la escala de una planta de tratamiento de residuos. Para acometer esta aproximación se propuso la construcción de una planta piloto que aportaría datos y experiencia con los que poder proyectar y construir una planta de tratamiento para todo el conjunto de residuos del Prestige.

La planta piloto debería tratar una cantidad importante de residuos, de manera que los medios mecánicos y técnicos empleados fuesen directamente extrapolables a una planta real.

Para ejecutar esta planta piloto sería preciso contar con un depósito de unos 10x20 m en planta en el cual se realizarían gran parte de las operaciones y que, una vez concluida la estabilización, se convertiría en un vertedero experimental. Se necesitarían asimismo tolvas o silos para contener la cal y el serrín de granito. Los medios mecánicos que se emplearían son habituales en la agricultura y la obra civil por lo que sería sencillo su alquiler temporal. Por tanto, este prototipo, empleando unos medios materiales muy económicos, aportaría información directa para la construcción de una planta de tratamiento de todo el conjunto de residuos.

En esta propuesta de planta piloto, los procesos que se consideran necesarios para la estabilización son: pre-estabilización, separación manual, trituración de gruesos, estabilización y cribado. Esta propuesta de protocolo así desglosada emana de la experiencia de laboratorio. Por esto, una de las funciones más importantes de la planta piloto es corroborar la validez a gran escala de este protocolo. Además esto permitiría seleccionar los medios mecánicos adecuados, ajustar las cantidades de estabilizantes, los tiempos de operación, etc.

Esta propuesta de planta piloto fue desarrollada a petición de SOGARISA, la empresa encargada de gestionar los residuos de fuel del Prestige, ya que este procedimiento estaba considerado entre las opciones más probables de gestión. Sin embargo, las autoridades decidieron emplear un lavado térmico, que ha resultado ser muy costoso y técnicamente complejo. De todos modos, aunque en el caso del Prestige no ha prosperado este método de gestión de los residuos, esta propuesta puede ser valiosa para otros desastres.

Anexo B. Resultados analíticos y de ensayos

B.1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de completar la información expuesta se incluyen en el presente anexo todos los resultados de los ensayos realizados que no han quedado completamente expuestos en el texto. Se exponen siguiendo el orden de desarrollo de los capítulos.

B.2. MEZCLAS DE ESTABILIZACIÓN

Las distintas mezclas realizadas con el residuo puro se detallan en la Tabla B.1

Tabla B.1. *Nomenclatura y composición de las mezclas de residuo puro.*

Nomenclatura de la mezcla	Dosificación (en peso)		
	% Residuo de fuel	% Cal viva	% Serrín de granito
M1	30	70	0
M2	40	60	0
M3	30	17.5	52.5
M4	30	35	35
M5	30	7	63
M6	40	30	30
M7	30	35	35
M8	30	35	35
M9	50	50	0
M10	30	0	70
M11	40	15	45

Adicionalmente se realizó un estudio con residuo impuro para comprobar la viabilidad de la mezcla, se realizó además un ajuste para corregir la presencia de espurios en el residuo. A continuación, en la Tabla B.2 se muestran las diversas pruebas realizadas con el residuo impuro.

Tabla B.2. Mezclas realizadas con residuo impuro. Todas las medidas están expresadas en kg Se incluye el ajuste de los espurios contenidos en el residuo

MEZCLA N°1: 30% CHA - 35%SERRÍN - 35% CAL			MEZCLA N°4: 50% CHA - 25%SERRÍN - 25% CAL		
MEZCLA NETA:	153,72	153,16	MEZCLA NETA:	23,88	23,74
RESIDUO:	18,88	18,74	RESIDUO:	5,8	5,66
TOTAL	172,6	171,9	TOTAL	29,68	29,4
% RESIDUO SOBRE EL TOTAL:		10,90	% RESIDUO SOBRE EL TOTAL:		19,25
kg CHAPAPOTE EN TOTAL:		51,57	kg CHAPAPOTE EN TOTAL:		14,7
kg CHAPAPOTE EN MEZCLA NETA:		32,83	kg CHAPAPOTE EN MEZCLA NETA:		9,04
%residuos sobre kg chapapote inicial		36,34	%residuos sobre kg chapapote inicial		38,50
% residuos sobre kg chap. en mezcla neta		57,08	% residuos sobre kg chap. en mezcla neta		62,61
% CHAPAPOTE EN MEZCLA NETA:	21,44		% CHAPAPOTE EN MEZCLA NETA:	38,08	
MEZCLA N°2: 40% CHA - 30%SERRÍN - 30% CAL			MEZCLA N°3: 45% CHA - 27.5%SERRÍN - 27.5% CAL		
MEZCLA NETA:	87,06	86,78	MEZCLA NETA:	136,32	135,76
RESIDUO:	18,54	18,4	RESIDUO:	39,64	39,5
TOTAL	105,6	105,18	TOTAL	175,96	175,26
% RESIDUO SOBRE EL TOTAL:		17,49	% RESIDUO SOBRE EL TOTAL:		22,54
kg CHAPAPOTE EN TOTAL:		42,072	kg CHAPAPOTE EN TOTAL:		87,63
kg CHAPAPOTE EN MEZCLA NETA:		23,672	kg CHAPAPOTE EN MEZCLA NETA:		48,13
%residuos sobre kg chapapote inicial		43,73	%residuos sobre kg chapapote inicial		45,08
% residuos sobre kg chap. en mezcla neta		77,73	% residuos sobre kg chap. en mezcla neta		82,07
% CHAPAPOTE EN MEZCLA NETA:	27,28		% CHAPAPOTE EN MEZCLA NETA:	35,45	
MEZCLA NETA:	47,96	47,68	MEZCLA NETA:	194,12	193,42
RESIDUO:	11,28	11,14	RESIDUO:	40,1	39,96
TOTAL	59,24	58,82	TOTAL	234,22	233,38
% RESIDUO SOBRE EL TOTAL:		18,94	% RESIDUO SOBRE EL TOTAL:		17,12
kg CHAPAPOTE EN TOTAL:		26,469	kg CHAPAPOTE EN TOTAL:		105,021
kg CHAPAPOTE EN MEZCLA NETA:		15,329	kg CHAPAPOTE EN MEZCLA NETA:		65,061
%residuos sobre kg chapapote inicial		42,09	%residuos sobre kg chapapote inicial		38,05
% residuos sobre kg chap. en mezcla neta		72,67	% residuos sobre kg chap. en mezcla neta		61,42
% CHAPAPOTE EN MEZCLA NETA:	32,15		% CHAPAPOTE EN MEZCLA NETA:	33,64	

Tabla B.3. Resumen de las mezclas realizadas con residuo impuro. Todas las medidas están expresadas en kg Se incluye el ajuste de los espurios contenidos en el residuo

Estabilización de 1T. de residuo de fuel							
% R.F. en mezcla bruta	kg cal (igual que serrín)	kg mezcla bruta	kg residuo	kg mezcla neta	% residuos sobre mezcla bruta	% residuos sobre kg fuel inicial	% R.F. en mezcla neta
30%	1166,67	3333,34	624,67	2708,67	18,74	62,47	21,44%
40%	750	2500	460	2040	18,4	46,00	27,28%
45%	611,11	2222,22	380,5	1841,73	17,12	38,05	33,64%
50%	500	2000	450,56	1549,24	22,54	45,06	35,45%

B.3. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

Sample: M10_aire, 2005/09601
 Size: 25.8354 mg
 Method: 5K/min->1050_C, Aire

TGA-DTA

File: ...at050622_M10_aire_001
 Operator: Alba y María
 Run Date: 22-Jun-05 09:28

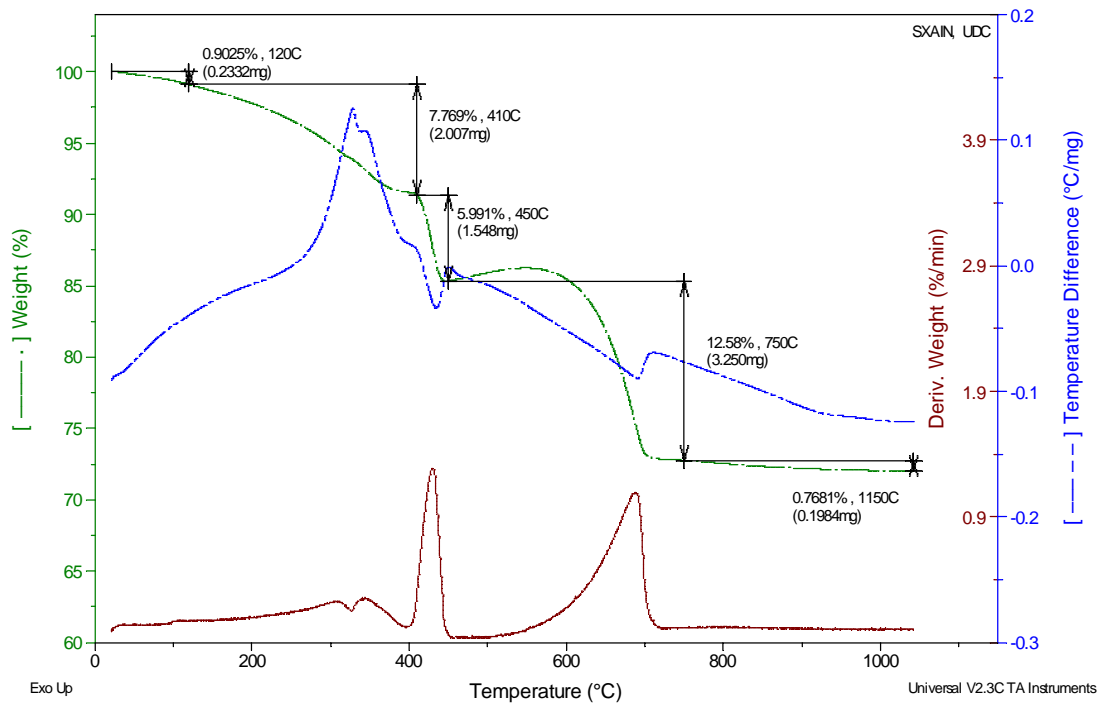


Figura B.1. Análisis termogravimétrico de una mezcla M1: F/Q/S = 30/70/0 en aire.

