

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA



etsecpb

**Departamento de Infraestructura del Transporte y del
Territorio**

TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS ESCORIAS DE
INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (EIRSU).
APLICACIÓN EN CAPAS LIGADAS DE FIRMES TRATADAS
CON CEMENTO.**

Autora

Margarita Verónica Flor Granda

Directores

**Dr. Lluís Agulló Fité, Dr. Alejandro Josa García – Tornel.
Dr. Enric Vázquez Ramonich.**

Barcelona, Febrero de 2006

A todos los emigrantes.

¿Como no sentir piedad por esas gentes que huyeron de la miseria para acabar por descubrir que el paraíso soñado tenía poco que ver con la realidad?, ¿Cómo no tomar partido por esa gente que a la búsqueda de un mejor nivel de vida paga el alto precio de la pérdida de sus raíces?

Carmen Luque (Ells truquen a la porta, Barcelona, 2000).

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero expresar mi sincero agradecimiento a mis directores de tesis, Enric Vázquez, por sus sabios consejos y capacidad profesional; Alejandro Josa, por la confianza, apoyo incondicional que he recibido durante todos estos años y la gran visión para dar forma al trabajo realizado; a Lluís Agulló por su continua motivación para que esta tesis haya llegado por fin a buen puerto. Gracias por todo lo que de ustedes aprendí.

También quiero agradecer a todos los profesores e investigadores del departamento de ingeniería de la construcción, principalmente a Marilda Barra, Raviandra Gettu, Susana Valls, Albert Roca y en especial a Patricia Pardo, y Adriana Martínez, quienes me han enseñado a valorar el inmenso mundo de la investigación, han sido mi soporte, me han dado aliento, y con paciencia han perfilado la tesis.

Deseo extender mi agradecimiento a quienes día a día han compartido las múltiples experiencias del laboratorio y de vida, a María Izquierdo, Bibiana Rodríguez, y muchos otros doctorandos y tesinandos que han terciado estos años de investigación.

Quiero reconocer de forma especial por la colaboración en los innumerables ensayos de laboratorio y viajes a la carretera, a Eufonio Beyret. Así como también a Francesc Àvila, Paco, Juan, Mati y Manuel, por la ayuda recibida a lo largo de la campaña experimental, también me gustaría extender este agradecimiento a Camilo Bernard, Tomás García y Miguel Ángel Martín y Carlos, y a todo el personal del laboratorio de Tecnología de Estructuras de la Universidad Politécnica de Cataluña, quienes con su característico compromiso de trabajo me ayudaron en el estudio de hormigones.

Asimismo deseo agradecer a las empresas que han contribuido generosamente suministrando los materiales utilizados en esta tesis: planta de incineración de RSU de Mataró, y Tarragona, Pedreres Maresme Rusc S.A. y VECESA, Áridos Pérez, S.A., Cementos Molins S.A, Empresa Leiro S.A., PROMSA, UNILAND Cementera, S.A. Y a las personas que hicieron posible la construcción del tramo experimental de carretera, Antoni Pérez, Genís Costa, Albert Calsina, Antoni Pla y de manera especial a Vicente Baró.

Deseo expresar mi agradecimiento al ITeC (Instituto de Tecnología de la construcción de Cataluña), IECA (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones), TIRME S.A., Departamento de Política Territorial y Obras Públicas de la Generalitat de Catalunya, y al municipio de Tagamanent (en el Vallès Oriental).

La presente tesis ha contado con el apoyo del profesor Modest Batlle y Alvar Garola, así como del Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio.

Mi sincero agradecimiento a la Universidad Central del Ecuador y a la Universidad Politécnica del Ejército (Ecuador), a quienes debo el amor por la ingeniería civil. Así también, quiero agradecer al padre capuchino Miguel Ángel Cabodevilla, que junto a los dos primeros, me apoyaron para obtener la beca del AECEI.

Esta tesis ha sido posible realizarla en los primeros años, gracias a las becas de la Agencia Española de Cooperación Internacional AECEI, y posteriormente a los contratos obtenidos en calidad de becario de la UPC, entre los que quiero agradecer a Genoveva Comas. Y de manera especial al profesor Ignacio Carol, por el constante apoyo brindado y por su ejemplo diario como jefe y como profesional, y a todos los que hacen el departamento de ingeniería del terreno, cartográfica y geofísica. Gracias.

Salvador, M. Cint, y familia Fabregat Margalef, reciban por medio de estas palabras mi agradecimiento más profundo, han sido mis amigos y mi familia catalana, me han brindado su apoyo y su cariño que tanto bien me hizo. A l'àvia que ahora está en mejor vida, quien en algún momento me sentó en sus rodillas y me trasladó el tierno recuerdo de la infancia. Gracias Yaya. De manera particular deseo agradecer la calidad humana y el cariño fraterno del Tío Heinz Glur a quien debo una parte importante de esta tesis.

Agradezco la amistad que he recibido de Adrianita, las caminatas a casa, donde charlando de la tesis y de la vida el tiempo se nos hizo corto, al igual que con Clara, que entre mates, dulce de leche y bocadillos compartimos muchas horas. De la misma forma quiero agradecer a Patricia Pardo que entre los aparatos de laboratorio, siempre tuvo tiempo, voluntad y cariño para ayudarme con la tesis, cuyo asesoramiento se trasformó en amistad.

Gracias también a los amigos que en algún momento hemos compartido varias horas de laboratorio, y experiencias pre-doctorales, quines además han dejado huellas de cariño importantes en mi vida en España, María, Erika, Bibiana, Olimpia, Jordi, Rodolfo, Khanta, Chen, Tulio, Fortunato, Mashi, Manel, Francesc, Beatriz, Carmen, Jauma (gracias por los cafés y las charlas), Ulises, Gerardo; y a todos aquellos que de alguna manera han estado presentes en los momentos cruciales de este proceso, Nati (y familia), María José y Juan, Cándor, Quino y Isabel, Martha (y familia), Javier, Kathryn, Eva, Pedro, Flavia, Alexandra y Daniela, a todos y cada uno de ellos, gracias.

Mi gratitud a toda la gente del departamento de Ingeniería del Transporte y Territorio, cuyos pretextos deportivos nos unieron en tertulias de viernes, Francesc Robusté, Félix Pérez, Rodrigo Miró, Manuel Herce, Francesc Magrinyà, Miriam, Clara, Luís, Carlas, Miguel, Jorge (s), Félix Caicedo, Paulo, Álvaro, Mauricio, Patricia, Sonia, Miquel, Cristian, Dante, Magín, Margarita, Hugo, Adrián, Carlos, Lisandro, José, Juan y Mario. Y a quienes omito en esta lista, pero no en su momento ha sido parte de este magnifico equipo.

En el transcurso de estos años de investigación, la vida me ha brindado la posibilidad de compartir momentos importantes con amigos entrañables a quienes quiero agradecer de corazón el tiempo y las experiencias vividas, a los hermanos Javier y Fernando Zalamea, Boris, Diego, Rodrigo, Paz (y familia), Bertha, Chio (y familia), María Augusta (y familia), Rene, Oswaldo, Yamile, Catalina, Mónica (y familia), Sonia, Claudia (y familia) y Manuel. También quiero extender mi agradecimiento a toda la gente que me enseñó algo más de este país, Miguel y Natalia, Kelly, Cecilia, Leoncito, Willam, María Antonia y a toda la asociación de emigrantes ecuatorianos LLactacaru.

Gracias a las chicas del colegio de ingenieras civiles de Pichincha que por todos los medios han ido apoyándome en el transcurso de estos años, a las campeonas del CICE, a las mejores, a ellas que se merecen todos los elogios, por ser luchadoras, por ser mi ejemplo. Entre ellas a Zoilita con quien compartí momentos en Barcelona, a Silvia (y familia) mi vecina de corazón y de San Juan. Y en especial a Adriana Acosta por tu amistad sincera e incondicional, por ser la hermana, amiga, socia y comadre, por todo lo que representas en mi vida. Gracias.

Gracias por los interminables momentos de felicidad que me brindaron sus correos, Lili y Belén (San Juan), Germán y Patricio (ESPE), Fernando y a todos los amigos cuyas voces de alguna manera ha perdurado en mi universo, Mirian (y familia López Ruiz), Fernando y Prisca (y familia), Sabine (y familia), Simóne (y familia), Evelyn, por que los verdaderos amigos siempre perduran, a mis primas Margarita (y familia) y Patricia (y familia), por todo lo que significan para mi.

De forma especial quiero agradecer el inmenso amor y paciencia que he recibido de mis familiares, las oraciones, los mensajes, y todos los detalles de cariño que en general me han

brindado las familias Flor – Granda (también añado a mi primo Miguelito Encalada y familia) y en particular a mi Madre Ercilla por todo lo que haces cada día, porque tu cariño es inmenso. A mi Padre Fede, que es la fuente de inspiración, protección y apoyo. A Eduardito mi hermanito y amigo, que en estos años me ha regalado una nueva familia. A Galito por ser mi ángel protector, por ser ejemplo, y amor. Quiero agradecer de corazón a mi familia política, a mi suegrita María José su solidaridad, a mi suegri José su apoyo, a la Avia su ternura, y a toda mi nueva familia. Sólo tener está hermosa y gran familia ya es motivo de agradecimiento a Dios.

A mi esposo José, el mayor de mis agradecimientos, por estar a mi lado, por apoyarme cada minuto de cada día. Por las terribles madrugadas, fríos y malas caras que tuviste que soportar, por que me ayudaste a terminar este camino y me alentaste en cada paso, por darme más raíces en este mundo, por ser el árbol que crece junto al mío y por que me dejas crecer. Por los innumerables viajes dentro y fuera de nosotros mismos. Por ti, por ellos, por Dios, y por FIN, hoy llego al final.

RESUMEN DE LA TESIS

En este trabajo se estudia el uso controlado de las escorias de incineración de residuos sólidos urbanos (EIRSU) en construcción, en particular en lo que se refiere a la sustitución parcial de áridos naturales para la fabricación de hormigón compactado y grava-cemento, y la aplicación en un tramo experimental de carretera. Para ello, se han considerado las prestaciones mecánicas, de durabilidad y el impacto ambiental que derivados del empleo de las EIRSU.

Para determinar el uso controlado de las EIRSU, primero se realizó un análisis comparativo entre las EIRSU y los áridos naturales, en lo que respecta a su caracterización como áridos para hormigón compactado y grava-cemento; esto permitió predecir los potenciales problemas que presentan las EIRSU en estas matrices. Posteriormente, se determinó la dosificación más apropiada en términos de resistencia y durabilidad del hormigón compactado y la grava-cemento, fabricados con mezclas de áridos finos de origen natural y EIRSU de la fracción 5-12 mm. Asimismo, dentro de la presente tesis se realizó el estudio y puesta en obra de un tramo experimental de carretera, en el que se utilizaron las dosificaciones previamente determinadas en el laboratorio, para reparación de baches, y capas de firmes. El tramo experimental de carretera sirvió para realizar un seguimiento a corto plazo del comportamiento de estos materiales, con el objetivo de obtener resultados reales del uso de las EIRSU en este tipo de obras. Finalmente, se realizó el estudio del impacto medioambiental que produce la utilización del EIRSU en matrices tratadas con cemento (utilizando cemento Pórtland y áridos finos de origen natural), mediante el análisis de lixiviados.

Los estudios citados ponen de manifiesto que las EIRSU de la fracción 5-20 mm, son una buena alternativa de reemplazo parcial de áridos naturales para capas de firme de hormigón compactado y grava-cemento, con resistencias mecánicas similares a las exigidas por el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para el tipo de obras estudiadas, así como presentan un buen comportamiento ambiental dentro del periodo analizado en la presente tesis.

Abstract

This study is focused on the controlled use of municipal solid waste incineration (MSWI bottom ash) for construction, particularly, on the partial substitution of natural aggregates used for roller-compacted concrete and cement-treated bases manufacture. An experimental track has been constructed. Mechanical and durability behavior have been considered, as well as the environmental impact of using MSWI.

To determine the controlled use of MSWI, first of all it was carried out a comparative analysis between MSWI and natural aggregates, considering its characterization as aggregates for roller-compacted concrete and cement-treated bases; this study allowed to predict the potential problems that MSWI can produce on these matrices. Afterwards, it was determined the most appropriate design taking into account the resistance and durability of both roller-compacted concrete and cement-treated bases manufactured using a fine natural aggregate and MSWI (the 5-12 fraction) mixture. In the present thesis it has also been studied and constructed a road experimental track, using the designs made at laboratory for pothole repair and pavement layers. The experimental track was used to study the short-term behavior of these materials with the objective to obtain real results of the use of MSWI in this kind of works. Finally it was made the environmental impact study caused by the addition of MSWI to cement matrices (using Portland cement and natural fine aggregates). This study was made by means of a lixiviation analysis.

The studies before mentioned reveal that 5-20 mm MSWI fraction is a good alternative to replace partially natural aggregates for rolled-compacted concrete and cement-treated bases pavement layers, provided that they give similar resistances to the ones demanded on the Spanish Technical Specifications for the type of works studied. Likewise, they have had a good environmental performance during the period analyzed in this thesis.