Sample: M10_n2, 2005/09601
 Size: 28.1355 mg
 Method: 5K/min->1050_C, N2

TGA-DTA

File: C:\...at050623_M10_n2_001
 Operator: Alba y Maria
 Run Date: 23-Jun-05 09:31

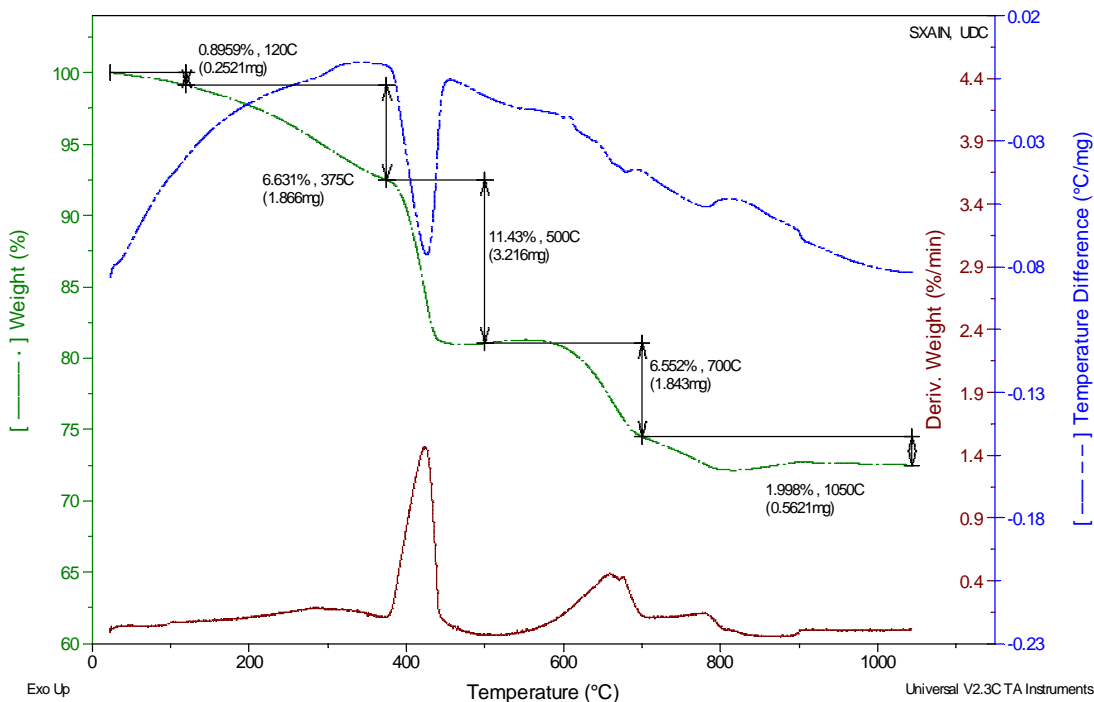


Figura B.2. Análisis termogravimétrico de una mezcla M1: F/Q/S = 30/70/0 en nitrógeno.

Sample: M11_aire, 2005/09602
 Size: 31.0596 mg
 Method: 5K/min->1050_C, Aire

TGA-DTA

File: ...at050624_M11_aire_001
 Operator: Alba y Maria
 Run Date: 24-Jun-05 09:09

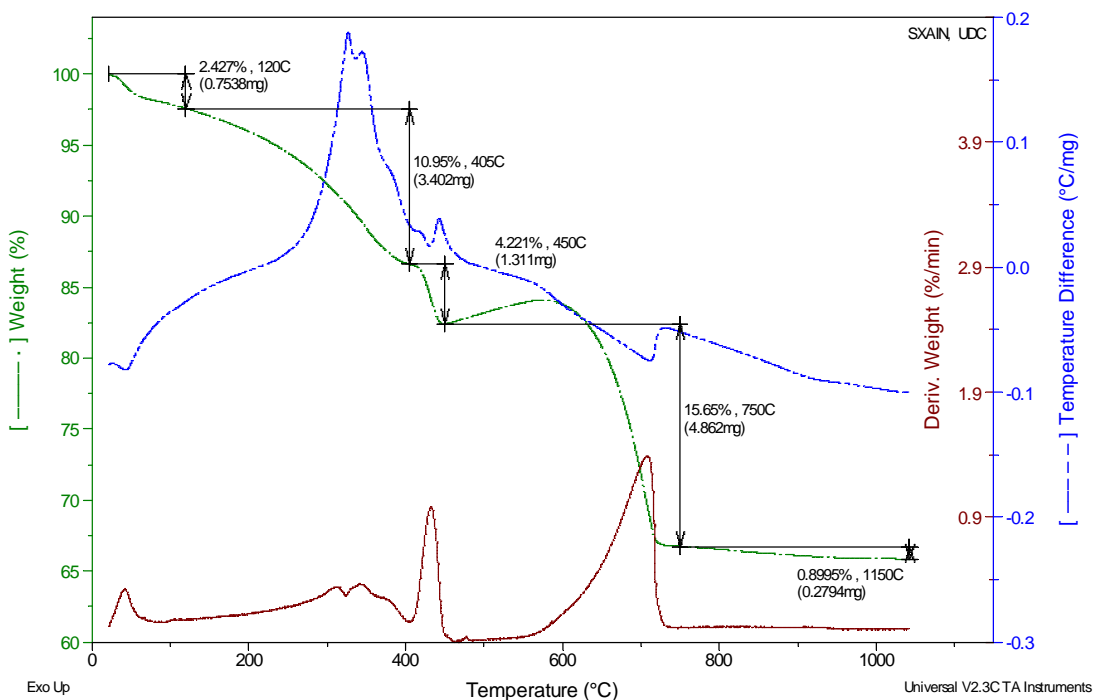


Figura B.3. Análisis termogravimétrico de una mezcla M2: F/Q/S = 40/60/0 en aire.

Sample: M11_n2, 2005/09602
 Size: 28.6690 mg
 Method: 5K/min->1050_C, N2

TGA-DTA

File: C:\...at050627_M11_n2_001
 Operator: Alba y Maria
 Run Date: 27-Jun-05 09:18

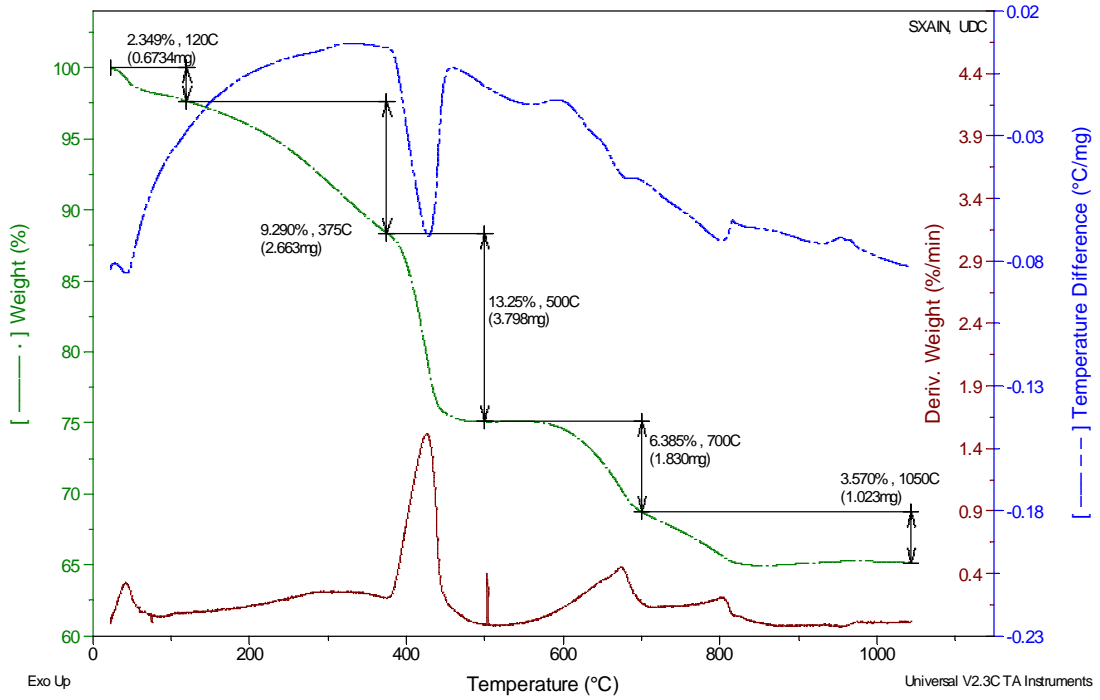


Figura B.4. Análisis termogravimétrico de una mezcla M2: F/Q/S = 40/60/0 en nitrógeno.

Sample: M12_aire, 2005/09603
 Size: 49.0208 mg
 Method: 5K/min->1050_C, Aire

TGA-DTA

File: ...at050628_M12_aire_001
 Operator: Alba y Maria
 Run Date: 28-Jun-05 09:45

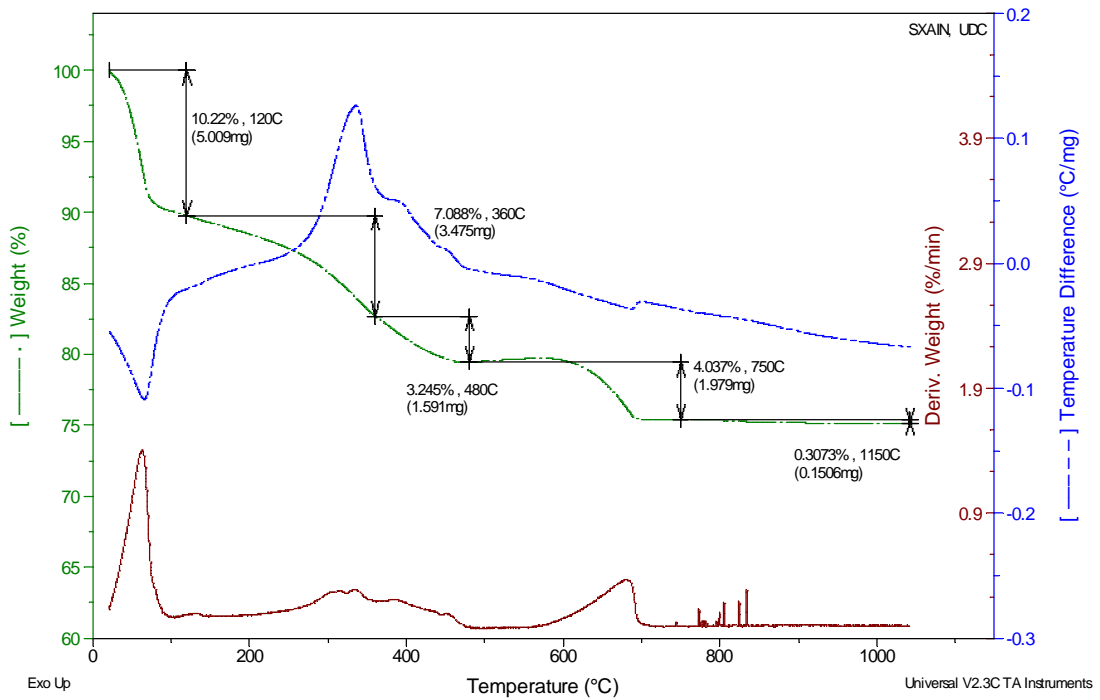


Figura B.5. Análisis termogravimétrico de una mezcla M3: F/Q/S = 30/17.5/52.5 en aire.

Sample: M12_n2, 2005/09603
 Size: 42.6721 mg
 Method: 5K/min->1050_C, N2

TGA-DTA

File: C:\...at050630_M12_n2_001
 Operator: Maria y Alba
 Run Date: 30-Jun-05 09:32

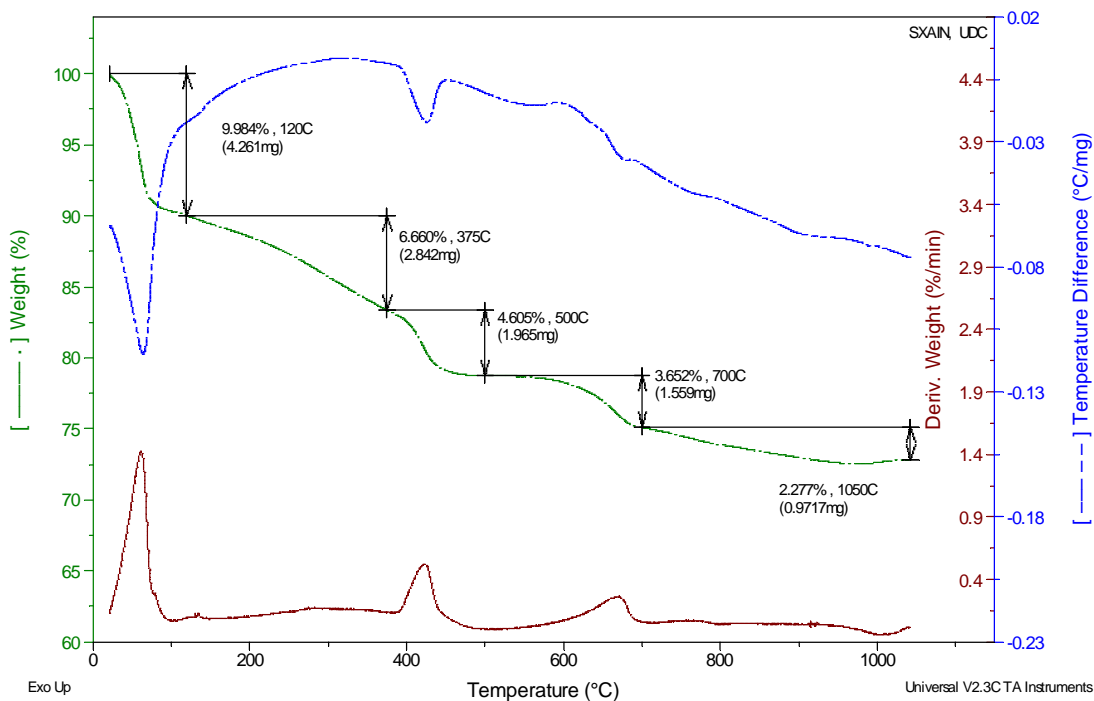


Figura B.6. Análisis termogravimétrico de una mezcla M3: F/Q/S = 30/17.5/52.5 en nitrógeno.

Sample: M13A_aire, 2005/09604
 Size: 48.3919 mg
 Method: 5K/min->1050_C, Aire

TGA-DTA

File: ...at050721_M13A_aire_001
 Operator: Alba y Mar_a
 Run Date: 21-Jul-05 09:39

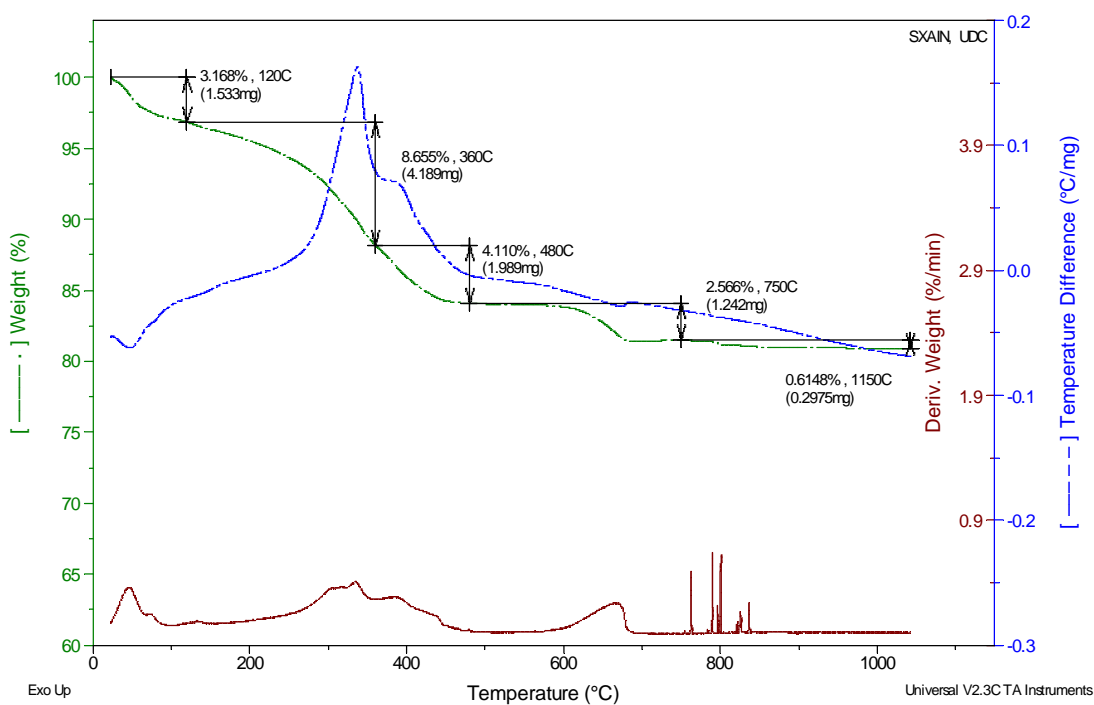


Figura B.7. Análisis termogravimétrico de una mezcla M5: F/Q/S = 30/7/63 en aire.

Sample: M13A_n2, 2005/09604
 Size: 39.8405 mg
 Method: 5K/min->1050_C, N2

TGA-DTA

File: C:\...at050726_M13A_n2_001
 Operator: Mar_a
 Run Date: 26-Jul-05 09:30

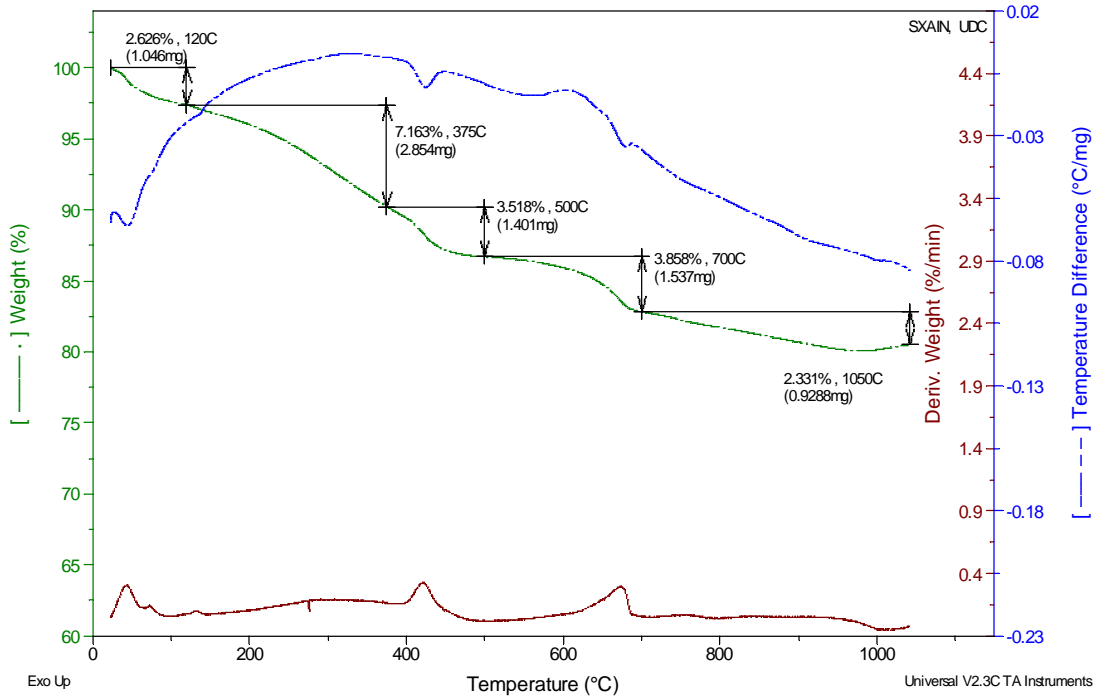


Figura B.8. Análisis termogravimétrico de una mezcla M5: F/Q/S = 30/7/63 en nitrógeno.

Sample: M15_aire, 2005/09605
 Size: 44.8182 mg
 Method: 5K/min->1050_C, Aire

TGA-DTA

File: ...at050701_M15_aire_001
 Operator: Maria y Alba
 Run Date: 1-Jul-05 09:41

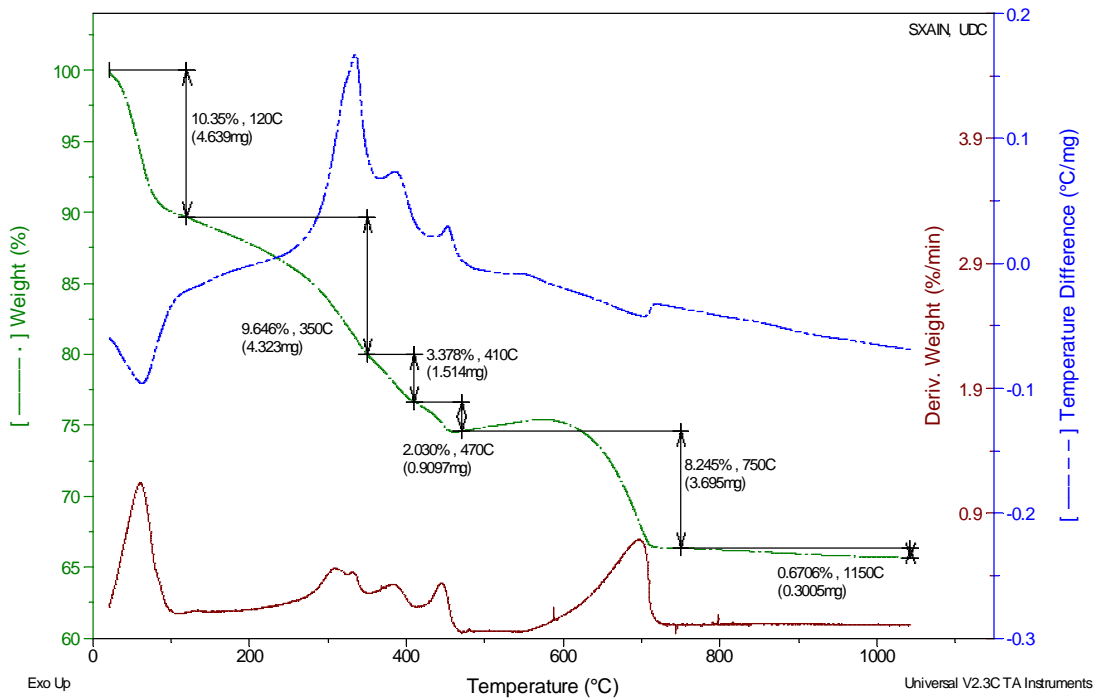


Figura B.9. Análisis termogravimétrico de una mezcla M6: F/Q/S = 40/30/30 en aire.