Agradecimientos **I**

Resumen de la tesis **II**

Abstract **III**

ÍNDICE GENERAL

Glosario General **IV**

1 Introducción **1.1**

1.1	Antecedentes.....	1.1
1.2	Objetivo.....	1.4
1.3	Metodología.....	1.5

2 Estado del conocimiento **2.1**

2.1	Introducción	2.1
2.2	Residuos sólidos urbanos (RSU).....	2.2
2.2.1	Definición.....	2.2
2.2.2	Materiales constituyentes.....	2.3
2.2.3	Gestión.....	2.4
2.2.3.1	Gestión de RSU en Cataluña.....	2.5
2.3	La incineración de RSU.....	2.7
2.3.1	Generalidades de la incineración.....	2.7
2.3.2	Proceso de incineración y tratamiento.....	2.9
2.3.3	Aspectos relativos a las plantas de incineración y tratamiento de RSU de Mataró y Tarragona.....	2.12
2.3.3.1	Planta de Mataró.....	2.13
2.3.3.2	Planta de Tarragona.....	2.15
2.3.4	Factores que influyen en los subproductos de incineración.....	2.17
2.3.5	La escograva.....	2.18

2.4	Escorias de incineración de residuos sólidos urbanos (EIRSU).....	2.19
2.4.1	Definición de EIRSU.....	2.19
2.4.2	Caracterización.....	2.20
2.4.3	Tratamiento.....	2.24
2.4.3.1	Estabilización y solidificación.....	2.24
2.4.3.2	Integración de las EIRSU en matrices cementantes.....	2.27
2.4.4	Utilización de las EIRSU.....	2.30
2.4.5	Normativas relacionadas con EIRSU.....	2.33
2.4.5.1	Recomendaciones generales del Internacional Ash Working Group (IAWG) sobre la utilización de residuos de incineración.....	2.34
2.4.5.2	Como residuo industrial generado.....	2.36
2.4.5.3	Según la legislación medio ambiental.....	2.36
2.4.5.4	Como áridos para hormigón compactado (HC) y Grava-cemento (G-C).....	2.38
2.5	Estudio de pavimentos con HC y G-C.....	2.38
2.5.1	Definición.....	2.38
2.5.2	Características principales del HC y G-C.....	2.38
2.5.3	Experiencias de pavimentos con HC en España.....	2.40
2.5.4	Secciones estructurales utilizadas.....	2.40
2.5.5	Áridos, cemento y dosificaciones recomendadas.....	2.41
2.5.6	Fabricación y puesta en obra.....	2.43

3 Caracterización de las EIRSU 3.1

3.1	Introducción.....	3.1
3.2	Evaluación de las EIRSU de Cataluña.....	3.2
3.3	Caracterización de las EIRSU de Mataró y Tarragona como áridos para hormigón.....	3.12
3.3.1	Cualidades y tamaños de muestra de EIRSU.....	3.13
3.3.2	Objetivo y planteamiento experimental de la caracterización.....	3.14
3.3.3	Ensayos físicos.....	3.15
3.3.3.1	Muestreo.....	3.15
3.3.3.2	Humedad, densidad, absorción y porosidad.....	3.16
3.3.4	Granulometría.....	3.19

3.3.5	Índice de lajas.....	3.22
3.3.6	Resistencia al desgaste: coeficiente Los Ángeles.....	3.23
3.3.7	Coeficiente de forma.....	3.25
3.3.8	Caras de fractura y textura superficial.....	3.26
3.3.9	Composición química.....	3.28
3.3.9.1	Composición elemental de la escoria.....	3.30
3.3.9.2	Determinación de los sulfatos totales, sulfatos solubles en agua, contenido de azufre y cloruros.....	3.33
3.3.9.3	Contenido de materia orgánica.....	3.36
3.3.10	Análisis mineralógico.....	3.37
3.3.11	Clasificación de los tipos de materiales constituyentes en las EIRSU.....	3.43
3.3.12	Determinación de la durabilidad de las EIRSU a ciclos de hielo- deshielo (ensayo de sulfato de Magnesio).....	3.46
3.4	Conclusiones del capítulo.....	3.47

4 Estudios de las EIRSU en hormigón compactado (HC) y grava- cemento (G-C) 4.1

4.1	Introducción.....	4.1
4.2	Especificaciones sobre el cemento y los áridos utilizados utilizados en G-C y HC.....	4.2
4.2.1	Especificaciones del cemento utilizado.....	4.2
4.2.2	Especificaciones sobre los áridos utilizados.....	4.3
4.3	Recomendaciones sobre G-C y HC del PG-3/2002 y el IECA.....	4.3
4.3.1	Grava-cemento (G-C).....	4.3
4.3.2	Hormigón compactado (HC).....	4.6
4.4	Dosificaciones para G-C y HC según el PG-3/2002 y el IECA (2003).....	4.8
4.4.1	Método de dosificación.....	4.8
4.4.2	Recomendaciones del PG-3/2002 artículo 513 para G-C y IECA (2003)	4.9
4.4.3	Recomendaciones del PG-3/2002 artículo 516 para HC y IECA (2003).....	4.10
4.4.4	Estudio Teórico.....	4.11
4.4.5	Estudio experimental.....	4.13

4.4.6	Corrección de la dosificación.....	4.15
4.4.7	Fabricación y nomenclatura de los HCEM y G-CEM.....	4.16
4.5	Características físicas del HC y G-C endurecidos.....	4.17
4.5.1	Resistencia a compresión.....	4.17
4.5.2	Resistencia a tracción indirecta.....	4.18
4.5.3	Módulo de Elasticidad.....	4.20
4.5.4	Análisis de los resultados obtenidos en los HCEM y G-CEM.....	4.21
4.6	Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice.....	4.23
4.7	Conclusiones del capítulo.....	4.27

5 Aplicación de las EIRSU, como áridos en la fabricación de grava – cemento y hormigón compactado, en un tramo experimental de

carretera **5.1**

5.1	Introducción.....	5.1
5.2	Justificación del estudio.....	5.3
5.3	Objetivos y planteamiento experimental.....	5.4
5.4	Objetivos y planteamiento del tramo experimental de Tagamanent.....	5.5
5.5	Proyecto.....	5.6
5.5.1	Emplazamiento de la obra.....	5.6
5.5.2	Materiales componentes.....	5.7
5.5.3	Especificaciones del proyecto.....	5.8
5.5.4	Descripción de la obra ejecutada.....	5.9
5.6	Proceso de construcción.....	5.14
5.6.1	Estado inicial.....	5.14
5.6.2	Trabajos previos.....	5.14
5.6.3	Recogida de las Ec.....	5.15
5.6.4	Transporte, colocación y compactación del material.....	5.16
5.6.5	Acabado superficial.....	5.17
5.6.6	Losas de HC y G-C.....	5.19
5.6.7	Construcción de las cubetas destinadas a la simulación de baches.....	5.20
5.6.7.1	Instrumentación de los baches.....	5.20
5.6.7.2	Recogida de lixiviados.....	5.22

5.7	Caracterización de los materiales utilizados.....	5.23
5.7.1	Características físicas.....	5.24
5.7.2	Granulometría.....	5.26
5.7.3	Composición química.....	5.28
5.7.4	Análisis mineralógico.....	5.31
5.7.5	Materiales componentes de las EIRSU.....	5.33
5.7.6	Estudio de la durabilidad.....	5.34
5.8	Dosificación de la G-C y HC.....	5.36
5.8.1	Generalidades.....	5.36
5.8.2	Nomenclatura utilizada.....	5.36
5.8.3	Estudio Teórico.....	5.38
5.8.4	Estudio experimental.....	5.40
5.8.5	Corrección de las dosificaciones para la carretera.....	5.40
5.9	Comportamiento a corto y largo plazo del tramo experimental.....	5.42
5.9.1	Ensayos mecánicos.....	5.42
5.9.2	Resultados de los ensayos mecánicos del HC.....	5.43
5.9.3	Resultados de los ensayos mecánicos de la G-C.....	5.45
5.9.4	Análisis de los resultados mecánicos.....	5.46
5.9.5	Deterioro del tramo experimental de carretera, posterior a los 90 días de edad.....	5.48
5.10	Fisuras y manchas.....	5.50
5.11	Conclusiones del tramo experimental de carretera.....	5.53

6 Impacto ambiental de EIRSU sueltas y como áridos en G-C y HC 6.1

6.1	Introducción.....	6.1
6.2	Condiciones de entorno de las EIRSU frente a los lixiviados.....	6.2
6.2.1	Lixiviación.....	6.2
6.2.2	Definición del escenario de lixiviación.....	6.3
6.2.3	Test de lixiviación por disponibilidad NEN 7341.....	6.5
6.2.4	Test de lixiviación por difusión o monolítico NEN 7345.....	6.7
6.3	Muestras sometidas a los test de lixiviación.....	6.10
6.3.1	Muestras sometidas al test NEN 7341.....	6.11
6.3.2	Muestras sometidas al test NEN 7345.....	6.13

6.4	Resultados de los test de lixiviación.....	6.14
6.4.1	Resultados del test de disponibilidad NEN 7341 de las EIRSU seltas (sin cemento Pórtland).....	6.14
6.4.2	Resultados del test de disponibilidad NEN 7341 de las EIRSU integradas en sistemas con cemento Pórtland.....	6.21
6.4.3	Resultados del test de difusión NEN 7345 (Tank leaching test o monolítico) de las EIRSU integradas en sistemas con cemento Pórtland	6.29
6.4.4	Resultados de lixiviación del subtramo de bacheo de grava- cemento con EIRSU y arena natural.....	6.32
6.5	Conclusiones del capítulo.....	6.36

7 Conclusiones e investigaciones futuras 7.1

7.1	Introducción.....	7.1
7.2	Conclusiones Generales.....	7.2
7.3	Conclusiones Específicas.....	7.3
7.3.1	Conclusiones relativas a la etapa de caracterización	7.3
7.3.2	Conclusiones relativas a la etapa de hormigón compactado y grava-cemento con EIRSU.....	7.5
7.3.3	Conclusiones relativas a la etapa de aplicación en un tramo experimental de carretera.....	7.5
7.3.4	Conclusiones relativas a la etapa de estudio de impacto ambiental.....	7.6
7.4	Investigaciones futuras.....	7.8

Bibliografía B.1

Anexos A.1

LISTA DE TABLAS		Pág.
Tabla 2.1	Gestión de residuos sólidos urbanos en España y Cataluña (1996). Fuente: Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 1997) y Generalitat de Cataluña. (Departamento de Medio Ambiente, Junta de Residuos).	2.6
Tabla 2.2	Tipos de materiales residuales producidos por la combustión de los RSU. Fuente: Alba, N. et. al. 1998.	2.9
Tabla 2.3:	Municipios del Maresme y la cantidad de RSU (en toneladas) incinerados en el año 1999. Fuente: Informe V (2001).	2.14
Tabla 2.4:	Evolución histórica y la actividad de la planta de incineración de RSU de Tarragona. Fuente: Informe V(2001).	2.16
Tabla 2.5:	Rangos de composición elemental de las EIRSU para incineradoras tipo “mass burn” (Wiles, 1994).	2.21
Tabla 2.6:	Las aplicaciones de las EIRSU en carreteras, en algunos países europeos. Fuente: resumen de utilización de EIRSU por países. (Informe V, 2001).	2.33
Tabla 2.7:	Límites establecidos en el anexo 1 de la Orden del 15 de Febrero de 1996, sobre valorización de EIRSU del Departamento de Medio Ambiente (1996).	2.37
Tabla 2.8	Husos granulométricos incluidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3/2002. Fuente: Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3/2002 del Ministerio de Fomento.	2.42
Tabla 2.9	Dosificaciones de los áridos para hormigón compactado. Fuente: Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3/2002 del Ministerio de Fomento.	2.43
Tabla 3.1:	Clasificación de los tipos de materiales constituyentes en las EIRSU todo uno (excepto la fracción 0-5 mm), en función de la planta de incineración de origen. Fuente: Informe V (2001).	3.4
Tabla 3.2:	Porcentaje de filler en las muestras de EIRSU todo uno (dependiendo de la planta de incineración que da origen a las EIRSU. Fuente: Informe V (2001).	3.6
Tabla 3.3:	Comparación entre el contenido de Al y Ti (mg/kg) en la litosfera y en los suelos, con los contenidos en las escorias de todo el mundo y EIRSU todo uno de Cataluña. Fuente: Informe V (2001).	3.7
Tabla 3.4:	Resultados de la cantidad de mercurio (Hg) en las EIRSU todo uno de Tarragona. Fuente: Informe V (2001).	3.8
Tabla 3.5:	Resultados de los porcentajes de pérdida a fuego de las EIRSU todo uno de las incineradoras de Cataluña. Fuente: Informe V (2001).	3.8
Tabla 3.6:	Resultados del PH y conductividad de las EIRSU todo uno de las incineradoras de Cataluña. Fuente: Informe V (2001).	3.10
Tabla 3.7:	Resultados de densidades, porosidades y absorciones de las partículas de EM5-12, EM12-20, ET5-12 y ET12-20.	3.17
Tabla 3.8:	Masa de las muestras de ensayo para áridos de densidad normal de partícula (normativa EN 933-1).	3.19
Tabla 3.9:	Resultados de la granulometría.	3.20
Tabla 3.10:	Resultados del ensayo del Índice de lajas.	3.22
Tabla 3.11:	Resultados del ensayo de desgaste Los Ángeles.	3.24
Tabla 3.12:	Resultados del ensayo de coeficiente de forma.	3.26
Tabla 3.13:	Elementos mayoritarios y minoritarios de las EIRSU de Mataró y Tarragona en porcentaje de óxidos.	3.31
Tabla 3.14:	Concentraciones de metales encontrados en las EIRSU en diferentes estudios (mg/kg). Fuente: Alba, N. (1998).	3.33
Tabla 3.15:	Resultados de los ensayos para la determinación de sulfatos solubles en ácido, sulfatos solubles en agua, azufre y cloruros solubles en agua.	3.36