Sample: M15_n2, 2005/09605
 Size: 40.5427 mg
 Method: 5K/min->1050_C, N2

TGA-DTA

File: C:\...at050704_M15_n2_001
 Operator: Maria y Alba
 Run Date: 4-Jul-05 09:35

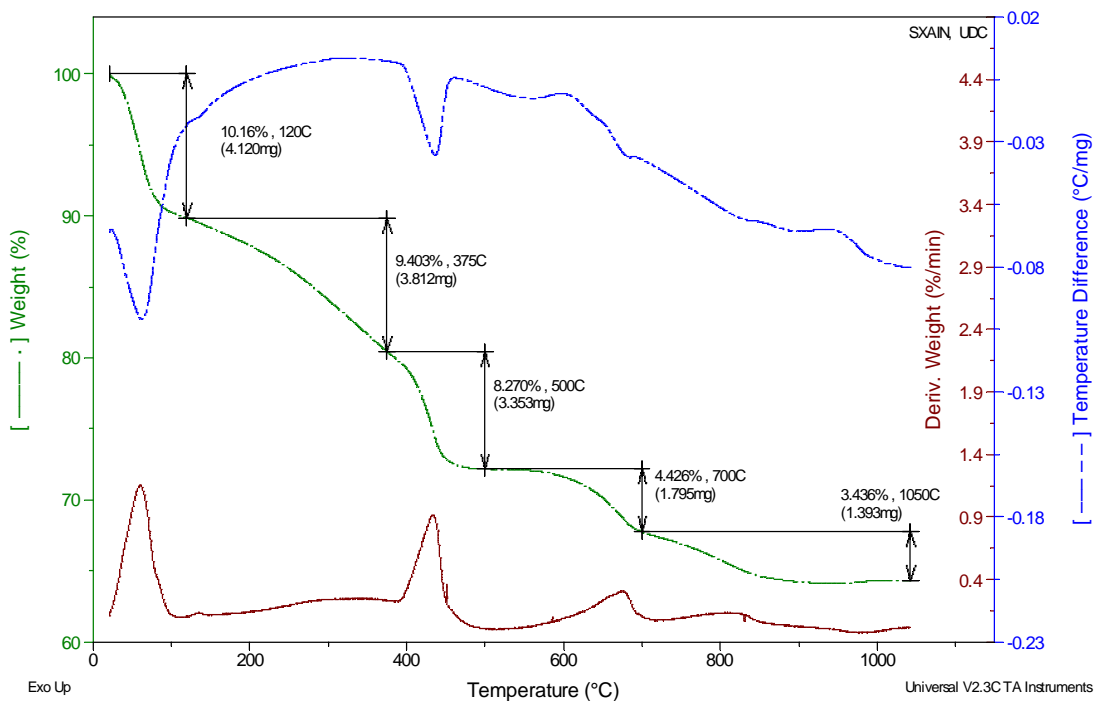


Figura B.10. Análisis termogravimétrico de una mezcla M6: F/Q/S = 40/30/30 en nitrógeno.

Sample: M16_aire, 2005/09606
 Size: 29.6641 mg
 Method: 5K/min->1050_C, Aire

TGA-DTA

File: ...at050705_M16_aire_001
 Operator: Maria y Alba
 Run Date: 5-Jul-05 09:42

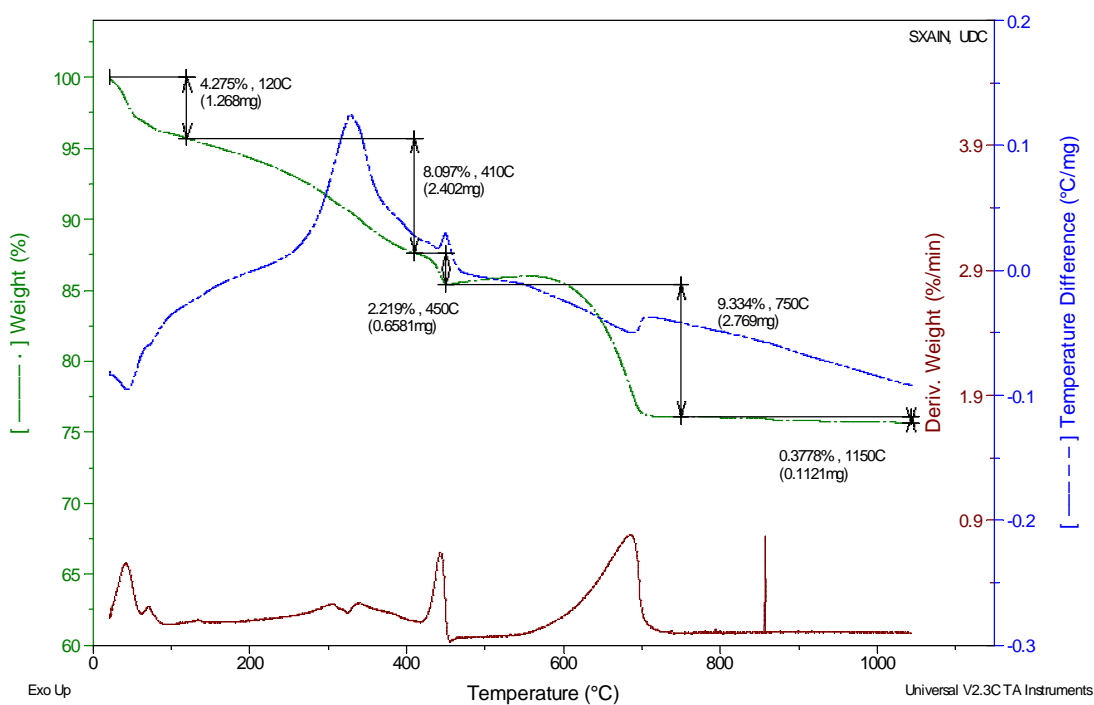


Figura B.11. Análisis termogravimétrico de una mezcla M7: F/Q/S = 30/35/35 en aire.

Sample: M16_n2, 2005/09606
 Size: 34.4571 mg
 Method: 5K/min->1050_C, N2

TGA-DTA

File: C:\...at050711_M16_n2_001
 Operator: Alba y Mar_a
 Run Date: 11-Jul-05 10:19

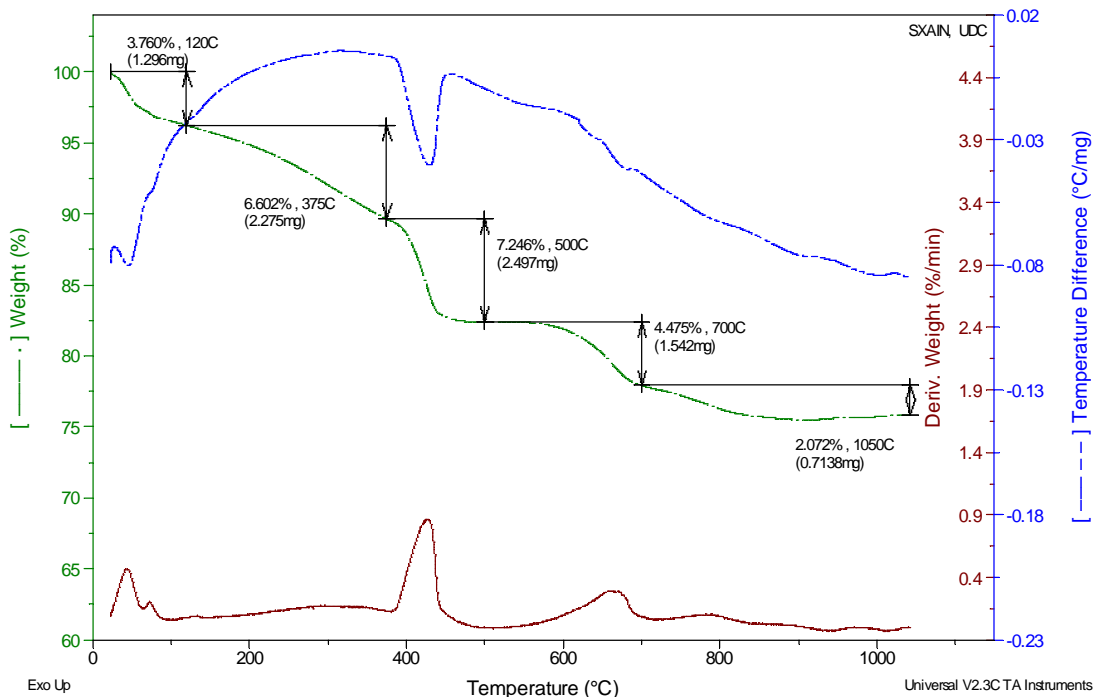


Figura B.12. Análisis termogravimétrico de una mezcla M7: F/Q/S = 30/35/35 en nitrógeno.

Sample: M17_aire, 2005/09607
 Size: 48.6103 mg
 Method: 5K/min->1050_C, Aire

TGA-DTA

File: ...at050715_M17_aire_001
 Operator: Alba y Mar_a
 Run Date: 15-Jul-05 10:05

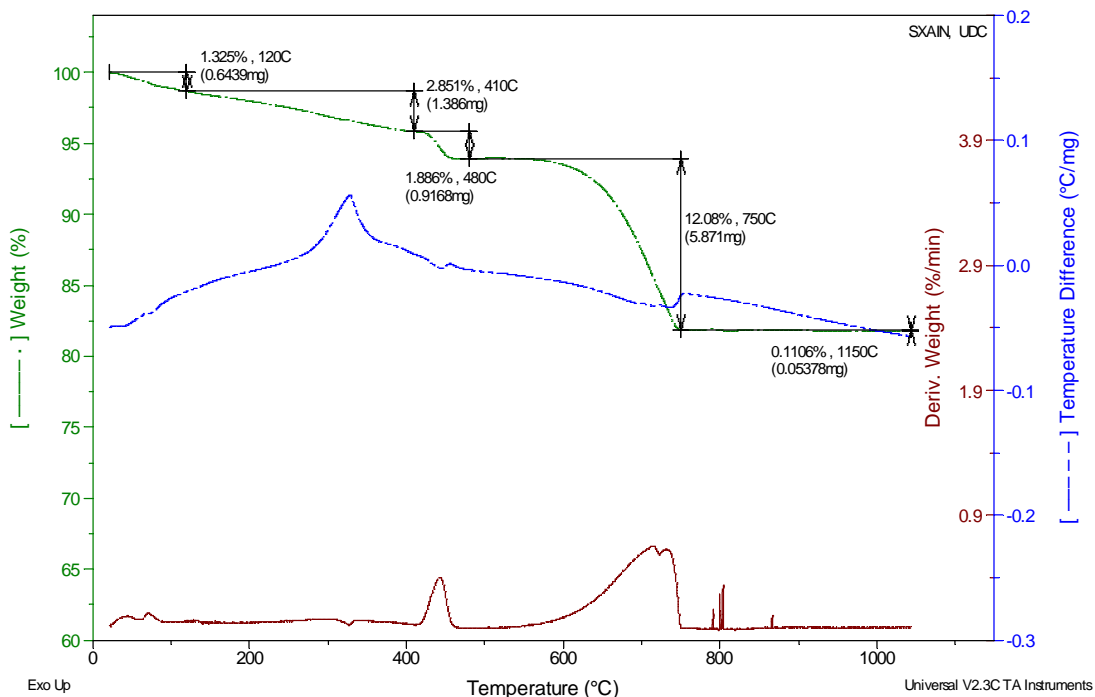


Figura B.13. Análisis termogravimétrico de una mezcla M8: F/Q/S = 30/35/35 en aire.

Sample: M17_n2, 2005/09607
Size: 49.5883 mg
Method: 5K/min->1050_C, N2

TGA-DTA

File: C:\...\at050720_M17_n2_001
Operator: Alba y Mar_a
Run Date: 20-Jul-05 09:36

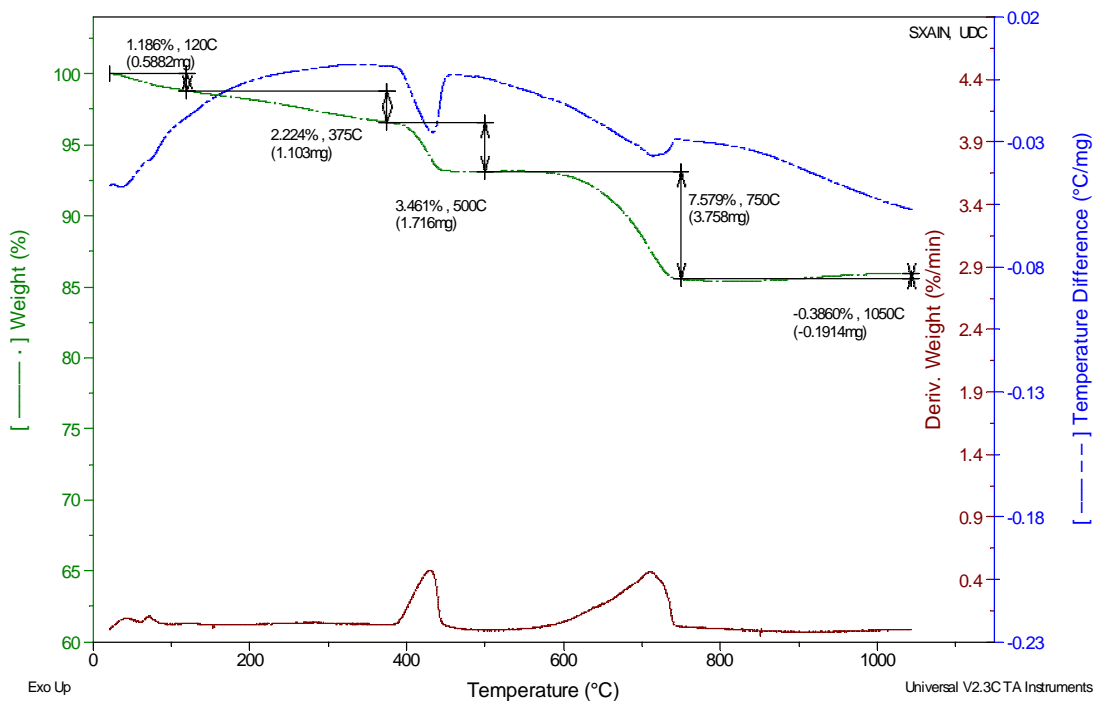


Figura B.14. Análisis termogravimétrico de una mezcla M8: F/Q/S = 30/35/35 en nitrógeno.

B.4. ENSAYOS DE RESISTENCIA DE MORTEROS

Tras el desarrollo del proceso de estabilización se estableció que una posible vía de reciclaje del residuo estabilizado era su empleo como árido en la fabricación de materiales de construcción de base cemento.

Se han realizado varias tandas de amasadas identificadas de manera correlativa con el código CHA y el número de orden.

DIMENSIONES													FLEXION												
1 parte de cemento, 0.65 partes de agua, 3 partes árido													COMPRISION												
													"A"						"B"						
AMASADA	FECHA AMASADA	NOMBRE	Alto (mm.)	Ancho (mm.)	Largo (mm.)	Peso (g.)	Densidad (Kg/m ³)	%CHA en mortero	peso árido (g)	áridos (g)	al/c	cemento (g)	agua(g)	mezcla (g)	arena (g)	%superf. (g)	supert. (g)	Nº secudida	FECHA ROTURA	EDAD (días)	Rf (MPa)	RESISTENCIA SECCION REAL (MPa)	RESISTENCIA SECCION REAL (MPa)	MEANA Nº SACUDIDAS	
CHA7 A	08/03/2005	CHA7 1A CHA7 2A CHA7 3A CHA7 4A	40,00 40,00 40,00 40,00	40,00 40,00 40,00 40,00	160,50 160,50 160,50 160,50	515 515 515 515	2005	8	2100	3	0,65	482	294	560	795	2,50	11,29	28	02/05/2005	55	5,754	16,90	11,28	27,0	
CHA7 B	08/03/2005	CHA7 1B CHA7 2B CHA7 3B CHA7 4B	40,00 40,30 40,30 40,30	39,90 40,20 40,20 40,20	160,30 160,30 160,30 160,30	511 511 511 511	1998	8	2175	3	0,65	488	304	580	823	2,50	11,69	28	02/05/2005	55	5,422	0,00	0,00	28,3	
CHA8 A	09/03/2005	CHA8 1A CHA8 2A CHA8 3A CHA8 4A	40,68 41,00 41,00 40,35	40,00 40,00 40,00 40,00	160,40 160,40 160,40 160,30	519 519 514	1981	9	VOLUMEN	3	0,65	469	305	654	752	1,50	7,03	56	05/05/2005	57	5,813	15,13	15,32	62,7	
ADOQUIN	01/05/2005	-	-	-	-	-	-	8	2760	3	0,65	594	386	828	953	1,50	8,90	-	09/12/2005	275	5,738	13,62	13,13	-	
CHA9 A	03/05/2005	CHA9 1A CHA9 2A CHA9 3A CHA9 4A	40,00 39,90 40,00 38,33	40,00 40,15 40,00 40,00	160,20 160,50 160,50 160,10	520 513 497	2022	9	VOLUMEN	3	0,65	489	305	655	753	1,50	7,04	15	10-may-05	7	4,737	16,31	11,48	16,0	
CHA9 B	03/05/2005	CHA9 1B CHA9 2B CHA9 3B CHA9 4B	38,50 39,80 41,00 39,73	40,00 40,10 40,00 40,00	160,40 160,50 160,50 160,00	505	1971	9	VOLUMEN	3	0,65	473	308	660	759	1,50	7,10	15	10-may-05	7	5,363	15,59	17,68	14,0	
CHA 10A	05/05/2005	CHA10 1A CHA10 2A CHA10 3A CHA10 4A	39,15 40,60 40,00 38,58	40,25 40,00 40,00 40,00	160,25 160,30 160,20 160,20	514 514 496	2004	10	VOLUMEN	3	0,65	471	306	730	683	1,50	7,06	26	13-may-05	8	4,887	15,47	14,37	27,7	
CHA 10B	05/05/2005	CHA10 1B CHA10 2B CHA10 3B CHA10 4B	41,45 39,80 40,75 39,73	40,00 40,15 40,00 40,00	160,50 160,30 160,30 160,00	510	1992	10	VOLUMEN	3	0,65	472	307	732	684	1,50	7,08	16	13-may-05	8	5,787	10,84	10,73	17,3	
CHA 11A	09/05/2005	CHA11 1A CHA11 2A CHA11 3A CHA11 4A	41,15 41,30 41,30 40,13	40,00 40,00 40,00 39,90	160,60 160,25 160,25 160,60	521 518 517 497	1971	11	VOLUMEN	3	0,65	473	308	807	613	1,50	7,10	29	16-may-05	7	5,266	23,42	20,93	26,7	
CHA 11B	09/05/2005	CHA11 1B CHA11 2B CHA11 3B CHA11 4B	39,45 39,90 39,50 41,22	40,00 40,00 40,00 40,00	160,40 160,45 160,70 160,35	501 500 500 502	1979	11	VOLUMEN	3	0,65	472	307	806	612	1,50	7,09	27	16-may-05	7	4,795	11,42	12,31	25,3	
CHA 12A	13/05/2005	CHA12 1A CHA12 2A CHA12 3A CHA12 4A	40,25 41,15 41,15 40,04	40,20 40,15 40,00 40,00	160,40 160,30 160,15 160,15	509 502 516 494	1981	12	VOLUMEN	3	0,65	474	308	882	541	2,00	9,48	34	20-may-05	7	4,634	18,29	16,87	35,7	
CHA 12B	13/05/2005	CHA12 1B CHA12 2B CHA12 3B CHA12 4B	38,20 40,00 40,00 40,57	40,10 40,00 40,00 40,00	160,30 160,40 160,50 160,50	495 503 489 498	1964	12	VOLUMEN	3	0,65	473	308	880	539	2,00	9,46	25	20-may-05	7	4,806	17,97	17,95	26,0	
CHA 13A	18/05/2005	CHA13 1A CHA13 2A CHA13 3A CHA13 4A	39,70 40,00 39,17 39,17	40,00 40,00 39,90 39,90	160,50 160,50 160,40 160,40	484 489 482	1894	13	VOLUMEN	3	0,65	473	308	953	466	2,50	11,83	43	15-jun-05	14	5,930	21,23	20,01	41,7	
CHA 13B	18/05/2005	CHA13 1B CHA13 2B CHA13 3B CHA13 4B	39,40 39,80 40,00 40,00	40,20 40,15 40,00 40,00	160,80 160,20 160,25 160,25	476 493 489	1870	13	VOLUMEN	3	0,65	495	322	997	487	2,50	12,37	37	25-may-05	7	4,840	17,42	15,86	38,7	
								13				162,17	322	474,6	180,4			39	15-jun-05	28	5,487	17,59	18,61		