Tabla 3.16:	Resultados del contenido de materia orgánica por pérdida de peso por calcinación.	3.37
Tabla 3.17:	Resultados de la composición mineralógica de las EIRSU de Mataró y Tarragona.	3.38
Tabla 3.18:	Resultados de DRX en las EM, ET y otros estudios de EIRSU.	3.41
Tabla 3.19:	Resultados de los materiales constituyentes en las muestras de EIRSU de Mataró y Tarragona.	3.44
Tabla 3.20:	Resultados del ensayo de sulfato de magnesio.	3.47
Tabla 4.1:	Características del tipo de cemento utilizado en la fabricación del HC y G-C.	4.2
Tabla 4.2:	Recomendaciones del PG-3/2002, Artículo 513, para áridos en G-C. Resultados obtenidos en las EM y arena natural (AN1/0/5).	4.5
Tabla 4.3:	Recomendaciones del PG-3/2002, Artículo 516 y IECA (2003), para áridos en HC y resultados obtenidos en las EM y AN1/0-5.	4.7
Tabla 4.4:	Dosificaciones de los áridos para HC. Fuente: IECA (2003).	4.8
Tabla 4.5:	Husos granulométricos para la G-C según las especificaciones del PG-3/2002.	4.9
Tabla 4.6:	Husos granulométricos para el HC del PG-3/2002 extrapolables en vías de baja intensidad de tráfico.	4.10
Tabla 4.7:	Dosificación del HCEM con 14% de cemento (HCEM14).	4.11
Tabla 4.8:	Dosificación de la G-CEM con 4% de cemento (G-CEM4).	4.11
Tabla 4.9:	Resultados del ensayo proctor modificado.	4.14
Tabla 4.10:	Dosificación para el H-CEM14 con la corrección por densidades.	4.15
Tabla 4.11:	Dosificación para la G-CEM4 con la corrección por densidades.	4.15
Tabla 4.12:	Nomenclatura de los HCEM y porcentajes de cemento corregidos.	4.16
Tabla 4.13:	Nomenclatura de las G-CEM y porcentajes de cemento corregidos.	4.16
Tabla 4.14:	Resultados obtenidos en los HCEM.	4.21
Tabla 4.15:	Resultados obtenidos en las G-CEM.	4.22
Tabla 4.16:	Resultados del ensayo álcali-sílice de las EM y ET.	4.24
Tabla 5.1:	Características Físicas de las EIRSU.	5.24
Tabla 5.2:	Granulometría de las EIRSU.	5.26
Tabla 5.3:	Resultados de la composición Química.	5.28
Tabla 5.4:	Composición mineralógica.	5.31
Tabla 5.5:	Materiales componentes de las EIRSU.	5.33
Tabla 5.6:	Resultados del estudio de durabilidad de las EIRSU.	5.34
Tabla 5.7:	Nomenclatura de las probetas proctor modificado -PM- fabricadas en el laboratorio con mezclas de muestras de EM del mes de Marzo de 2001 de las fracciones 5-12 mm y 12-20 mm + AN1/0-5 (capítulo 4).	5.37
Tabla 5.8:	Nomenclatura de las probetas proctor modificado -PM- fabricadas en el laboratorio con mezclas de Ec (EIRSU de Mataró del mes de Noviembre de 2001 utilizadas en la carretera) de las fracciones 5-12 mm y 12-20 mm + AN2/0-5.	5.37
Tabla 5.9:	Nomenclatura de los testigos extraídos del tramo experimental de carretera, fabricados con muestras de Ec de las fracciones 5-12 mm y 12-20 mm + AN2/0-5.	5.37
Tabla 5.10:	Nomenclatura de los testigos extraídos de la carretera experimental, fabricados con muestras de áridos naturales utilizados en la carretera.	5.37
Tabla 5.11:	Dosificación del HC con EIRSU.	5.38
Tabla 5.12:	Dosificación de la G-C con EIRSU.	5.39
Tabla 5.13:	Resultados del ensayo proctor modificado.	5.40
Tabla 5.14:	Dosificación (corregidas por densidad) para HC y G-C con EIRSU.	5.41

Tabla 5.15:	Resultado de los ensayos mecánicos del hormigón compactado.	5.44
Tabla 5.16:	Resultado de los ensayos mecánicos de la grava-cemento.	5.45
Tabla 5.17:	Comportamiento mecánico del tramo experimental de carretera a los 365 días de edad en el subtramo de HC.	5.49
Tabla 5.18:	Comportamiento mecánico del tramo experimental de carretera a los 365 días de edad en el subtramo de G-C.	5.49
Tabla 5.19:	Fisuras.	5.51
Tabla 6.1:	Valores de Em _{ax} 1%, Em _{ax} 5% y Em _{ax} 10%.	6.7
Tabla 6.2:	Valores límite U1 y U2 según la NEN7345.	6.9
Tabla 6.3:	Resultados del test de disponibilidad NEN 7341 de las escorias sueltas (escorias sin cemento) en mg/kg.	6.15
Tabla 6.4:	Resultados del análisis químico y de lixiviación de aquellos metales detectados en las muestras de EM en mg/kg.	6.17
Tabla 6.5:	Resultados del análisis químico y de lixiviación de aquellos metales detectados que también de la muestras de ET en mg/kg.	6.17
Tabla 6.6:	Resultados del análisis químico y de lixiviación de aquellos metales detectados que también de la muestras de Ec en mg/kg.	6.17
Tabla 6.7 :	Test de disponibilidad NEN 7341 de las EIRSU en matrices compactadas con cemento Pórtland en mg/kg.	6.22
Tabla 6.8:	Test de difusión NEN 7345 de las escorias tratadas con cemento Pórtland, en materiales monolíticos de G-C y HC realizados con las dosificaciones seleccionadas.	6.30
Tabla 6.9:	Valores de lixiviación del agua recogida en el subtramo de bacheo grava-cemento con Ec (G-CEc), sin tomar en cuenta: el área lixiviada y el volumen de la G-CEc.	6.33
Tabla 6.10:	Valores de lixiviación de los iones considerados en la norma holandesa Building materials Decree, provenientes del subtramo G-CEc.	6.33
Tabla 6.11:	Iones lixiviados procedentes del subtramo G-CEc (sin los lixiviados del agua corriente).	6.34
Tabla 6.12:	Comparación entre Em _{ax} 1% (Norma Holandesa Building Materials Decree), Em _{ax} 5%, Em _{ax} 10% y los materiales lixiviados procedentes del subtramo de G-CEc (sin los lixiviados del agua corriente) con respecto a la relación L/S de 0,006.	6.36

LISTA DE GRAFICOS		Pág.
Gráfico 2.1:	Comparación de los RSU en los países industrializados y en los países en vías de desarrollo. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente, 1997.	2.3
Gráfico 2.2:	Gestión de residuos sólidos urbanos en España y Cataluña (1996). Fuente: Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 1997), Generalitat de Cataluña (Departamento de Medio Ambiente, Junta de Residuos).	2.6
Gráfico 2.3:	Gráfico comparativo de las opciones de tratamiento de los RSU en Cataluña en el año 1997 y las previsiones del PMGRM al 2006 (Entidad Metropolitana de Medio Ambiente, 2004).	2.8
Gráfico 3.1:	Porcentajes de materiales que componen la EIRSU todo uno dependiendo de la planta de incineración. Fuente: Informe V (2001).	3.5
Gráfico 3.2:	Granulometría de: EM5-12 y ET5-12.	3.20
Gráfico 3.3:	Granulometría de: EM12-20 y ET12-20.	3.20
Gráfico 3.4:	Comparación del Cr, Zn, Pb, y Ni con EIRSU de otras plantas de incineración.	3.33

Gráfico 3.5:	DRX de las EM5-12.	3.39
Gráfico 3.6:	DRX de las EM12-20.	3.39
Gráfico 3.7:	DRX de las ET5-20.	3.40
Gráfico 3.8:	DRX de las ET12-20.	3.40
Gráfico 3.9:	Comparación entre los porcentajes de materiales constituyentes en las EM y ET.	3.44
Gráfico 4.1:	Granulometría para la dosificación del HCEM14.	4.12
Gráfico 4.2:	Granulometría para la dosificación de la G-CEM4.	4.12
Gráfico 4.3:	Proctor modificado de la G-CEM4 y HCEM14.	4.15
Gráfico 4.4:	Tracción indirecta del HCEM con diferentes porcentajes de cemento.	4.21
Gráfico 4.5:	Compresión de la G-CEM con diferentes porcentajes de cemento.	4.22
Gráfico 4.6:	Expansiones de las muestras de EM y ET por la reacción álcali-sílice.	4.26
Gráfico 5.1:	Características Físicas de las EIRSU.	5.24
Gráfico 5.2:	Granulometría de las EM5-12, ET5-12 y Ec5-12.	5.27
Gráfico 5.3:	Granulometría de las EM12-20, ET12-20, y Ec12-20.	5.27
Gráfico 5.4:	Composición elemental de las EIRSU. Elementos mayoritarios (% de Óxidos).	5.29
Gráfico 5.5:	Composición elemental de las EIRSU estudiadas. Elementos minoritarios (mg/kg).	5.29
Gráfico 5.6:	Sulfatos totales, sulfatos solubles en agua, azufre y cloruros solubles en agua.	5.30
Gráfico 5.7:	DRX de las Ec5-12.	5.32
Gráfico 5.8:	DRX de las Ec2-20.	5.32
Gráfico 5.9:	Materiales componentes de las EIRSU.	5.33
Gráfico 5.10:	Reacción álcali-sílice de las EIRSU.	5.35
Gráfico 5.11:	Dosificación del HCEc (cemento:14%; Ec12-20:38%; Ec5-12:16; AN2/0-5:32%).	5.38
Gráfico 5.12:	Dosificación de la G-CEc (cemento=4%; Ec12-20=40%; Ec5-12=15%; AN2/0-5=41%).	5.39
Gráfico 5.13:	Dosificación del HC y G-C con EIRSU.	5.41
Gráfico 5.14:	Resultados de los ensayos a tracción indirecta sobre los testigos de HC (THC).	5.44
Gráfico 5.15:	Resultados de los ensayos a tracción indirecta a 28 días de edad, sobre los testigos de HC y límites exigidos por el PG-3/2002 y sugeridos por el IECA (2003).	5.44
Gráfico 5.16:	Resultados de los ensayos a compresión simple sobre los testigos de G-C (TG-CEc).	5.45
Gráfico 5.17:	Resultados de los ensayos a compresión simple a los 28 días de edad, sobre los testigos de G-C y límites recomendados por el IECA (2003).	5.46
Gráfico 5.18:	Resistencia a compresión del tramo de carretera a los 365 días de edad.	5.49
Gráfico 6.1:	Resultados del test 7341 de EIRSU sueltas – Ba.	6.6
Gráfico 6.2:	Resultados del test 7341 de EIRSU sueltas – Cu.	6.6
Gráfico 6.3:	Resultados del test 7341 de EIRSU sueltas – Co.	6.6
Gráfico 6.4:	Resultados del test 7341 de EIRSU sueltas – Ni.	6.6
Gráfico 6.5:	Resultados del test 7341 de EIRSU sueltas – Pb.	6.6
Gráfico 6.6:	Resultados del test 7341 de EIRSU sueltas – Sn.	6.6
Gráfico 6.7:	Resultados del test 7341 de EIRSU sueltas – Zn.	6.6
Gráfico 6.8:	Iones lixiviados con el test 7341 y análisis químico de EM5-12.	6.8
Gráfico 6.9:	Iones lixiviados con el test 7341 y análisis químico de EM12-20.	6.8
Gráfico 6.10:	Iones lixiviados con el test 7341 y análisis químico de ET5-12.	6.8
Gráfico 6.11:	Iones lixiviados con el test 7341 y análisis químico de ET12-20.	6.8

Gráfico 6.12:	Iones lixiviados con el test 7341 y análisis químico de Ec5-12.	6.8
Gráfico 6.13:	Iones lixiviados con el test 7341 y análisis químico de Ec12-20.	6.8
Gráfico 6.14:	Iones lixiviados de las EIRSU sueltas, bajo el test 7341 y límites Emáx 1%, 5% y 10% - As, Cd, Co, Cr, Mo, Ni, Se, Sn, y Sb.	6.20
Gráfico 6.15:	Iones lixiviados de las EIRSU sueltas, bajo el test 7341 y límites Emáx 1%, 5% y 10% - Ba, Cu, Pb, Zn.	6.20
Gráfico 6.16:	Iones lixiviados de las EIRSU sueltas, bajo el test 7341 y límites Emáx 1%, 5% y 10% - cloruros y sulfatos.	6.21
Gráfico 6.17:	Test 7341 de EIRSU Tratadas con cemento Pórtland – Ba.	6.23
Gráfico 6.18:	Test 7341 de EIRSU Tratadas con cemento Pórtland – Cr.	6.23
Gráfico 6.19:	Test 7341 de EIRSU Tratadas con cemento Pórtland – Co.	6.23
Gráfico 6.20:	Test 7341 de EIRSU Tratadas con cemento Pórtland – Cu.	6.23
Gráfico 6.21:	Test 7341 de EIRSU Tratadas con cemento Pórtland – Ni.	6.24
Gráfico 6.22:	Test 7341 de EIRSU Tratadas con cemento Pórtland – Zi.	6.24
Gráfico 6.23:	Test 7341 de EIRSU Tratadas con cemento Pórtland – Pb.	6.24
Gráfico 6.24:	Test 7341 de EIRSU Tratadas con cemento Pórtland – Cloruros.	6.24
Gráfico 6.25:	Test 7341 de EIRSU Tratadas con tratadas – Sulfatos.	6.24
Gráfico 6.26:	Componentes lixiviados de las EIRSU tratadas con cemento Pórtland, bajo el test 7341 y límites Emáx 1%, 5% y 10% - Ba, Cu, Pb, Zn.	6.27
Gráfico 6.27:	Componentes lixiviados de las EIRSU tratadas con cemento Pórtland, bajo el test 7341 y límites Emáx 1%, 5% y 10% - Co, Cr y Ni.	6.27
Gráfico 6.28:	Componentes lixiviados de las EIRSU tratadas con cemento Pórtland, bajo el test 7341 y límites Emáx 1%, 5% y 10% - cloruros y sulfatos.	6.38
Gráfico 6.29:	Test 7345 de EIRSU Test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland –Ba.	6.30
Gráfico 6.30:	Test 7345 de EIRSU Test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland –Cr.	6.30
Gráfico 6.31:	Test 7345 de EIRSU Test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland –Cu.	6.31
Gráfico 6.32:	Test 7345 de EIRSU Test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland – V.	6.31
Gráfico 6.33:	Test 7345 de EIRSU Test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland – Zn.	6.31
Gráfico 6.34:	Test 7345 de EIRSU Test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland –Mo.	6.31
Gráfico 6.35:	Test 7345 de EIRSU Test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland – Cloruros.	6.31
Gráfico 6.36:	Test 7345 de EIRSU Test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland – Sulfatos.	6.31

LISTA DE FOTOS		Pág.
Foto 3.1:	EIRSU utilizadas en la identificación visual.	3.4
Foto 3.2:	Planta móvil de cribado, donde se fraccionó las EIRSU en 5-12 y 12-20 mm.	3.13
Foto 3.3:	Detalle de algunos de los materiales constituyentes en las EIRSU.	3.44
Foto 4.1:	Máquina de proctor modificado.	4.13