AMASADA	FECHA AMASADA	NOMBRE	DIMENSIONES				Peso (g.)	Densidad (kg/m ³)	%CHA en mortero	peso amasada (g)	árido cemento a/c rto	cemento (g)	agua(g)	mezcla (g)	arena (g)	%superf.	superf. (g)	Nº sacudid as	FECHA ROTURA	EDAD (días)	Rf (MPa)	COMPRESION COMPRESSION "A"		COMPRESION COMPRESSION "B"		MEDIA Nº SACUDIDAS
			Alto (mm.)	Ancho (mm.)	Largo (mm.)																	RESISTENCIA SECUNDARIAL (MPa)	RESISTENCIA SECUNDARIAL (MPa)	RESISTENCIA SECUNDARIAL (MPa)	RESISTENCIA SECUNDARIAL (MPa)	
CHA 14 A	23/05/2005	CHA14 1A	38,60	40,00	160,25	499	2016	8	2200	3	0,40	500	200	587	913	2,00	10,00	7	30-may-05	7	6,089	27,11	28,96	24,13	22,7	
		CHA14 2A	37,80	40,00	160,40	481	1983	8	VOLUMEN	3	0,40	163,93	200	279,4	338,3	0,5	2,50	*	8-jun-05	16	5,658	30,55	28,87	25,00		
		CHA14 3A	38,15	40,00	160,00	488	1999	8										*	21-jun-05	29	0,000	30,84	27,05	29,85		
		CHA14 4A	38,15	40,10	160,30	527	2149	8	2200	3	0,50	488,9	244,4	586,7	880,0	2,50	12,22	39	1-jun-05	7	6,583	27,11	28,96	24,13	22,7	
CHA 15A	25/05/2005	CHA15 1A	40,00	40,00	160,50	533	2076	8	VOLUMEN	3	0,50	160,29	244	279,4	325,9			36	8-jun-05	14	7,223	30,55	28,87	25,00		
		CHA15 2A	39,40	40,00	160,70	529	2089	8										38	22-jun-05	28	6,518	30,84	27,05	29,85		
		CHA15 3A	40,00	40,00	160,40	544	2120	8	2300	3	0,50	511,1	255,6	613,3	920,0	2,50	12,78	52	1-jun-05	7	6,682	26,79	25,34	23,74	22,7	
		CHA15 4A	39,20	40,00	160,40	529	2103	8	VOLUMEN	3	0,50	167,58	256	292,1	340,7			52	8-jun-05	14	7,580	30,29	29,36	26,79	25,34	
CHA 16A	07/06/2005	CHA16 1A	39,60	40,00	160,25	532	2096	8										46	22-jun-05	28	6,443	30,33	27,49	29,36		
		CHA16 2A	39,43	40,00	160,15	531		8	2200	3	0,50	488,9	244,4	660,0	806,7	2,50	12,22	85	12/12/2005	201	7,289	17,92	1,09	27,35	27,91	
		CHA16 3A	39,70	40,00	160,50	522	2048	9	VOLUMEN	3	0,50	160,29	244	314,3	298,8			120	14-jun-05	14	5,953	25,77	23,46	23,46	108,3	
		CHA16 4A	38,25	40,00	161,00	498	2022	9										120	21-jun-05	28	7,031	27,75	23,44	27,35	27,91	
CHA 16B	07/06/2005	CHA16 1B	36,78	40,00	160,65	501		9	2300	3	0,50	511,1	255,6	766,7	666,7	2,50	12,78	134	5-jul-05	14	6,438	18,12	1,35	24,52	23,14	147,0
		CHA16 2B	39,15	40,00	160,40	497	1979	9	VOLUMEN	3	0,50	167,58	256	365,1	284			153	14-jun-05	7	5,869	24,52	23,14	25,85		
		CHA16 3B	39,40	40,00	160,25	514	2035	9										154	21-jun-05	14	6,190	27,34	25,85	27,34	23,14	
		CHA16 4B	38,02	40,00	160,00	485	2005	9										188	5-jul-05	28	7,917	21,93	23,14	21,93	23,14	
CHA 17A	10/06/2005	CHA17 1A	39,65	40,25	160,60	475	1853	10	2300	3	0,50	511,1	255,6	766,7	666,7	2,50	12,78	procede	17-jun-05	7	8,236	18,43	23,63	no procede		
		CHA17 2A	39,40	40,10	160,55	498	1963	10	VOLUMEN	3	0,50	167,58	256	365,1	284			no procede	24-jun-05	14	4,412	13,00	13,53	12,08	17,88	
		CHA17 3A	39,40	40,10	160,55	498	1963	10										no procede	8-jul-05	28	6,023	12,08	17,88	15,82	0,67	
		CHA17 4A	38,98	40,00	159,75	485		10										no procede	12/12/2005	185	6,356	15,82	0,67	no procede		
CHA 17B	10/06/2005	CHA17 1B	39,70	40,00	160,00	475	1869	10	2300	3	0,50	511,1	255,6	766,7	666,7	2,50	12,78	procede	17-jun-05	7	5,147	15,96	11,51	15,96	11,51	
		CHA17 2B	39,25	40,15	159,80	481	1910	10	VOLUMEN	3	0,50	167,58	256	365,1	284			no procede	24-jun-05	14	5,147	9,94	10,39	9,94	10,39	
		CHA17 3B	39,55	40,00	160,35	528	2081	8	2300	3	0,55	505,5	278,0	613,3	803,2	2,00	10,11	23	8-jul-05	28	5,270	23,74	24,13	23,74	24,13	
		CHA17 4B	39,15	40,00	160,50	516	2053	8	VOLUMEN	3	0,55	165,74	278	292,1	334,5			23	21-jun-05	7	5,658	25,77	25,00	25,77	25,00	
CHA 18A	14/06/2005	CHA18 1A	40,00	40,00	160,15	540	2107	8										22	28-jun-05	14	6,652	30,28	29,85	30,28	29,85	
		CHA18 2A	38,47	40,20	160,30	511		8										22	12-jul-05	28	8,747	27,35	27,91	27,35	27,91	
		CHA18 3A	39,20	40,00	160,50	528	2098	8	2300	3	0,55	505,5	278,0	613,3	803,2	2,00	10,11	24	12/12/2005	181	5,796	24,35	23,97	24,35	23,97	25,0
		CHA18 4A	41,00	40,00	160,55	539	2047	8	VOLUMEN	3	0,55	165,74	278	292,1	334,5			25	28-jun-05	14	6,537	25,38	27,89	25,38	27,89	
CHA 18B	14/06/2005	CHA18 1B	40,50	40,00	160,50	547	2104	8										26	12-jul-05	28	8,070	27,74	27,40	27,74	27,40	
		CHA18 2B	39,60	40,00	160,00	530		8										26	12/12/2005	181	6,387	27,80	27,13	27,80	27,13	

AMASADA	FECHA AMASADA	NOMBRE	DIMENSIONES										FLEXION		COMPRESION		MEDIA N° SACUDIDAS							
			Alto (mm)	Ancho (mm)	Longo (mm)	Peso (g)	Densidad (kg/m ³)	%CHA en mortero	peso amasada (g)	árido (g)	a/c	cemento (g)	agua (g)	mezcla (g)	arena (g)	%superf.		superf. (g)	N° sacudidas	EDAD (días)	Rf (Mpa)	RESISTENCIA SECCION REAL (Mpa)	RESISTENCIA SECCION REAL (Mpa)	
CHA 20A	20/06/2005	CHA20 1A CHA20 2A CHA20 3A CHA20 4A	41,00 40,70 39,70 39,73	40,00 40,00 40,25 40,35	160,50 160,50 160,40 160,20	536 543 537 531	2036 2078 2095	9	2300	3	0,55	505,5 165,74	278,0 278	690,0 328,6	826,5 306,1	2,00 0,5	10,11 2,53	31 32 33	27-jun-05 4-jul-05 18-jul-05	7 14 28	5,925 7,380 5,946	20,59 25,41 28,95	22,49 19,24 28,64	32,0
CHA 20B	20/06/2005	CHA20 1B CHA20 2B CHA20 3B CHA20 4B	41,00 40,20 40,30 39,93	40,10 40,00 40,00 40,00	160,55 160,00 160,00 160,40	540 533 530 527	2046 2072 2045	9	2300	3	0,55	505,5 165,74	278,0 278	690,0 328,6	826,5 306,1	2,00 0,5	10,11 2,53	44 43 45	27-jun-05 4-jul-05 18-jul-05	7 14 28	6,507 6,954 6,075	20,59 27,17 27,09	22,75 17,46 27,40	44,0
CHA 21A	28/06/2005	CHA21 1A CHA21 2A CHA21 3A CHA21 4A	40,00 39,80 40,00 40,00	40,00 40,00 40,00 40,00	160,60 160,25 160,50 160,50	512 505 505	1993 1978 1967	10	2300	3	0,55	505,5 165,74	278,0 278	766,7 365,1	749,8 277,7	2,50	12,64	53 57 52	5-jul-05 12-jul-05 26-jul-05	7 14 28	6,533 6,626 6,180	20,59 24,82 25,60	22,78 25,20 25,09	58,3
CHA 21B	28/06/2005	CHA21 1B CHA21 2B CHA21 3B CHA21 4B	41,15 39,40 39,65 39,62	40,00 40,00 40,00 40,00	160,20 160,40 160,35 160,15	526 510 508 430	1995 2017 1998	10	2300	3	0,55	505,5 165,74	278,0 278	766,7 365,1	749,8 277,7	2,50	12,64	57 60 58	5-jul-05 12-jul-05 26-jul-05	7 14 28	6,633 6,626 6,180	20,59 24,82 25,60	22,78 25,20 25,09	58,3
CHA 22A	01/07/2005	CHA22 1A CHA22 2A CHA22 3A	39,70 40,20 40,50	40,00 40,00 40,00	160,30 160,25 160,20	534 538 541	2098 2088 2085	8	2100	3	0,60	456,5 149,68	273,9 274	560,0 266,7	809,6 299,8	1,50	6,85	15 16 16	8-jul-05 15-jul-05 29-jul-05	7 14 28	6,431 6,952 6,328	14,19 24,30 27,43	14,38 24,33 27,06	15,7
CHA 22B	01/07/2005	CHA22 1B CHA22 2B CHA22 3B	39,90 40,30 40,00	40,00 40,00 40,00	160,40 160,35 160,25	533 541 532	2082 2093 2075	8	2100	3	0,60	456,5 149,68	273,9 274	560,0 266,7	809,6 299,8	1,50	6,85	15 15 16	8-jul-05 15-jul-05 29-jul-05	7 14 28	6,431 6,952 6,328	14,19 24,30 27,43	14,38 24,33 27,06	15,7
CHA 23A	04/07/2005	CHA23 1A CHA23 2A CHA23 3A	40,50 40,65 41,10	40,00 40,00 40,00	160,65 160,25 160,25	525 531 523	2017 2038 2023	9	2100	3	0,60	456,5 149,68	273,9 274	630,0 300	739,6 273,9	1,50	6,85	24 26 25	11-jul-05 18-jul-05 1-ago-05	7 14 28	6,621 5,044 7,099	21,57 23,25 26,28	21,16 22,86 25,84	25,0
CHA 23B	04/07/2005	CHA23 1B CHA23 2B CHA23 3B	40,40 40,00 40,70	40,00 40,95 40,00	160,55 160,25 160,25	528 532 525	2035 2027 2012	9	2100	3	0,60	456,5 149,68	273,9 274	630,0 300	739,6 273,9	1,50	6,85	29 28 26	11-jul-05 18-jul-05 1-ago-05	7 14 28	6,654 4,677 6,323	21,03 18,94 25,80	21,07 18,85 25,88	27,7
CHA 24A	06/07/2005	CHA24 1A CHA24 2A CHA24 3A CHA24 4A	40,10 40,50 39,85 40,15	40,00 40,00 40,15 40,15	160,35 160,40 160,25 160,25	518 530 513 513	2044 2040 2001	10	2100	3	0,60	456,5 149,68	273,9 274	700,0 333,3	669,6 248	2,00 0,5	9,13 2,28	20 22 21	13-jul-05 20-jul-05 3-ago-05	14 28	6,248 6,267	23,18 21,19	22,05 22,05	21,0
CHA 24B	06/07/2005	CHA24 1B CHA24 2B CHA24 3B CHA24 4B	40,00 40,70 40,75 40,75	40,00 40,00 40,20 40,20	160,05 160,50 160,50 160,50	523 529 528 512	2042 2027 2027	10	2100	3	0,60	456,5 149,68	273,9 274	700,0 333,3	669,6 248	2,00 0,5	9,13 2,28	20 19 18	13-jul-05 20-jul-05 3-ago-05	14 28	6,427 5,510 6,959	22,48 22,64 26,34	22,06 23,78 26,49	19,0
CHA 25A	07/07/2005	CHA25 1A CHA25 2A CHA25 3A CHA25 4A	40,50 40,50 40,05 40,05	40,00 40,00 40,00 40,00	160,30 160,40 160,50 160,50	512 512 509 509	1972 1970 1980	11	2100	3	0,60	456,5 149,68	273,9 274	770,0 366,7	599,6 222,1	2,50	11,41	47 45 46	14-jul-05 21-jul-05 4-ago-05	7 14	6,464 5,295	20,22 19,49	19,96 20,49	46,0
CHA 25B	07/07/2005	CHA25 1B CHA25 2B CHA25 3B	40,55 41,00 39,90	40,00 40,00 40,00	160,50 160,25 160,60	514 515 509	1974 1960 1986	11	2100	3	0,60	456,5 149,68	273,9 274	770,0 366,7	599,6 222,1	2,50	11,41	43 48 44	14-jul-05 21-jul-05 4-ago-05	7 14 28	6,476 5,646 4,434	19,14 19,15 23,49	19,61 20,43 25,26	45,0