Foto 4.2:	Probeta de G-CEM ensayada a compresión.	4.18
Foto 4.3:	Ensayo a tracción indirecta y probetas de HCEM14 rotas a compresión y tracción indirecta.	4.19
Foto 4.4:	Morteros de EM5-12 y EM12-20 y detalle de las dos probetas con EM y ET.	4.26
Foto 4.5:	Detalle de dos probetas con EM y ET.	4.26
Foto 5.1:	Carretera ubicada en un corte de montaña.	5.14
Foto 5.2:	Preparación de la explanada.	5.15
Foto 5.3:	Proceso de cribado de las Ec.	5.15
Foto 5.4:	Pequeños muros de contención lateral.	5.16
Foto 5.5:	Rodillo vibrante.	5.17
Foto 5.6:	Fratasado del subtramo de HC (izquierda) y G-C (derecha).	5.18
Foto 5.7:	Extensión del árido natural todo uno.	5.19
Foto 5.8:	Losas de HC y G-C.	5.19
Foto 5.9:	Tela asfáltica para impermeabilizar la zona de bacheo.	5.20
Foto 5.10:	Extendido de la tela asfáltica, tubería de captación de lixiviados y extensión de una capa de áridos gruesos de origen natural.	5.21
Foto 5.11:	Subtramo de G-C instrumentado.	5.22
Foto 5.12:	Arqueta de lixiviados.	5.22
Foto 5.13:	Bidón de recogida de lixiviados.	5.22
Foto 5.14:	Carretera con hielo y nieve.	5.43
Foto 5.15:	Extracción de los testigos.	5.43
Foto 5.16:	Deterioro de la carretera por el uso de maquinaria pesada, utilizada para extraer los árboles que se encontraban a los dos lados del camino.	5.48
Foto 6.1:	EIRSU 5-12 y 12-20, cemento y la arena natural utilizados en la fabricación de las probetas de HC y G-C, y que fueron sometidas a los test de lixiviación.	6.4
Foto 6.2:	Test de lixiviación por disponibilidad NEN 7341.	6.5
Foto 6.3:	Test de lixiviación por difusión o monolítico NEN 7345 – recipiente donde se sumergieron los testigos monolíticos de HC y G-C.	6.8
Foto 6.4:	Test de lixiviación por difusión o monolítico NEN 7345 – recipientes de extracción periódica de los lixiviados.	6.8
Foto 6.5:	Muestras de EIRSU sueltas de la fracción 5-12 (izquierda) y 12-20 mm (derecha).	6.15
Foto 6.6:	EIRSU integradas en un sistema con cemento Pórtland (tratadas con cemento Pórtland).	6.22
Foto 6.7:	Materiales monolíticos sometidos al test de lixiviación NEN 7345.	6.29

	LISTA DE FIGURAS, MAPAS, ESQUEMAS Y DETALLES.	Pág.
Figura 3.1:	Plantas de incineración de RSU en Cataluña.	3.3
Mapa 5.1:	Ubicación del tramo experimental de carretera (dentro de la comunidad autónoma de Cataluña).	5.7
Esquema 5.1:	Esquema constructivo del tramo experimental de carretera.	5.12
Detalle 1:	Detalle 1: Tramo instrumentado de grava-cemento.	5.13

LISTA DE ANEXOS		Pág.
Anexo A.1	A1: Planta de incineración y tratamiento de residuos sólidos urbanos. A.1.1: Planta de incineración de residuos sólidos urbanos. A.1.2 Planta de tratamiento y valorización de EIRSU.	A.1 A.2 A.16
Anexo A.2	A.2: Tanteo de las dosificación para el HC y G-C de EM A.2.1 Diferentes tanteos de dosificación para el hormigón compactado. A.2.2 Diferentes tanteos de dosificación para la grava-cemento. A.2.3 Correcciones de las dosificaciones por densidades del HC. A.2.4 Correcciones de las dosificaciones por densidades de la G-C. A.2.5 Nuevas dosificaciones del hormigón compactado. A.2.6 Nuevas dosificaciones de la grava-cemento.	A.20 A.21 A.26 A.31 A.33 A.37 A.40
Anexo A.3	A.3: Tanteo de las dosificación para el HC y G-C de la carretera A.3.1 Diferentes tanteos de dosificación para la grava-cemento de la carretera. A.3.2 Diferentes tanteos de dosificación para el hormigón compactado de la carretera.	A.43 A.54 A.49

GLOSARIO GENERAL

Glosario de términos.

RSU: Residuos sólidos urbanos.
 EIRSU: Escorias de incineración de RSU.
 EM: EIRSU de la planta de Mataró.
 ET: EIRSU de la planta de Tarragona.
 HC: Hormigón compactado.
 G-C: Grava-cemento compactada.
 PM: Proctor modificado.

Glosario de los áridos artificiales.

1) Muestras de EIRSU de Mataró y Tarragona de las fracciones 5-12 mm y 12-20 mm, del mes de Marzo de 2001.

EIRSU de Mataró de la fracción 5-12 mm	(EM5-12)
EIRSU de Mataró de la fracción 12-20 mm	(EM12-20)
EIRSU de Tarragona de la fracción 5-12 mm	(ET5-12)
EIRSU de Tarragona de la fracción 12-20 mm	(ET12-20)

2) Muestras de EIRSU de Mataró de las fracciones 5-12 mm y 12-20 mm, del mes de Noviembre de 2001, utilizadas en la carretera.

EIRSU de carretera de la fracción 5-12 mm	Ec5-12
EIRSU de carretera de la fracción 12-20 mm	Ec12-20

Glosario de los áridos naturales.

1) Muestras de áridos naturales (arena natural) utilizados en el laboratorio para la fabricación de probetas proctor modificado.

Arena natural de la fracción 0-5 mm. Utilizada para la fabricación de las probetas PM en el laboratorio + EM5-12 + EM12-20	AN1/0-5
Arena natural de la fracción 0-5 mm. Utilizada para la fabricación de las probetas PM en el laboratorio + Ec5-12 + Ec12-20	AN2/0-5

2) Muestras de áridos naturales utilizados en la carretera.

Arena natural de la fracción 0-5 mm. Utilizada en la carretera para los subtramos de hormigón compactado y grava cemento con: Ec5-12 + Ec12-20	AN2/0-5
Arena natural de la fracción 0-3 y 3-5 mm. Utilizada en la carretera para los subtramos de hormigón compactado y grava cemento + áridos naturales gruesos	AN3/0-3 AN4/3-5
Árido natural grueso de la fracción 5-10 y 10-20 mm. Utilizada en la carretera para los subtramos de hormigón compactado y grava cemento + AN3/0-3 + AN4/3-5	G1-5/10 G2-10/20

Glosarios de las probetas.

1) Nomenclatura de las probetas PM fabricadas en el laboratorio con mezclas de muestras de EIRSU de Mataró de las fracciones 5-12 mm y 12-20 mm, del mes de Marzo de 2001 + AN1/0-5.

Probetas	Nomenclatura general	28 días de edad	90 días de edad	365 días de edad
Probetas PM fabricadas en el laboratorio con: EM5-12 + EM12-20 + AN1/0-5 para HC	HCEM	HCEM28d	HCEM90d	HCEM365d
Probetas PM fabricadas en el laboratorio con: EM5-12 + EM12-20 + AN1/0-5 para G-C	G-CEM	G-CEM28d	G-CEM90d	G-CEM365d

2) Nomenclatura de las probetas PM fabricadas en el laboratorio con mezclas de muestras de EIRSU de Mataró de las fracciones 5-12 mm y 12-20 mm, del mes de Noviembre de 2001, utilizadas en la carretera + AN2/0-5.

Probetas	Nomenclatura general	28 días de edad	90 días de edad	365 días de edad
Probetas PM fabricadas en el laboratorio con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para HC	HCEc	HCEc28d	HCEc90d	HCEc365d
Probetas PM fabricadas en el laboratorio con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para G-C	G-CEc	G-CEc28d	G-CEc90d	G-CEc365d

Glosario de los testigos extraídos de la carretera.

1) Nomenclatura de los testigos extraídos de la carretera experimental, fabricados con muestras de EIRSU de Mataró de las fracciones 5-12 mm y 12-20 mm, del mes de Noviembre de 2001 (Ec) + AN2/0-5.

Testigos	Nomenclatura General	28 días de edad	90 días de edad	365 días de edad
Testigos extraídos de la carretera con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para HC	THCEc	THCEc28d	THCEc90d	THCEc365d
Testigos extraídos de la carretera con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para G-C	TG-CEc	TG-CEc28d	TG-CEc90d	TG-CEc365d
Equivalente de la EIRSU sueltas dosificadas en el tramo de carretera.	Epc			

2) Nomenclatura de los testigos extraídos de la carretera experimental, fabricados con muestras de áridos naturales utilizados en la carretera.

Testigos	Nomenclatura General	28 días de edad	90 días de edad	365 días de edad
Testigos extraídos de la carretera en el subtramo de HC realizado con áridos naturales: AN3/0-3 AN4/3-5 + G1-5/10 G2-10/20	THCN	THCN28d	THCN90d	THCN365d
Testigos extraídos de la carretera en el subtramo de G-C realizado con áridos naturales: AN3/0-3 AN4/3-5 + G1-5/10 G2-10/20	TG-CN	TG-CN28d	TG-CN90d	TG-CN365d

GLOSARIO POR ORDEN ALFABÉTICO.

- AN1/0-5: Arena natural de la fracción 0-5 mm. Utilizada para la fabricación de las probetas PM en el laboratorio + M5-12 + M12-20.
- AN2/0-5: Arena natural de la fracción 0-5 mm. Utilizada para la fabricación de las probetas PM en el laboratorio + Ec5-12 + Ec12-20.
- AN3/0-3: Arena natural de la fracción 0-3. Utilizada en la carretera para los subtramos de hormigón compactado y grava cemento + áridos naturales gruesos.
- AN4/3-5: Arena natural de la fracción 3-5. Utilizada en la carretera para los subtramos de hormigón compactado y grava cemento + áridos naturales gruesos.
- Ec12-20: EIRSU de carretera de la fracción 12-20 mm.
- Ec5-12: EIRSU de carretera de la fracción 5-12 mm.
- EIRSU: Escorias de incineración de RSU.
- EM: EIRSU de la planta de Mataró.
- EM12-20: EIRSU de Mataró de la fracción 12-20 mm.
- EM5-12: EIRSU de Mataró de la fracción 5-12 mm.
- Epc: Equivalente de la EIRSU sueltas dosificadas en el tramo de carretera.
- ET: EIRSU de la planta de Tarragona.
- ET12-20: EIRSU de Tarragona de la fracción 12-20 mm.
- ET5-12: EIRSU de Tarragona de la fracción 5-12 mm.
- G1-5/10: Árido natural grueso de la fracción 5-10. Utilizado en la carretera para los subtramos de hormigón compactado y grava cemento + AN3/0-3 + AN4/3-5.
- G2-10/20: Árido natural grueso de la fracción 10-20 mm. Utilizado en la carretera para los subtramos de hormigón compactado y grava cemento + AN3/0-3 + AN4/3-5.
- G-C: Grava-cemento compactada.
- G-CEc: Probetas PM fabricadas en el laboratorio con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para G-C.
- G-CEM: Probetas PM fabricadas en el laboratorio con EM5-12 + EM12-20 + AN1/0-5 para G-C.
- G-CEM28d: Probetas PM fabricadas en el laboratorio con EM5-12 + EM12-20 + AN1/0-5 para G-C a los 28 días de edad.
- G-CEM90d: Probetas PM fabricadas en el laboratorio con EM5-12 + EM12-20 + AN1/0-5 para G-C a los 90 días de edad.

G-CEM365d:	Probetas PM fabricadas en el laboratorio con EM5-12 + EM12-20 + AN1/0-5 para G-C a los 365 días de edad.
G-CEc28d:	Probetas PM fabricadas en el laboratorio con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para G-C a 28 días de edad.
G-CEc90d:	Probetas PM fabricadas en el laboratorio con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para G-C a 90 días de edad.
G-CEc365d:	Probetas PM fabricadas en el laboratorio con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para G-C a 365 días de edad.
HC:	Hormigón compactado.
HCEc:	Probetas PM fabricadas en el laboratorio con: Ec5-12 + Ec12-20 + N2/0-5 para HC.
HCEM:	Probetas PM fabricadas en el laboratorio con EM5-12 + EM12-20 + AN1/0-5 para HC.
HCEM28d:	Probetas PM fabricadas en el laboratorio con EM5-12 + EM12-20 + AN1/0-5 para HC a los 28 días de edad.
HCEM90d	Probetas PM fabricadas en el laboratorio con EM5-12 + EM12-20 + AN1/0-5 para HC a los 90 días de edad.
HCEM365d	Probetas PM fabricadas en el laboratorio con EM5-12 + EM12-20 + AN1/0-5 para HC a los 365 días de edad.
HCEc28d:	Probetas PM fabricadas en el laboratorio con: Ec5-12 + Ec12-20 + N2/0-5 para HC a los 28 días de edad.
HCEc90d:	Probetas PM fabricadas en el laboratorio con: Ec5-12 + Ec12-20 + N2/0-5 para HC a los 90 días de edad.
HCEc365d:	Probetas PM fabricadas en el laboratorio con: Ec5-12 + Ec12-20 + N2/0-5 para HC a los 365 días de edad.
PM:	Proctor modificado.
RSU:	Residuos sólidos urbanos.
THCEc:	Testigos extraídos de la carretera con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para HC.
THCEc28d:	Testigos extraídos de la carretera con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para HC a 28 días de edad.
THCEc90d:	Testigos extraídos de la carretera con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para HC a 90 días de edad.
THCEc365d:	Testigos extraídos de la carretera con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para HC a 365 días de edad.