AMASADA	FECHA AMASADA	NOMB RE	Alto 1 (mm.)	Alto 2 (mm.)	Ancho (mm.)	Largo (mm.)	Peso (g.)	Densidad (kg/m³)	kg cem/m³ mortero	a/c	árido/cemento	cemento (g)	agua(g)	arena (g)	Nº sacudidas	FECHA ROTURA	EDAD (días)	Rt (MPa)	FLEXIÓN N.º A		COMPRESIÓN N.º B		Media flexión (MPa)	Media compresión (MPa)
																			RESISTENCIA SECCIÓN REAL MPa	RESISTENCIA SECCIÓN REAL MPa	RESISTENCIA SECCIÓN REAL MPa	MEDIA Nº SACUDIDAS		
MN1	22/08/2005	MN1 C	39,95	39,95	40,00	160,50	571	2232	450,41	0,65	3,354	419,6	272,8	1407,6	6	19-sep-05	28	8,632	32,0	32,05	30,66	6,33	8,74	31,68
		MN1 D	40,00	39,95	40,00	160,50	570	2228				137,6	272,8	521,3	6	19-sep-05	28	8,714	30,8	30,66	31,93			
		MN1 E	39,70	39,50	40,00	160,35	568	2246								7	19-sep-05	28	8,864	32,7	31,93			
MN2	22/08/2005	MN2 C	39,70	40,30	40,00	160,60	575	2228	447,11	0,65	3,399	416,0	270,4	1413,7	9	19-sep-05	28	9,213	33,1	33,28	33,88	10,33	8,63	33,52
		MN2 D	39,80	40,25	40,00	160,25	578	2239				136,4	270,4	523,6	11	19-sep-05	28	8,447	33,8	33,88	33,31			
		MN2 E	39,80	40,30	40,00	160,35	580	2240								11	19-sep-05	28	8,222	33,8	33,31			
MN3	22/08/2005	MN3 C	39,40	39,20	40,00	160,85	564	2232	443,85	0,65	3,443	412,3	268,0	1419,6	10	19-sep-05	28	9,166	32,7	33,75	33,56	10,00	9,04	33,24
		MN3 D	39,60	7,00	40,00	160,60	571	3099				135,2	268,0	525,8	10	19-sep-05	28	8,883	33,3	33,56	32,80			
		MN3 E	39,70	39,40	40,00	160,85	570	2241								10	19-sep-05	28	9,056	33,4	32,80			
MN4	23/08/2005	MN4 C	39,50	39,50	40,00	160,90	574	2258	440,64	0,65	3,487	408,8	265,7	1425,5	6	20-sep-05	28	8,768	32,7	31,94	31,94	6,67	9,05	32,71
		MN4 D	39,50	39,60	40,00	160,80	573	2250				134,0	265,7	528,0	7	20-sep-05	28	8,777	32,4	32,49	32,15			
		MN4 E	39,40	39,50	40,00	160,70	566	2233								7	20-sep-05	28	9,595	34,6	32,15			
MN5	23/08/2005	MN5 C	39,20	38,90	40,00	160,80	564	2243	437,48	0,65	3,531	405,3	263,4	1431,3	7	20-sep-05	28	9,563	33,2	31,75	31,75	7,33	9,55	33,04
		MN5 D	38,90	38,70	40,00	160,80	562	2254				132,9	263,4	530,1	8	20-sep-05	28	8,726	33,8	32,40	33,34			
		MN5 E	39,50	39,20	40,00	160,05	569	2268								7	20-sep-05	28	10,355	33,9	33,34			
MN6	23/08/2005	MN6 C	39,50	39,40	40,00	160,50	567	2238	434,37	0,65	3,576	401,9	261,2	1436,9	8	20-sep-05	28	9,628	32,9	33,25	33,25	7,33	9,32	32,72
		MN6 D	39,70	39,50	40,00	160,95	568	2226				131,8	261,2	532,2	7	20-sep-05	28	8,913	33,6	32,22	31,84			
		MN6 E	40,00	40,00	40,00	161,10	576	2235								7	20-sep-05	28	9,427	32,5	31,84			
MN7	23/08/2005	MN7 C	39,75	39,00	40,00	160,15	568	2259	461,09	0,60	3,35	424,2	254,5	1421,3	9	20-sep-05	28	9,113	36,0	38,09	38,09	10,33	9,49	37,74
		MN7 D	39,50	39,10	40,00	160,30	570	2266				139,1	254,5	526,4	11	20-sep-05	28	10,179	37,8	36,57	38,26			
		MN7 E	39,65	39,45	40,00	160,20	572	2259								11	20-sep-05	28	9,169	39,7	38,26			
MN8	24/08/2005	MN8 C	40,90	39,90	40,00	160,20	579	2254	457,66	0,60	3,394	420,5	252,3	1427,2	12	21-sep-05	28	9,382	35,7	37,46	37,46	11,33	9,01	36,33
		MN8 D	40,80	40,00	40,00	160,25	280	1092				137,9	252,3	528,6	12	21-sep-05	28	9,152	33,9	37,60	35,96			
		MN8 E	40,75	39,80	40,00	160,40	575	2241								10	21-sep-05	28	8,489	37,4	35,96			
MN9	24/08/2005	MN9 C	40,00	40,00	40,00	160,05	577	2255	454,29	0,60	3,438	416,8	250,1	1433,1	11	21-sep-05	28	10,336	34,8	33,14	33,14	10,67	9,41	32,97
		MN9 D	40,15	40,00	40,00	160,80	576	2240				136,7	250,1	530,8	10	21-sep-05	28	9,134	32,2	32,51	32,27			
		MN9 E	40,10	39,90	40,00	160,80	578	2256								11	21-sep-05	28	8,775	32,8	32,27			
MN10	25/08/2005	MN10 C	39,60	39,70	40,00	160,60	581	2274	450,97	0,60	3,482	413,2	247,9	1438,8	10	22-sep-05	28	0,000	33,3	36,98	28,89	11,00	8,14	34,34
		MN10 D	39,70	39,70	40,00	160,70	582	2275				135,5	247,9	532,9	12	22-sep-05	28	8,641	35,8	28,89	34,94			
		MN10 E	40,30	40,00	40,00	161,00	586	2263								11	22-sep-05	28	7,648	36,1	34,94			
MN11	25/08/2005	MN11 C	40,00	39,60	40,00	161,00	580	2272	472,28	0,55	3,347	428,9	235,9	1435,3	20	22-sep-05	28	8,508	38,4	37,88	37,88	21,67	8,06	38,13
		MN11 D	40,20	40,20	40,00	161,25	586	2270				140,6	235,9	531,6	22	22-sep-05	28	8,027	37,1	37,82	39,23			
		MN11 E	40,30	40,00	40,00	160,70	588	2285								23	22-sep-05	28	7,652	38,3	39,23			
MN12	25/08/2005	MN12 C	40,40	40,30	40,00	160,30	584	2270	468,73	0,55	3,39	425,1	233,8	1441,1	20	22-sep-05	28	9,298	39,6	39,31	39,31	20,00	8,89	38,74
		MN12 D	40,30	39,90	40,00	160,25	584	2274				139,4	233,8	533,7	20	22-sep-05	28	0,000	38,9	37,85	38,10			
		MN12 E	40,10	40,00	40,00	160,30	585	2281								20	22-sep-05	28	8,477	38,6	38,10			
MN13	25/08/2005	MN13 C	40,00	39,65	40,00	160,60	584	2289	465,23	0,55	3,433	421,4	231,8	1446,8	18	22-sep-05	28	9,173	37,2	39,52	39,52	18,00	9,38	39,19
		MN13 D	40,15	40,10	40,00	160,50	590	2289				138,2	231,8	535,9	19	22-sep-05	28	10,170	40,4	38,03	40,35			
		MN13 E	40,45	40,40	40,00	160,45	593	2284								17	22-sep-05	28	8,789	39,6	40,35			
MN14	25/08/2005	MN14 C	40,10	39,90	40,00	160,50	578	2258	484,04	0,50	3,343	433,6	216,8	1449,6	48	22-sep-05	28	8,217	43,1	44,23	44,23	51,00	8,62	42,78
		MN14 D	40,60	40,35	40,10	160,60	589	2264				142,2	216,8	536,9	54	22-sep-05	28	8,903	42,7	42,48	42,48			
		MN14 E	40,65	40,25	40,00	160,75	588	2258								51	22-sep-05	28	8,738	41,3	42,89			

B.5. LIXIVIACIÓN

Se han llevado a cabo ensayos de lixiviación siguiendo la DIN 38414 y la . Se realizaron determinaciones sobre dos muestras de fuel, sobre tres de mortero y ocho proporciones diferentes de residuo estabilizado.