THCEct:	Testigos extraídos de la carretera a 90 días y ensayado a compresión simple a 365 días con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para HC.
THCN:	Testigos extraídos de la carretera en el subtramo de HC realizado con áridos naturales: AN3/0-3 + AN4/3-5 + G1-5/10 + G2-10/20.
THCN28d:	Testigos extraídos de la carretera en el subtramo de HC realizado con áridos naturales: AN3/0-3 + AN4/3-5 + G1-5/10 + G2-10/20 a 28 días de edad.
THCN90d:	Testigos extraídos de la carretera a 90 días del subtramo de HC realizado con áridos naturales: AN3/0-3 + AN4/3-5 + G1-5/10 + G2-10/20 y ensayado a compresión simple a los 365 días de edad.
THCN365d:	Testigos extraídos de la carretera en el subtramo de HC realizado con áridos naturales: AN3/0-3 + AN4/3-5 + G1-5/10 + G2-10/20.
THCNt:	Testigos extraídos de la carretera a 90 días y ensayado a compresión simple a 365 días con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para HC.
TG-CEc:	Testigos extraídos de la carretera con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para G-C.
TG-CEc28d:	Testigos extraídos de la carretera con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para G-C a 28 días de edad.
TG-CEc90d:	Testigos extraídos de la carretera con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para G-C a 90 días de edad.
TG-CEc365d:	Testigos extraídos de la carretera con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para G-C a 365 días de edad.
TG-CEct:	Testigos extraídos de la carretera con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para G-C, extraídos a 90 días y ensayados a compresión simple a 365 días de edad.
TG-CN:	Testigos extraídos de la carretera en el subtramo de G-C realizado con áridos naturales: AN3/0-3 + AN4/3-5 + G1-5/10 + G2-10/20.
TG-CN28d:	Testigos extraídos de la carretera en el subtramo de G-C realizado con áridos naturales: AN3/0-3 + AN4/3-5 + G1-5/10 + G2-10/20 a 28 días.
TG-CN90d:	Testigos extraídos de la carretera en el subtramo de G-C realizado con áridos naturales: AN3/0-3 + AN4/3-5 + G1-5/10 + G2-10/20 a 90 días.
TG-CN28d:	Testigos extraídos de la carretera en el subtramo de G-C realizado con áridos naturales: AN3/0-3 + AN4/3-5 + G1-5/10 + G2-10/20 a 365 días.

CAPITULO 1

1.- INTRODUCCIÓN.

1.1.- ANTECEDENTES.

La gestión de los residuos es un problema ambiental de gran envergadura, del que toda la sociedad es partícipe, y requiere la colaboración de todos los agentes sociales para la búsqueda de la mejor solución posible. Esta participación ciudadana es además la base fundamental de cualquier política de desarrollo sostenible.

Las grandes cantidades de residuos generados hablan por sí solas. En Europa se producen cerca de 3.000 millones de toneladas al año de residuos sólidos urbanos (RSU) (AEMA, 2004). Estas grandes cantidades de residuos, unida a la creciente escasez del suelo y a los cada vez más rigurosos criterios medioambientales de respeto y protección del entorno, hacen que se introduzcan nuevas alternativas a su almacenamiento en vertederos, tales como las tres "R" de la ecología que son: Reducir, Reutilizar y Reciclar. Reducir al máximo el consumo, seleccionando a la hora de comprar los productos que tengan un menor impacto ambiental y evitando la generación de residuos generados innecesariamente. Reutilizar, empleando periódicamente o de diversas formas distintos productos consumibles. Reciclar, utilizando los residuos como materia prima para la elaboración de un producto que puede o no ser igual al inicial, lo que conlleva la reserva de materias primas y reduce el gasto de energía, al mismo tiempo que disminuye la generación de residuos y la contaminación que esto comporta. Por lo tanto el reciclado incluye la incineración de RSU, siempre que tenga como objetivo la valorización energética para recuperar energía y minimizar los volúmenes que han de ser gestionados al vertedero.

Sin embargo, no siempre haciendo todo lo posible puede anularse la generación de residuos.

La gestión de RSU se planifica en función de la jerarquía de gestión establecida en cada país. La jerarquía comunitaria indica el grado de prioridad a la que se deben someter los RSU, en el siguiente orden:

- 1- Reducción de residuos en origen
- 2- Reutilización de productos
- 3- Reciclado de materiales y valorización energética de residuos no reutilizables o reciclables
- 4- Vertido controlado de residuos no valorizables

A pesar del orden de prioridad que poseen los apartados “sostenibles” de la gestión de residuos (conocidos como las 3R: reducir, reutilizar, reciclar), los mecanismos de reciclaje no son siempre efectivos en todos los sitios, pues en repetidas ocasiones apenas se dedica recursos para actuaciones destinadas a la reducción, primer principio prioritario de la normativa europea, recurriendo de esta forma a la valorización energética de residuos no reutilizables o reciclables y finalmente al vertido controlado.

El primer vertedero municipal del que se tiene noticia se sitúa en Atenas en el año 500 a. C. (Quenee, B. et al., 2000), luego otras ciudades siguieron este ejemplo, junto con la ya tradicional evacuación de los desechos hacia las vías fluviales. Actualmente, el vertedero de RSU, es un recurso no renovable y tiene otros problemas asociados, como la contaminación del agua, aire y suelo, a causa de la deficiencia en algunos sistemas de control, emitiendo gases tóxicos en el medio ambiente.

En 1885, en la ciudad de Nueva York, aparece otro medio de gestión de residuos sólidos, denominado como el “destructor”, que no era otra cosa que una incineradora (Quenee, B. et al., 2000). La incineración de RSU es una solución ventajosa de gestión frente a los vertederos. No obstante, deben cumplir con legislaciones cada vez más rígidas referentes al medio ambiente. Además, la poca superficie que necesita la planta incineradora, la limpieza en comparación con el vertido, la posibilidad de generar energía eléctrica, la reducción en volumen de RSU (Mielich, K. L. y Revéís, K. S., 1995) y la posibilidad de reutilización de los materiales producidos por incineración, hacen de la incineración de RSU una práctica beneficiosa a corto y largo plazo. Los inconvenientes que presentan estas soluciones son los altos costes de inversión y de explotación, la necesidad de un efectivo sistema de tratamiento de gases, y la generación de

pequeñas cantidades de residuos peligrosos, que deben inertizarse antes de su depósito en vertedero controlado.

De la incineración de los desechos sólidos municipales en hornos con y sin recuperación de energía, se obtienen 3 tipos de residuos distribuidos en residuos sólidos en un 90%, llamadas escorias de incineración de residuos sólidos urbanos (EIRSU) y el 10% restante se reparte entre cenizas volantes y gases. El principal motivo que respalda la incineración de RSU, es que este procedimiento reduce significativamente los volúmenes de residuos sólidos, destruyendo los componentes orgánicos perjudiciales (contaminantes) que están presentes en los residuos sólidos urbanos (Mielich, K. L. y Revéis, K. S. 1995).

La transformación de los RSU a EIRSU, cenizas y gases, mediante la incineración, permite la reducción en volumen semejante al 90 % o reducción en peso del 70 %. Pero este volumen de residuos incinerados aun continúa siendo importante gestionarlo, lo que impone la creación de nuevas regulaciones, encaminadas al aprovechamiento de estas escorias, que se traducirá en una eliminación elevada y a corto plazo de las EIRSU (Quenee, B., 2000).

A partir de los años 80 ha surgido una creciente preocupación en torno a la valorización de las EIRSU, basándose en el impacto ambiental que podrían ocasionar, especialmente en lo referente a las concentraciones de metales tóxicos medidas sobre los lixiviados. Todo ello ha motivado un interés por investigar distintas tecnologías para su gestión.

Se han planteado varias posibilidades para el empleo de las EIRSU, principalmente en el sector de la construcción, ya sean como áridos sustituyendo áridos naturales, en la producción de hormigón o bloques prefabricados, en firmes asfálticos, como material de relleno en terraplenes, sub-bases de carreteras y otras aplicaciones.

En este sentido, desde hace pocos años atrás se vienen dando pasos agigantados planteando varias posibilidades para el empleo de las EIRSU, principalmente en el sector de la construcción. Los países industrializados, en especial, aquellos cuyos RSU son menos biodegradables que el resto de países, y cuyas economías permiten diseñar estrategias viables de utilización de las EIRSU, vienen desarrollando normativas en cuanto al uso de las EIRSU en la construcción.

1.2.- OBJETIVOS.

El objetivo general de la presente tesis, en el marco descrito en el apartado anterior, ha sido estudiar el uso controlado de las EIRSU en construcción, especialmente como parte de los áridos para la fabricación de matrices compactas tratadas con cemento. Por lo que en la presente investigación, se ha tomado en cuenta la caracterización de las EIRSU como áridos para hormigón compactado (HC) y grava-cemento (G-C) para firmes, las prestaciones mecánicas, la durabilidad y el impacto ambiental (control de lixiviados) que tendrían estas tipologías en obra.

Para alcanzar este objetivo general, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Comparar las EIRSU con los áridos naturales, en lo que respecta a su caracterización como áridos para hormigón compactado y grava-cemento, esto permitió predecir los posibles problemas que pueden presentar las EIRSU en este tipo de matrices.
- Estudiar el comportamiento de las EIRSU en HC y G-C fabricados con mezclas de áridos naturales y EIRSU. Para ello, se determinaron las dosificaciones más convenientes en términos de resistencia y durabilidad.
- Realizar el estudio de la viabilidad práctica de la aplicación, llevando los estudios sobre EIRSU realizadas en el laboratorio, a escala real en un tramo experimental de carretera, para reparación de baches, y capas de HC y G-C. En el tramo se realizó el seguimiento del comportamiento in situ de cada tipología, obteniendo resultados reales del uso de las EIRSU en este tipo de obras y se comparó con el comportamiento mecánico y de durabilidad recomendados en las normativas españolas y el comportamiento ambiental de las normativas holandesas.
- Finalmente se realizó el estudio del comportamiento ambiental de las EIRSU en mezclas con áridos naturales y cemento Pórtland en matrices compactas. Por lo tanto, se ha realizado un capítulo dedicado al estudio de los lixiviados. En este sentido, Holanda ha ido desarrollando una serie ensayos de lixiviación, al mismo tiempo que ha fijando los correspondientes límites sobre el uso de las EIRSU, aunque estos parámetros pueden ser muy restrictivos. Sin embargo, se creyó conveniente aplicar los ensayos mencionados sobre las muestras de EIRSU a fin de comparar los resultados con los límites holandeses, llegando de esta manera a cumplir con el objetivo general planteado.

Para alcanzar el objetivo general enunciado y los objetivos específicos, se han trabajado en varias etapas, por lo que se ha diseñado una metodología.

1.3.- METODOLOGÍA.

La metodología seguida para alcanzar los objetivos propuestos tiene una base teórica y una connotación meramente experimental, apoyada en los ensayos de laboratorio. El estudio se ha centrado fundamentalmente en diferentes etapas, las cuales se iniciaron con el estado del conocimiento de las EIRSU, luego se realizó la caracterización de las EIRSU como áridos para hormigón, seguidamente se continuó con el estudio de las EIRSU en mezclas con áridos naturales y cemento Pórtland en matrices compactas de HC y G-C. Como parte del estudio de las EIRSU se realizó un tramo experimental de carretera. Durante cada etapa de esta metodología, se fueron realizando estudios de impacto ambiental, mediante tests de lixiviación. A continuación detallamos la metodología mencionada.

1) Etapa del estado del conocimiento.

El estado del conocimiento, está compuesto de dos partes. La primera aborda el estado del conocimiento de las EIRSU, y la segunda se refiere a la parte teórico-práctica de los pavimentos de H-C con rodillo y G-C compactada.

En primera instancia, se pretende dar una idea general de la cantidad de RSU que generan algunas ciudades, especialmente la provincia de Cataluña y la gestión más frecuente que se realiza con los subproductos de la incineración. A continuación, se indican los detalles de las plantas de incineración y los subproductos de este proceso. Seguidamente, se analizan las EIRSU y sus características, así como las normativas relacionadas con éste tipo de árido para pavimentos de HC y G-C. Finalmente, se presentan las experiencias y aplicaciones especialmente en carreteras.

La segunda parte de esta etapa hace referencia a la revisión teórico-práctica de los pavimentos de HC y grava cemento G-C. De la misma forma, se indican las características que han de poseer los áridos a utilizar, y las dosificaciones recomendadas. Por último, se presenta la fabricación y puesta de este tipo de obras, así como las experiencias adquiridas en España respecto a las aplicaciones realizadas.

2) **Etapa de caracterización de las EIRSU.**

Con el objetivo de comparar los áridos de origen natural con las muestras de EIRSU de Cataluña, se realizó el estudio de caracterización, iniciando con la selección de dos de las incineradoras de RSU de Cataluña, éstas fueron Tarragona y Mataró, de donde se extrajo las muestras de EIRSU. A continuación se procedió a realizar los ensayos de caracterización siguientes: ensayos físicos, geotécnicos, químicos, composición mineralógica, y el estudio de durabilidad. A partir de los resultados de caracterización y viabilidad se seleccionaron las muestras de las EIRSU de la planta de incineración de Mataró para la siguiente etapa de estudio.

3) **Etapa de estudio de las EIRSU en hormigones compactados y grava-cemento.**

En esta etapa se realizó el estudio de los hormigones compactados y la grava-cemento con mezclas de áridos de EIRSU de la planta de Mataró (fracción gruesa) y áridos naturales (arena natural -AN-) en diferentes porcentajes. Para ello, primero se realizó un estudio teórico de las dosificaciones, donde se mantuvo constante el porcentaje de cemento recomendado en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3/2002), concretamente los artículos 516 para HC y 513 para G-C y variando los porcentajes de áridos, hasta determinar las curvas granulométricas que en cada caso se acercaron a husos recomendados por el pliego. Una vez determinadas las dosificaciones, se fabricaron las probetas proctor modificado y posteriormente se rompieron las probetas a 7 y 28 días, para determinar las resistencias a compresión y a tracción indirecta y se determinó el módulo de elasticidad, los resultados sobre las probetas, fueron mecánicamente favorables. A continuación, se realizó un estudio de durabilidad y se continuó la siguiente etapa de investigación.

4) **Etapa de aplicación de las EIRSU, como parte de los áridos en firmes de grava – cemento y hormigón compactado, en un tramo experimental de carretera.**

En esta etapa se realizó la aplicación de las EIRSU como áridos artificiales mezclados con áridos naturales, en la fabricación de HC y G-C, en diferentes subtramos de una carretera experimental, en la que se utilizaron dos tipologías diferentes de pavimentación del firme. Por un lado se consideró la reparación local de baches y por otro lado la pavimentación de toda la superficie de la carretera, por lo cual se previeron diferentes opciones constructivas.

Posterior a la construcción se realizó un control de la carretera, mediante la extracción periódica de testigos los cuales fueron sometidos a ensayos de compresión y tracción indirecta, mientras que otros testigos fueron destinados al análisis de durabilidad. Finalmente se realizó el

estudio del impacto ambiental mediante los ensayos de laboratorio sobre los testigos extraídos, y el análisis químico del agua recogida de uno de los subtramos de la carretera, con el fin de determinar la lixiviación in situ.

También se planificó la recogida de agua para controlar la eventual existencia de lixiviación en las zonas con reparación local de baches. Al mismo tiempo que se realizó un registro del deterioro superficial de cada tramo, mediante el sistema de detección visual de fisuras, agrietamiento, color y textura, de la capa de rodadura.

5) Etapa de estudio del comportamiento ambiental (lixiviaciones) de las EIRSU sueltas y en matrices cementadas.

En este apartado se llevaron a cabo los siguientes ensayos de lixiviación: ensayo de disponibilidad NEN 7341 para: EIRSU sueltas (EIRSU sin cemento Pórtland) y EIRSU más cemento y arena natural en matrices de HC y G-C (EIRSU tratadas con cemento portland). Luego se realizó el ensayo de difusión NEN 7345 para los siguientes materiales monolíticos: los testigos extraídos de la carretera y las probetas proctor modificado fabricadas en el laboratorio. Y finalmente el análisis de los lixiviados extraídos del subtramo instrumentado de G-C con EIRSU de la carretera experimental. Los resultados obtenidos permitieron evaluar el comportamiento respecto a los límites fijados por la normativa holandesa y determinar el grado de utilización de las EIRSU como áridos en HC y G-C.

6) Etapa de conclusiones y nuevas líneas de investigación.

En esta etapa se incluyen las conclusiones dando respuesta al posible comportamiento de las EIRSU en mezclas con arena natural para la fabricación de hormigones compactados y grava-cemento y las nuevas líneas de investigación.

Primero se trata de resumir las conclusiones de tipo general, seguidamente se presentan las conclusiones específicas, que son el producto del estudio de cada capítulo, cubriendo así los objetivos generales planteados en el apartado de objetivos de la presente tesis. Y a continuación se indican las propuestas de futuras líneas de investigación, dando prioridad a aquellos temas que han ido surgiendo a través del desarrollo de la tesis y que no ha sido posible abarcarlos, ya que se ha intentado afianzar los objetivos propuestos.

7) Anexos.

En los anexos se han incluido algunos de los cuadros, diagramas, y datos que si bien son de utilidad en el desarrollo de la tesis, se cree que lastrarían el texto, dificultando la lectura. De esta forma se han incluido tres anexos distribuidos de la siguiente manera:

A1.- El anexo uno hace referencia a ciertos aspectos del estado del conocimiento, tales como los detalles de una planta de incineración y tratamiento de RSU, presentando con detalle la planta de incineración de RSU de Tarragona, y la planta de tratamiento de RSU de Mataró.

A2.- El anexo dos, está ligado con el capítulo 4, correspondiente al estudio de laboratorio del HC y G-C con mezclas de áridos de EIRSU y arena natural, en diferentes porcentajes. Para lo cual se realizó un estudio teórico de las dosificaciones, donde se indican los diferentes tanteos de dosificación y las correcciones aplicadas en estas, originadas por la diferencia de densidades de los áridos utilizados. Adicionalmente, se indican otras alternativas de dosificaciones del HC y G-C. Esto se realizó con la intención de determinar la fórmula más económica (variando los porcentajes de cemento) y cuyo comportamiento cumpla con las recomendaciones del PG-3/2002 para HC y G-C.

A.3.- Este anexo, está ligado con el capítulo 5, correspondiente a la aplicación de las EIRSU como áridos en G-C y HC en el tramo experimental, y en él se indican los tanteos realizados previos a la determinación de la dosificación utilizada en los tramos, especificando los 8 ajustes realizados.

8) Referencias bibliográficas.

En este apartado se indican todas las referencias bibliográficas que han sido utilizadas en el desarrollo de la tesis.

CAPITULO 2

2.- ESTADO DEL CONOCIMIENTO.

2.1.- INTRODUCCIÓN.

Las escorias de incineración de residuos sólidos urbanos (EIRSU) constituyen el subproducto más abundante de la incineración de RSU, sus valores se asemejan al 90% del producto sólido incinerado. Así, en Cataluña se generan cerca de 150.000 toneladas anuales de EIRSU, la mayoría de estas son gestionadas a vertederos controlados. No obstante, este material podría ser aprovechado para la construcción como parte de los áridos, especialmente en carreteras. La presente tesis intenta evaluar esta valorización para pavimentos de hormigón compactado y grava cemento compactado. En consecuencia, el estado del conocimiento está dividido en dos partes, la primera aborda las EIRSU, y la segunda se refiere a la parte teórico-práctica de los pavimentos de hormigón compactado con rodillo y grava cemento compactada.

En primera instancia, se pretende dar una idea general del origen de las EIRSU y los factores que determinan sus características, estudiando entonces la calidad y cantidad de residuos sólidos urbanos (RSU) que se genera en España y la gestión más frecuente, dando especial importancia a la incineración. Donde se indica el proceso de incineración (de las plantas de incineración de RSU de Mataró y Tarragona), los factores que influyen en las características de los subproductos sólidos, según lo cual se puede generar un subproducto innovador llamado ESCOGRAVA producido a partir de las EIRSU. A continuación se detallan todos los pormenores dirigidos al estudio de las EIRSU, indicando sus definiciones, sus propiedades (químicas, físicas y geotécnicas), así como el impacto ambiental que puedan

ocasionar, los procesos de tratamiento, las experiencias y aplicaciones especialmente en carreteras y las normativas relacionadas.

Como ya se ha mencionado, la segunda parte de este capítulo hace referencia a la revisión teórico-práctica de los pavimentos de hormigón compactado y grava cemento. Se definen sus características principales, así como las experiencias adquiridas en España respecto a las aplicaciones realizadas. Seguidamente, se muestran aspectos constructivos del hormigón compactado, de la misma forma que se indican las características que han de poseer los áridos a utilizar, y las dosificaciones recomendadas. Por último se presentan los procesos de fabricación y puesta en obra.

2.2.- RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU).

2.2.1 Definición de RSU.

Las EIRSU son el subproducto más abundante de la combustión de los RSU. Para conocer de forma íntegra sus características, y poder gestionarlas es necesario investigar los materiales y procesos que las generan. Por lo tanto se inicia este capítulo con el estado del conocimiento de los RSU.

Según la ley de residuos del estado Español del 10/1998 aprobada el 21 de Abril, se define como residuo a “cualquier sustancia u objeto perteneciente a alguna de las categorías que figuran en el anexo de esta ley, del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención de desprenderse”. Tendrá esta consideración los que figuren en el Catálogo Europeo de Residuos (CER) aprobado por las instituciones comunitarias.

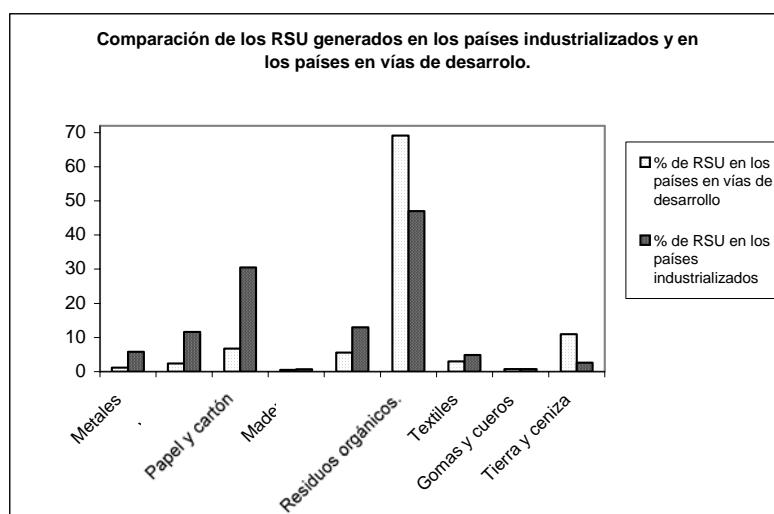
Según el Diario Oficial de la Generalitat de Cataluña Núm. 2181 – 13.03.1996, se indican las siguientes definiciones: Residuo sólido urbano es aquel desecho sólido que incluye al residuo de origen residencial, comercial, institucional y de industrias ligeras, recogidos por la municipalidad, o por los recolectores contratados bajo la responsabilidad de la municipalidad. Residuos municipales son los de carácter doméstico, los que proceden de los comercios y empresas, y cualquier otro que por su naturaleza o composición pueda asimilarse a los domésticos.

Como se ha visto, los RSU son de origen muy variable y por lo tanto su composición es heterogénea. Vale la pena entonces, revisar los factores que influyen en los constituyentes y realizar un breve análisis cualitativo y cuantitativo de los RSU.

2.2.2 Materiales constituyentes de los RSU.

A continuación citamos algunos datos que podrían darnos una idea cualitativa de los constituyentes de los RSU. Así por ejemplo, un estudio en Toronto demostró que más del 70% de basura depositada en los contenedores es materia reciclable y el 60% de la basura generada por los países industrializados son envases y embalajes (Mc Graw-Hill, 1998). No obstante, estos valores cambian en cada país, cuya evidencia radica en la propia composición de los RSU, reflejando así el modelo de producción, desarrollo, legislación y hábitos de consumo vigentes. A esto hay que sumarle el estado socioeconómico, con lo cual la situación es marcadamente diferente y las políticas en este sentido son también distintas. Hemos de recordar que la gestión de RSU, en los países en vías de desarrollo no es una prioridad, ya que de ante mano hay otros problemas más urgentes a considerar.

Gráfico 2.1: Comparación de los RSU en los países industrializados y en los países en vías de desarrollados. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 1997).



Como se puede apreciar en el gráfico 2.1, el porcentaje de constituyentes de los RSU que generan los países industrializados comparados con los constituyentes de los RSU de los países en vías de desarrollo, son muy diferentes. Así, a medida que asciende el nivel de vida, descende el porcentaje de residuos orgánicos y aumenta el de los plásticos, papel, vidrio, etc.

Lo mismo sucede en los núcleos urbanos comparado con los sectores rurales, donde tanto el vidrio, papel, cartón, plásticos y textiles, son mayores los porcentajes en las ciudades, manifestando el consumo elevado de alimentos envasados y el uso de embalajes, mientras que en el campo la mayoría de residuos son de origen orgánico. No obstante, existen otros factores

que también condicionan la constitución de los RSU, tales como las estaciones del año, las épocas festivas, la situación geográfica, etc, por lo tanto, como se ha visto, los residuos sólidos urbanos son materiales muy heterogéneos, de difícil clasificación y tratamiento, convirtiéndose en un material complicado de aprovechar. La gran heterogeneidad de materiales que los componen, hacen necesario gestionar los residuos, realizando actividades de: reducción, reutilización, reciclaje, recuperación de energía y el empleo de otras opciones medioambientales de valorización.

2.2.3 Gestión de RSU.

Como hemos señalado, el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos, va ligado por un lado con el desarrollo del país generador, y por otro lado se ha demostrado que la cantidad de RSU aumenta con el nivel de consumo de la población. Afortunadamente la mayoría de países cuyas economías son calificadas como altas, desde hace algunos años atrás, vienen planteando políticas encaminadas al cuidado del medio ambiente, dentro de lo cual se incluye la gestión de los RSU.

Tomando en cuenta que todo cuanto compramos provoca el aumento de los RSU y algún tipo de impacto medioambiental, también como consumidores podemos ejercer influencia o bien crear una sensibilidad ciudadana en cuanto a la importancia que tiene el reciclaje, entonces se podrá conseguir un mejor cuidado del medio ambiente sin necesidad de reducir nuestra calidad de vida (Mc Graw-Hill, 1998).

La gran cantidad de residuos sólidos urbanos, unida a la creciente escasez del suelo y a los cada vez más rigurosos criterios medioambientales de respeto y protección del entorno, hacen que se introduzcan nuevas alternativas a su almacenamiento en vertederos, tales como las tres "R" de la ecología que son: Reducir, Reutilizar y Reciclar. Reducir al máximo el consumo, seleccionando a la hora de comprar los productos que tengan un menor impacto ambiental y evitando la generación de residuos generados innecesariamente. Reutilizar, empleando periódicamente o de diversas formas productos consumibles. Reciclar, utilizando los residuos como materia prima para la elaboración de un producto que puede o no ser igual al inicial, lo que conduce a la reserva de materias primas y reduce el gasto de energía, al mismo tiempo que disminuye la generación de residuos y la contaminación que esto comporta. Por lo tanto, el reciclado incluye la incineración de RSU, siempre que tenga como objetivo la valorización energética y minimizar los volúmenes que han de ser gestionados al vertedero.

Por otro lado, los mecanismos de reciclaje son ineficaces en algunos sitios, y en repetidas ocasiones apenas se dedica recursos para actuaciones destinadas a la reducción, primer principio prioritario de la normativa europea, recurriendo de esta forma a la valorización energética de residuos no reutilizables o reciclables y finalmente al vertido controlado. Actualmente, el vertedero de RSU, es un recurso no renovable y tiene otros problemas asociados con la gran superficie que ocupa, tales como la contaminación del agua, aire y suelo, a causa de la deficiencia en algunos sistemas de control.

Como se ha mencionado, la incineración se encuentra incluida en el proceso de reciclaje de RSU, lo cual es una solución ventajosa frente a los vertederos. No obstante, los gestores de esta actividad deben cumplir con legislaciones cada vez más rígidas referentes al medio ambiente. Las ventajas de la incineración de RSU son: la poca superficie que necesita la planta incineradora, la limpieza en comparación con el vertido, la posibilidad de recuperación energética a partir de la combustión de la fracción orgánica, con la correspondiente substitución de combustibles fósiles para la producción de energía (Alba, N., 1998), destrucción de los componentes orgánicos perjudiciales que están presentes en los residuos sólidos urbanos (Mielich, K. L. y Revéis, K. S., 1995), la reducción en volumen y peso de los RSU y la posibilidad de reutilización de los materiales producidos por incineración, lo que convierten a la incineración en una práctica beneficiosa a corto y largo plazo.