	FUEL		MORTERO		
	F1	F2	D65-9	D65-11	D65-13
	<i>Fuel 1</i>	<i>Fuel 2</i>	<i>mortero</i>	<i>mortero</i>	<i>mortero</i>
As	0,139	0,076	0,012	0,012	0,013
Ba	0,43	0,31	7	6,8	8
Cd	0,02	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cr	<0.005	<0.005	0,164	0,17	0,236
Cu	0,133	0,0054	0,039	0,043	0,053
Hg	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
Mo	0,09	0,014	0,026	0,031	0,033
Ni	0,0386	0,0093	0,0256	0,0294	0,0343
Pb	0,69	<0,010	0,02	<0,010	<0,010
Sb	0,021	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Se	0,337	0,128	<0.048	0,051	0,058
V	0,015	0,011	<0.001	<0.001	<0.001
Zn	0,12	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
F⁻	<25	<10	<5	<5	<5
Cl⁻	5614,9	2502,3	253,9	309,4	322,3
SO₄²⁻	777,4	223,9	16,8	16	22,4

	RESIDUO ESTABILIZADO						
	M1	M2	M3	M5	M6	M7	M8
	<i>30/70/00</i>	<i>40/60/00</i>	<i>30/17.5/52.5</i>	<i>30/07/1963</i>	<i>40/30/30</i>	<i>30/35/35</i>	<i>30/35/35</i>
As	0,085	0,103	0,067	0,047	0,075	0,056	0,049
Ba	5,5	2,7	2,2	0,88	5,2	3,13	1,4
Cd	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cr	0,224	0,148	0,261	0,195	0,264	0,271	0,114
Cu	0,017	0,017	0,047	0,025	0,038	0,024	0,152
Hg	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
Mo	0,061	0,051	0,134	0,126	0,078	0,067	0,05
Ni	0,0066	0,0078	0,0129	<0,004	0,0141	0,0083	0,0289
Pb	0,32	0,47	0,29	0,084	0,16	0,2	0,016
Sb	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Se	0,305	0,331	0,252	0,19	0,259	0,222	0,153
V	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Zn	0,1	0,25	0,3	0,052	0,12	0,17	<0.01
F⁻	<5	<5	7,4	<5	7,5	8,5	12,6
Cl⁻	3007,7	3433,1	2435,8	2139,5	3361,6	2685,3	1296,6
SO₄²⁻	1417,8	1244,3	35,8	22,2	26,6	139,6	22,5

UDC													
Lixiviados DIN 38414: Hydrocarbon Oil Index (H.O.I.)													
Fuel	Fuel		Mortero			Mezclas Estabilizadas							
	F1	F2	MM3	MM4	MM5	M1	M2	M3	M5	M6	M7	M8	MRG
Fuel	48	48	9	11	13	30	40	30	30	40	30	30	
Cal	0	0				70	60	17,5	7	30	35	35	
Serrin	0	0				0	0	52,5	63	30	35	35	
H.O.I. (mg/L)	3,78	2,79	0,22	0,24	0,47	1,24	0,64	0,36	0,33	0,79	0,69	0,26	0,41
H.O.I. (mg/kg)	37,8	27,9	2,2	2,4	4,7	12,4	6,4	3,6	3,3	7,9	6,9	2,6	4,1
H.O.I. (mg/kg) norm	78,75	58,13	24,44	21,82	36,15	41,33	16,00	12,00	11,00	19,75	23,00	8,67	

Lixiviados DIN 38414: BTEX													
Fuel	Fuel		Mortero			Mezclas Estabilizadas							
	F1	F2	MM3	MM4	MM5	M1	M2	M3	M5	M6	M7	M8	MRG
Benceno	1,78	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	0,03	0,02	0,03
Tolueno	5,35	2,28	0,17	4,61	0,16	441	39,4	14,5	85	2,16	2,47	3,44	0,2
Etilbenceno	7,61	0,42	0,02	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,1	0,02	0,03	0,02	0,03
meta-para-Xileno	1,63	0,08	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
orto-Xileno	18,3	0,94	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
BTEX (µg/L)	34,67	3,72	0,19	4,62	0,18	441,08	39,42	14,52	85,16	2,18	2,53	3,48	0,26
BTEX (µg/kg)	346,7	37,2	1,9	46,2	1,8	4410,8	394,2	145,2	851,6	21,8	25,3	34,8	2,6
BTEX (mg/kg)	3,467	0,372	0,019	0,462	0,018	44,108	3,942	1,452	8,516	0,218	0,253	0,348	0,026
BTEX (mg/kg) norm	7,22	0,78	0,21	4,20	0,14	147,03	9,86	4,84	28,39	0,55	0,84	1,16	

Lixiviados DIN 38414: Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs)													
Fuel	Fuel		Mortero			Mezclas Estabilizadas							
	F1	F2	MM3	MM4	MM5	M1	M2	M3	M5	M6	M7	M8	MRG
Naftaleno	16,24	1,89	0,49	1,27	1	3,05	2,68	3,39	3,63	3,64	2,7	1,56	1,08
Acenafileno	3,84	0,39	0,37	0,4	0,36	0,52	0,77	0,7	0,54	0,65	0,48	0,35	0,3
Acenafталeno	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08
Fluoreno	1,11	3,87	2,62	2,9	2,96	4,26	9,22	8,9	3,85	2,45	3,96	2,57	3,33
Fenantreno	4,74	1,64	0,04	0,16	0,21	4,24	4,65	<0,01	3,62	1,96	4,13	2,79	2,02
Antraceno	4,87	0,38	0,28	0,39	0,28	1,02	9,01	8,74	0,71	0,54	0,59	0,26	0,34
Fluoranteno	0,4	0,18	0,13	0,15	<0,01	0,25	0,31	0,17	0,06	0,17	0,15	0,16	0,02
Pireno	1,58	0,53	0,17	0,15	0,15	0,49	0,57	0,63	0,43	0,31	0,39	0,19	0,22
Benzo(a)antraceno	0,49	0,13	0,02	0,07	0,01	0,22	0,19	0,49	0,07	0,09	0,11	0,04	0,05
Criseno	0,65	0,19	0,03	0,1	0,01	0,3	0,27	0,86	0,1	0,13	0,15	0,04	0,07
Benzo(b)fluoranteno	0,12	0,05	<0,01	0,03	<0,01	0,14	0,12	0,18	0,01	0,04	0,03	0,01	0,02
Benzo(k)fluoranteno	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,03	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Benzo(a)pireno	0,26	0,09	<0,01	0,04	<0,01	0,15	0,13	0,08	<0,01	0,04	0,08	0,01	0,02
Dibenzo(a,h)antraceno	0,05	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,05	0,04	0,12	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Benzo(g,h,i)perileno	0,07	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,04	0,02	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Indeno(a,2,3-cd)pireno	<0,01	0,04	<0,01	0,03	<0,01	0,11	0,11	0,01	<0,01	0,03	0,03	<0,01	0,02
HAP (µg/L)	38,53	13,50	8,23	9,77	9,06	18,95	32,20	28,43	17,10	14,13	16,88	12,06	11,58
HAP (µg/kg)	385,3	135	82,3	97,7	90,6	189,5	322	284,3	171	141,3	168,8	120,6	115,8
HAP (mg/kg)	0,3853	0,135	0,0823	0,0977	0,0906	0,1895	0,322	0,2843	0,171	0,1413	0,1688	0,1206	0,1158
HAP (mg/kg) norm	0,80	0,28	0,91	0,89	0,70	0,63	0,81	0,95	0,57	0,35	0,56	0,40	

Lixiviados DIN 38414: Policlorobifenilos (PCBs)													
	Fuel		Mortero			Mezclas Estabilizadas							
	F1	F2	MM3	MM4	MM5	M1	M2	M3	M5	M6	M7	M8	MRG
PCB 8 (ng/L)	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
PCB 20 (ng/L)	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	10,84	<1.0	<1.0	<1.0	12,21	<1.0	<1.0	<1.0
PCB 28 (ng/L)	10,21	2,52	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	15,63	<1.0	<1.0	<1.0	1,48
PCB 52 (ng/L)	30,38	9,83	39,94	63,62	75,41	<1.0	105,66	<1.0	<1.0	<1.0	34,32	<1.0	<1.0
PCB 35 (ng/L)	62,93	25,26	2,83	5,64	3,14	3,06	<1.0	<1.0	11,74	16,05	<1.0	10,91	3,80
PCB 101 (ng/L)	<1.0	<1.0	<1,00	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
PCB 118 (ng/L)	<1.0	<1.0	2,23	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	4,54	<1.0	<1.0	<1.0
PCB 138 (ng/L)	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	1,71	1,00	1,52	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
PCB 153 (ng/L)	3,65	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	4,62	3,52	3,82	<1.0	4,54	4,26	<1.0	<1.0
PCB 180 (ng/L)	1,98	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	1,32	1,91	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Total PCBs (ng/L)	109,15	37,61	45,00	69,26	78,55	21,55	112,09	5,34	27,37	37,34	68,13	10,91	5,28
Total PCBs (ng/kg)	1091,46	376,11	450,04	692,59	785,51	215,49	1120,91	53,40	273,73	373,43	681,28	109,13	52,77
Total PCBs (mg/kg)	0,0011	0,0004	0,0005	0,0007	0,0008	0,0002	0,0011	0,0001	0,0003	0,0004	0,0007	0,0001	0,0001
Total PCBs (mg/kg) norm	2,27	0,78	5,00	6,30	6,04	0,72	2,80	0,18	0,91	0,93	2,27	0,36	

Lixiviados DIN 38414: Fenoles													
	Fuel		Mortero			Mezclas Estabilizadas Normalizadas							
	F1	F2	MM3	MM4	MM5	M1	M2	M3	M5	M6	M7	M8	MRG
2,4-dinitrofenol	21,9	7	2,6	4,4	3,8	10	19,6	18,7	11	12,1	11	10,1	8,3
4cloro-3metilfenol	54,2	16,4	6,4	8,9	7,6	24,9	48,6	46,3	25,8	28,2	32,6	25	20,6
2,4-diclorofenol	65,3	23	8,5	4,6	4,5	29,8	35,3	32,9	42,5	46,7	36,1	16,1	9,8
2,4,6-triclorofenol	102,1	13,3	7,8	8	15,2	9,8	36,3	29,8	30,9	43,6	6,5	10,1	2,5
4-nitrofenol	12,2	5,3	<2,0	<2,0	2,4	4,4	9,6	9,2	8,3	9,1	4,8	4,9	<2,0
pentaclorofenol	22,2	8,6	2,6	2,6	2,2	2,4	19,9	18,4	4,5	5	2,7	10,7	8,4
2-nitrofenol	12,4	4,1	<2,0	<2,0	<2,0	3,4	7,4	7,1	6,4	7	3,7	3,8	2,1
fenol	195,7	111,5	11,8	22,2	7,8	89,8	175,4	159,8	114,6	125,6	98,5	86,3	89,1
2,4-dimetilfenol	57,9	31,7	6,8	14,8	3,3	26,6	51,9	47,3	49,8	54,6	25,7	25,5	22
2-clorofenol	48,3	3,9	<2,0	<2,0	<2,0	5,3	9,5	8,6	6,2	6,8	5,8	4,6	4,2
Total fenoles (µg/L)	592,2	224,8	46,5	65,5	46,8	206,4	413,5	378,1	300	338,7	227,4	197,1	167
Total fenoles (µg/kg)	5922	2248	465	655	468	2064	4135	3781	3000	3387	2274	1971	1670
Total fenoles (mg/kg)	5,922	2,248	0,465	0,655	0,468	2,064	4,135	3,781	3	3,387	2,274	1,971	1,67
Total fenoles (mg/kg) norm	12,34	4,68	5,17	5,95	3,60	6,88	10,34	12,60	10,00	8,47	7,58	6,57	

UDC													
Lixiviados DIN 38414: Resumen con Normalización													
	Fuel		Mortero			Mezclas Estabilizadas Normalizadas							
	F1	F2	MM3	MM4	MM5	M1	M2	M3	M5	M6	M7	M8	MRG
H.O.I. (mg/L)	9,45	6,98	2,44	2,18	3,62	4,13	1,60	1,20	1,10	1,98	2,30	0,87	0,41
BTEX (µg/L)	86,68	9,30	2,11	42,00	1,38	1470,27	98,55	48,40	283,87	5,45	8,43	11,60	0,26
HAP (µg/L)	96,33	33,75	91,44	88,82	69,69	63,17	80,50	94,77	57,00	35,33	56,27	40,20	11,58
PCBs (ng/L)	272,87	94,03	500,047	629,627	604,238	71,8302	280,226	17,7997	91,2443	93,3578	227,094	36,3775	5,28
Fenoles (µg/L)	1480,5	562,0	516,7	595,5	360,0	688,0	1033,8	1260,3	1000,0	846,8	758,0	657,0	167,0