Sin embargo, los inconvenientes que presentan estas soluciones son los altos costes de inversión y de explotación, la necesidad de un efectivo sistema de tratamiento de gases, y la posible generación de pequeñas cantidades de residuos peligrosos, que se deben inertizar antes de su depósito en vertedero controlado.

Las nuevas tecnologías son un aval para considerar a la incineración de RSU, como segura fundamentalmente en lo que se refiere al tema de la expulsión de gases y cenizas volantes, altamente nocivas desde el punto de vista medioambiental.

2.2.3.1 Gestión de RSU en Cataluña.

En España se generan aproximadamente 16 millones de toneladas al año de RSU, con un nivel muy similar al resto de países industrializados. Sin embargo esta similitud pierde vigencia a la hora de comparar con los porcentajes de RSU incinerados. Así, en España sólo el 20% de los RSU se incineran (MMA, 2000), ubicándose como uno de los países con un volumen menor de incineración de la Unión Europea. No obstante, los últimos años, hay un

elevado crecimiento de volúmenes de RSU incinerados, proyectándose una tendencia al aumento de esta actividad.

Se estima que en Cataluña existe una producción de 1,39 kg de RSU por habitante y por día (Agencia de Residuos de Cataluña, 2004), por tanto Cataluña genera cerca de 3 millones de toneladas al año, siendo una de las comunidades autónomas que más RSU produce. Sin embargo, también es la que más destina a la incineración de RSU.

En el año 1996 la incineración en España era del 4,65% del total de RSU, mientras que en Cataluña, el mismo año, incineró el 25% de los RSU generados en esta comunidad. En la Tabla 2.1 y gráfico 2.2 se muestra datos sobre la gestión de RSU en España y en Cataluña.

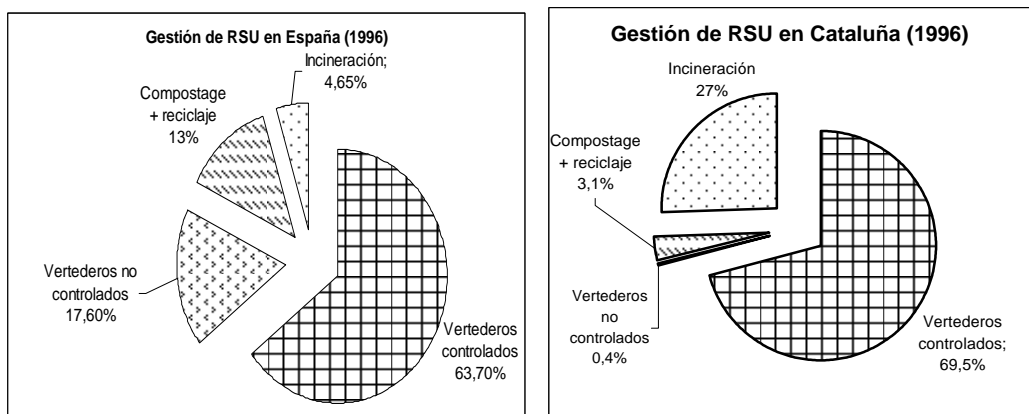
Tabla 2.1: Gestión de residuos sólidos urbanos en España y Cataluña en el año 1996 (más adelante se indican datos más actuales).

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 1997), Generalitat de Cataluña (Departamento de Medio Ambiente, Junta de Residuos).

Sistemas de tratamiento	España (1996)		Cataluña (1996)	
	miles de T/año	(%)	miles de T/año	(%)
Vertederos controlados	9506,3	63,7	1973,5	69,5
Vertederos no controlados	2628,0	17,6	10,4	0,4
Compostage + reciclaje	2086,3	13,0	85,1	3,1
Incineración	693,5	4,65	714,7	27
Total	14914,2	100	2783,7	100

Gráfico 2.2: Gestión de residuos sólidos urbanos en España y Cataluña (1996).

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 1997), Generalitat de Cataluña (Departamento de Medio Ambiente, Junta de Residuos).



Actualmente muchos países industrializados optan por la incineración de RSU, ya que la significativa reducción de volumen y peso de residuos, la posibilidad de generar energía y el poco espacio físico requerido, son algunas de las razones que avalan este método. Y más aun desde que los avances tecnológicos disminuyen y controlan las emisiones de los RSU, este incremento de gestión se demuestra en las grandes cantidades incineradas en ciertos países como Dinamarca, Suiza y Luxemburgo donde el 75% de los residuos se destina a la valorización energética, en tanto que Japón el 72% y Suecia el 55% , la tendencia actual es considerar a la incineración como un ciclo más del tratamiento integral de RSU.

2.3- LA INCINERACIÓN DE RSU.

2.3.1 Generalidades de la incineración de RSU.

El Diario Oficial de la Generalitat de Catalunya Núm. 2181 – 13.03.1996 hace la siguiente definición:

Instalación de residuos sólidos municipales: Es todo equipo técnico dedicado al tratamiento de residuos municipales para incineración, con la exclusión de las instalaciones especialmente destinadas a la incineración en tierra o mar de lodos de depuradora, residuos químicos tóxicos y peligrosos, residuos hospitalarios u otros residuos especiales, incluso en el caso de que estas instalaciones puedan también incinerar residuos municipales. La instalación de incineración comprende tanto el solar como el conjunto de las instalaciones que forman parte de la incineradora, su sistema de alimentación, combustión y todos los equipos anexos.¹

La incineración de RSU es una de las formas de tratamiento de residuos, entendiéndose por tratamiento la operación o conjunto de operaciones que transforman las características físicas, químicas y biológicas de un residuo para reducir o neutralizar las sustancias peligrosas que contiene, recuperar materias o sustancias valorizables y facilitar su uso como una fuente de energía (ley 6/93 del 15.7.1993, reguladora de los residuos; DOGC 1776, 28.07.1993). La incineración de residuos sólidos es un proceso de combustión a altas temperaturas (próximo a 850 °C) con exceso de oxígeno. En este proceso de incineración controlada, se transforma la fracción combustible de los residuos en un producto gaseoso y en un residuo sólido de menor peso y volumen que el material original (Lee y Huffman, 1989).

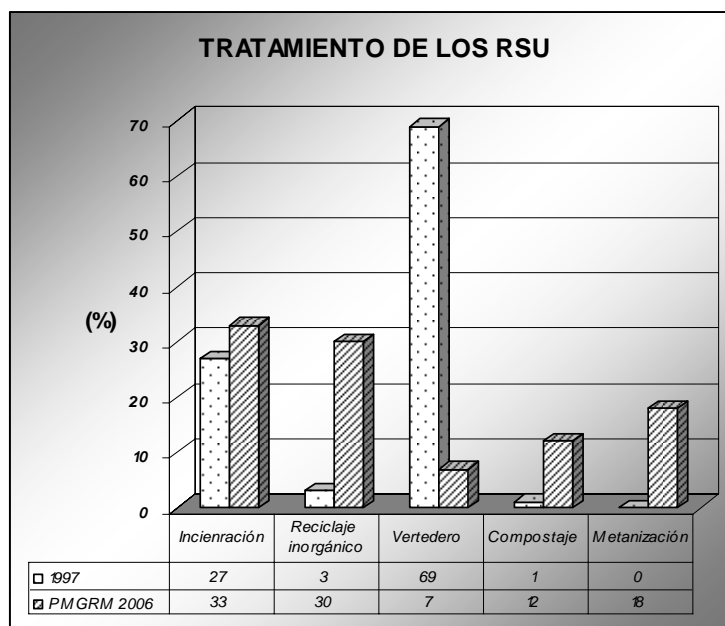
¹ La definición han sido tomada del Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya . Núm. 2181 – 13.03.1996.

El Catálogo de Residuos de Cataluña (Agencia de Residuos de Cataluña, 2004) es el ente encargado de destinar ciertos residuos a la incineración, considerando a estos RSU como materiales combustibles, llamando a este destino valorización energética. En Cataluña, todas las plantas de incineración de RSU están obligadas por ley a aprovechar el calor obtenido de la combustión para generar energía. En la actualidad se ha conseguido el autoabastecimiento energético de todas las instalaciones e incluso algunas plantas suministran energía eléctrica al área de influencia.

La incineración es una solución que ha de someterse a las medidas correctoras para mitigar el impacto ambiental que produce su funcionamiento. Así, por ejemplo, las plantas disponen de sistemas de depuración de gases contaminantes a la atmósfera. En Cataluña esto está controlado por la Dirección General de Calidad Ambiental de la Generalitat de Cataluña.

Desde 1997 (hasta el 2006) en Cataluña se viene aplicando el Programa Metropolitano de Gestión de Residuos Municipales (PMGRM), aprobado por la Entidad Metropolitana de Medio Ambiente y cuyo objetivo es reciclar un 60% de los RSU que se producen en el área metropolitana. Para ello se han planteado una serie de actuaciones tales como la mejora de los sistemas de tratamiento de RSU y la racionalización y modernización del sistema de incineración, entre otras.

Gráfico 2.3: Gráfico comparativo de las opciones de tratamiento de los RSU en Cataluña en el año 1997 y las previsiones del PMGRM al 2006 (Entidad Metropolitana de Medio Ambiente, 2004)



En el gráfico 2.3 se indican las previsiones establecidas por el PMGRM donde se puede apreciar que existe una disminución considerable de residuos gestionados al vertedero, por contra partida, se observa una evolución de las diferentes opciones de tratamiento de los RSU.

Por otra parte, el 2 de Febrero de 2000 se publicó el Plan Nacional de RSU del Estado (llamado “plan de valorización energética”), en el cual se recogen los objetivos de incineración, y se destinan a la valorización energética del 27% en el año 1997, hasta alcanzar el 33% para el año 2006. Esto supone un aumento del número de plantas incineradoras y el incremento del 80% del volumen de RSU incinerados, lo que implica un total de 3'192.000 T de RSU incinerados en el año 2006 en España. No obstante, Cataluña es la comunidad que aglutina la mayoría de las plantas, por lo tanto se prevé un aumento de la cantidad de subproductos generados de la incineración.

2.3.2 Proceso de incineración y tratamiento de los RSU.

El proceso de incineración de los RSU, convierte a los materiales orgánicos en CO₂ y H₂O y a los residuos inorgánicos en una combinación de material total o parcialmente quemado, formado por EIRSU, cenizas y otros residuos que están presentes en un porcentaje muy bajo en relación a las EIRSU. Sin embargo, a modo de referente se presenta en la tabla 2.2 las diferentes fracciones de residuos generados en la combustión de RSU.

Tabla 2.2: Tipos de materiales residuales producidos por la combustión de los RSU

Fuente: Alba, N. et. al. 1998.

TIPOS DE MATERIALES	DESCRIPCIÓN	COMENTARIOS
EIRSU	Material descargado de la parte inferior del horno (no quemados).	El término incluye la criba de las parrillas.
CRIBA DE LAS REJILLAS	Material que por ser de medida pequeña se escapa a través de las parrillas del horno.	Normalmente combinadas con las escorias.
RESIDUOS DE LA RECUPERACIÓN DE CALOR	Partículas recogidas en el sistema de recuperación de calor (caldera, intercambiadores de calor).	Pueden mezclarse con las escorias o con los residuos de depuración de gases.
CENIZAS VOLANTES	Partículas extraídas de los gases de combustión con electrofiltros.	---
RESIDUOS DE DEPURACIÓN DE LOS GASES	Combinación de material proveniente de los sistemas de depuración de gases y cenizas vol.	---
RESIDUOS COMBIANDOS	Mezcla de escorias y residuos de depuradora de gases de combustión.	---

Las plantas incineradoras disponen por lo general de una fosa de recepción recubierta de aislantes e impermeabilizantes, para evitar la contaminación al suelo y al agua subterránea y un sistema de ventilación que conduce al horno. En la fosa se descargan los camiones (previamente pesados) con los RSU, generalmente en esta etapa algunas plantas de incineración también emplean *sistemas de separación primaria*, que consisten en separar los materiales reciclables antes de la incineración (McGraw-Hill, 2001) y darles la destinación apropiada, el resto es conducido al horno.

Los RSU son enviados desde la fosa de recepción al horno mediante tolvas y se depositan en dos líneas de incineración que funcionan en forma independiente, ya que cada una está dotada de su sistema de control y de depuración de gases. Los hornos deben tener una forma que permita una distribución uniforme del material, asegurándose una homogénea inyección de aire (oxígeno en exceso) para su óptima incineración a temperaturas semejantes a 850 °C (y no mayores a 1110 °C, porque podría ocasionar el daño del material refractario que cubre el horno). El diseño de la cámara tendrá corriente permanente, para asegurar las condiciones de combustión necesarias para la eliminación de los contaminantes orgánicos más resistentes a la temperatura, y evitar la emisión de dioxinas, y compuestos tóxicos como metales pesados, gases ácidos, compuestos orgánicos, etc. (más detalles de la planta de incineración se adjuntan en el anexo A.1.1 de plantas de incineración de residuos sólidos urbanos de Tarragona). Al final del recorrido se recogen los subproductos sólidos de la combustión.

El calor producido en el horno es transmitido a la caldera que a su vez engendra vapor y mediante una turbina se acciona el generador eléctrico. Este aprovechamiento energético llega a ser en algunos casos superior a los del carbón y medioambientalmente mejores que las centrales convencionales de energía (Agencia de Residuos Sólidos de Cataluña, 1999).

Los gases y las partículas en suspensión resultantes de la combustión son sometidos a un sistema de depuración, de tal manera que las partículas en suspensión llamadas cenizas volantes son acopiadas mediante filtros y métodos de precipitación electrostáticos. En cambio ciertos contaminantes gaseosos como el SO₂, HCl, CO₂ o los dibenzofuranos policlorados (PCDF) y dibenzodioxinas policlorados (PCDD) son captados mediante diferentes procedimientos, con el objetivo de minimizar su emisión a la atmósfera, tales procedimientos pueden ser: la lechada de calcio y la utilización de filtros de carbón activo o de magnesio. Hasta que finalmente los gases depurados son despedidos por la chimenea, quedando el resto retenido en el sistema de depuración de gases. Tanto las cenizas volantes, como los residuos del sistema de depuración de gases son utilizados o enviados al vertedero. No obstante, la legislación ambiental sugiere una inertización previa a la disposición.

Las EIRSU son el material más voluminoso y no combustible que queda después de la incineración y son recogidas en los extractores de escorias donde se las sumergen en estanques de agua para enfriarlas, después son depositadas mediante una cinta transportadora, y posteriormente son cargados en camiones a un puente grúa. En ésta etapa se realiza la recuperación de los materiales, conocido como *sistema Terminal*. Este sistema puede recuperar un alto porcentaje de metales féreos y no féreos mediante el uso de una tecnología sencilla (McGraw-Hill, 2001). Las EIRSU son gestionadas, en vertederos de residuos no especiales o se aprovechan como materia prima en obra civil, ya sea regenerando terrenos, o como áridos para hormigón. Sin embargo, existen acopios de EIRSU que son almacenadas por un tiempo llamando a este periodo etapa de envejecimiento o maduración, luego del cual también son aprovechadas.

Las cenizas volantes y los residuos de la depuración de gases poseen un carácter más perjudicial que las escorias (pero solo constituyen el 10% de los subproductos de la incineración de RSU, el resto son EIRSU), tanto en su composición con un mayor contenido de metales pesados, como por su comportamiento frente a la lixiviación, ya que estos son más solubles que en las EIRSU (Hjelmar, 1988; Wiles, 1994). En los diversos test de lixiviación realizados, la presencia de Pb y Cd han sido la clave para clasificar estos residuos (cenizas volantes y residuos de depuración de gases de combustión) como peligrosos (EPA, 1991; Environment Canadá, 1993). Las EIRSU, cenizas volantes y los residuos de depuración de gases de combustión provenientes de la incineración de RSU son materiales muy heterogéneos, de composición química muy variada. El impacto ambiental de estos residuos puede estar muy condicionado a la presencia y distribución de los metales pesados en las diferentes corrientes sólidas producidas en la incineración (Brunner, 1988).

La distribución de metales pesados entre las diferentes corrientes residuales en la incineración viene determinado por varios factores, entre los cuales está la presión de vapor de los metales y la temperatura en las diferentes zonas de la planta de incineración (Ibidem) así:

- El hierro, con baja presión de vapor, se acumula en las escorias. Su presencia en cenizas y gases de combustión es reducida. El cobre se comporta de manera prácticamente idéntica.
- El plomo y zinc, son retenidos el 50% en las EIRSU, el resto se evapora en las parillas del horno, condensándose posteriormente para formar parte de las cenizas.

Estas, al ser producidas en menor cantidad, se encuentran más concentradas en plomo y zinc que las EIRSU.

- El cadmio, es más volátil y se encuentra esencialmente en las cenizas, su presencia en los gases de combustión depende del sistema de depuración y de la temperatura de los gases de combustión. El metal más volátil es el mercurio y su distribución depende de la temperatura de operación final del sistema de depuración de gases utilizado.

Pese a que la técnica de valorización energética o incineración de RSU reduce significativamente el volumen de RSU, neutraliza algunas de las sustancias peligrosas contenidas en los RSU, recupera materias o sustancias valorizables y es una alternativa fuente de energía eléctrica, existen grupos ecologistas y poblaciones (especialmente las cercanas a las plantas de incineración), que catalogan a la incineración como polémica y cuyos argumentos son plausibles de análisis, bajo el eslogan NIMBY (not in my back yard). Desde luego, sus principales demandas se basan en la incertidumbre de los impactos ambientales que puedan producir los subproductos de la incineración: EIRSU, gases de la combustión, residuos de depuración de gases y las cenizas volantes, los tres últimos, en conjunto, son considerados como los más peligrosos por la elevada cantidad de compuestos nocivos que posiblemente los constituyen (Brunner, 19898). Por lo tanto, en unión con las EIRSU, deben ser sometidas a análisis y determinación de sus propiedades, que a su vez varía según diferentes aspectos: el tipo de RSU, los tratamientos previos a la incineración, la temperatura de incineración, la forma de enfriamiento, la edad de envejecimiento, etc., por lo tanto es imprescindible conocer la planta de tratamiento e incineración de los RSU de las que proceden las EIRSU, a continuación se detallan las planta de incineración y tratamiento de residuos sólidos urbanos de Mataró y Tarragona (en el capítulo 3 se justificará su utilización).

2.3.3 Aspectos relativos a las plantas de incineración y tratamiento de RSU de Mataró y Tarragona.

Desde el año 1998 hasta el 2003 se hallaban en funcionamiento en Cataluña, siete plantas de incineración de RSU agrupadas en la Asociación Catalana de Empresas de Valorización Energética de RSU (ACEVERSU), dentro de las que se incluyen las plantas de Mataró y Tarragona bajo el nombre de las siguientes compañías:

- Serveis d'Incineració dels Residus Sòlids Urbans, S.A. (SIRUSA) Tarragona
- Tractament i Revalorització d'Residus del Maresme, S.A. (TRMSA) Mataró.

La ACEVERSU aporta datos que influyen en la elaboración y modificación de la legislación a favor de la conservación del medio ambiente, estos datos son el fruto del análisis de los procedimientos térmicos de valorización de los RSU.

La Agencia de Residuos de Cataluña señala que en el año 2004 se incineraron cerca de 700.000 toneladas de RSU (entre todas las plantas de incineración), de los cuales el 85% se produjo en las plantas de Tarragona, Mataró y Sant Adrià. No obstante, no todas las instalaciones poseen las mismas prestaciones, y consecuentemente los subproductos resultantes del proceso son también distintos. Por ello se analizan las dos plantas de incineración cuyas EIRSU se utilizarán más adelante en la presente tesis.

2.3.3.1 Planta de Mataró.

Bajo la iniciativa de los 28 municipios de la comarca del Maresme, se creó el Centro Integral de Valorización de Residuos del Maresme, con la idea de dar solución global y efectiva a la gestión de residuos sólidos urbanos del área.

El Consorcio para el Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos del Maresme, se inició en 1985 con 17 municipios del sur de la comarca y la diputación de Barcelona. El consorcio construyó una planta de reciclaje con el objetivo de aprovechar los RSU. En 1990 decidió completar las instalaciones con un centro de recuperación energética como solución clara, definitiva y técnicamente segura. Con este propósito el consorcio se amplió con los municipios del Maresme norte hasta formar 25 municipios. En 1994 se recuperaron y comercializaron más de 151.000 toneladas de subproductos, aunque es un dato alentador, sin embargo más del 70% de los residuos tratados terminan en depósitos controlados fuera de la comarca, con perjuicio económico y ambiental.

En 1999 se incineraron en Cataluña 687.703 T de RSU de las cuales el 22% fueron incinerados por el Consorcio para el Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos del Maresme, las tablas 2.3 muestran los diferentes municipios del Maresme y la cantidad de RSU incinerados en el año 1999

Tabla 2.3: Municipios del Maresme y cantidad de RSU (en Toneladas) incinerados en el año 1999. Fuente: Informe V (2001).

Municipios	Alella	Arenys de Mar	Arenys de Munt	Argentona	Cabrera	Cabrils	Caldes d'Éstrac	Calella
RSU incineradas en 1999	5.685	7.142	3.195	4.856	2.396	3.647	1.740	11.036

Municipios	Canet de Mar	El Masnou	LLavaneres	Mancomunitat Alt Maresme	Mataró	Orius	Premià de Dalt
RSU incineradas en 1999	6.317	9.980	4.577	5.200	34.745	329	4.237

Municipios	Premià de Mar	Sant Cebria de Vallalta	Sant Iscle de Vallalta	Sant Pol de Mar	Sant Vicent de Montalt	Teia	Vilassar de Dalt	Vilassar de Mar
RSU incineradas en 1999	12.801	1,147	450	2.346	3.130	2.613	4.255	9.580

Características de la instalación de la Planta de Mataró.

La instalación se encuentra en una superficie de terreno de 15.000 m² de los cuales 7.000 m² son área construida, en la instalación se reciben los camiones de recogida directa de RSU y se los lleva a la nave de recepción de la planta de reciclaje, La capacidad de esta instalación es de 18 T/h en régimen de trabajo de 247 días al año, durante 16 horas diarias, tratándose unas 55.000 T de RSU anuales.

Luego de la nave de recepción de la planta de reciclaje, los RSU pasan a las cintas de separación, aquí es donde se separan las piezas grandes como: restos de demoliciones, coches, etc, y también se separan los materiales aprovechables como cartón, papel, cristal, hierros y plásticos.

El resto de los RSU (rechazo) se trituran y transportan por medio de una cinta hasta la fosa de la central de recuperación energética (CRE). Tan solo el 30% de los RSU pasan por este proceso, esta limitación viene determinada por la capacidad de la instalación. El 70 % restante es conducido directamente de los camiones de recogida de los RSU.

CRE viene funcionando desde 1994, con una capacidad industrial de tratamiento de RSU semejante a 170.000 T anuales, de las cuales el 97% son de origen urbano y el resto es de tipo industrial asimilable a los RSU. El área de construcción de la planta incineradora es de 3.555 m² y se encuentra emplazada en una superficie de 17.310 m². La planta de incineración tiene dos líneas de combustión tipo galera móvil, que incineran a 800 y 900 °C, con una capacidad de 10 T/h para una PCI de 2.000 kcal/kg en cada una.

Las calderas acopladas a los hornos tienen una capacidad de producción unitaria de 25 T/h de vapor, a 67 bar absolutos y 380 °C, con los que se alimenta un grupo turboalternador de 11 MW. Considerando un autoconsumo de 1,5 MW se obtiene una potencia neta de 9,5 MW que en 7.700 horas de funcionamiento, produce en la red eléctrica 73.000 MWh/año a plena carga. Esta cifra representa una tercera parte del consumo de la ciudad de Mataró.

De las 170.000 T de RSU, se consigue reducir a 40.000 T, que se transportan a la planta de tratamiento de EIRSU, que en el caso de Mataró es la instalación de Pedreres Rusc (en el anexo 1.1.2 se indica los detalles de la planta de tratamiento y valorización de EIRSU). En esta instalación se separan las escorias en tres fracciones, el retenido superior a 40 mm, la fracción entre 20 y 40 mm y la inferior a 20 mm. Para las dos primeras se separa la parte férrica magnéticamente y la parte más gruesa mediante corrientes de aire, este material se suele vender como chatarra y el resto vuelve al ciclo de incineración. La fracción 0-20 mm, constituyen las escorias a valorizar, mismas que se envejecen dos o tres meses al aire libre acopiadas en una cantera. Esta última es la fracción que se ha utilizado en la presente tesis doctoral.

2.3.3.2 Planta de Tarragona.

En 1996 se creó dentro de la normativa de la Generalitat de Catalunya, la ordenanza en cuanto a la utilización de las escorias, a partir de allí se inició por parte de los diferentes municipios la valorización de sus RSU. Así, en 1987 los ayuntamientos de Cambrils, Constantí, Reus, Tarragona, Valls y Vila-seca y Salou, se asociaron en una mancomunidad denominada “Serveis Mancomunats d’Incineració de Residus Urbans”, para crear una planta incineradora de RSU con recuperación de energía, con capacidad suficiente para atender el volumen de RSU de los municipios que lo integraban.

Las razones que movieron a los municipios mencionados a crear la mancomunidad eran las dificultades existentes en la zona para conseguir un terreno destinado a servir de vertedero controlado. Por otro lado, el elevado peligro de contaminación de las aguas y olores molestos,

hicieron pensar que la instalación de una planta de incinerado era la mejor alternativa de solución. Así, en 1991 empieza a funcionar la planta incineradora de RSU de Tarragona, situada en el polígono Riu Carl, entre los municipios de Constantí y Tarragona, bajo la dirección técnica de la empresa pública SIRUSA (Sistema de Incineración de RSU) en calidad de explotadora.

El buen funcionamiento de la planta y la prestación de servicios adquirida en estos años de experiencia, ha hecho que otros municipios decidan enviar sus RSU hacia la planta, hasta que actualmente da servicio a un área geográfica de más de 350.000 habitantes en 8 municipios.

Características de la instalación de la Planta de Tarragona.

La planta empezó a funcionar en 1991 a modo de prueba, ya en 1992 entró en funcionamiento regular. En la tabla 2.4 se muestra la evolución histórica de la actividad llevada a cabo desde 1992 hasta 1998.

Tabla 2.4: Evolución histórica y la actividad de la planta de incineración de RSU de Tarragona.

Fuente: Nadal, A. R., SIRUSA, 1999.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA ACTIVIDAD (1.992-1.998)

Año	Residuos gestionados (T)	Residuos incinerados (T)	Residuos a vertedero (T)	Producción eléctrica (MWh)	Energía vendida a la red (MWh)
1.992	136.825	134.951	1.874	41.000	35.294
1.993	150.223	147.453	2.770	47.018	40.769
1.994	153.887	147.410	6.577	50.917	44.444
1.995	161.794	153.938	7.856	52.440	45.693
1.996	168.980	156.345	12.635	51.898	45.269
1.997	175.122	147.392	27.730	51.986	43.751
1.998	174.344	144.712	29.632	51.261	40.676

La Planta está situada a pocos km. de la ciudad de Tarragona, en un polígono industrial muy bien comunicado; su capacidad actual de incineración es de 430 T/d de residuos urbanos, disponiendo de dos hornos de 9,6 T/h. (calculados para un PCI real de 1.800 kcal/kg). Los hornos (que funcionan a 850 y 1000°C) son de tecnología alemana (Deutsche Babcock Anlagen, Oberhausen), de parrilla rotatoria, y la depuración de gases se realiza mediante un sistema semi-seco, formado por un reactor GSA con recirculación de lechada de cal, adición de carbón activo y filtro de mangas, todo el equipamiento de tecnología danesa (FLS Miljo, Copenhagen). Por otra parte, la Planta es productora de electricidad, con una potencia generadora de 7.400 KW, aprovechando la energía térmica contenida en los residuos. Aproximadamente un 20% de la producción se utiliza como autoconsumo, exportándose a la red eléctrica el 80% restante.

La empresa explotadora, SIRUSA, pertenece mayoritariamente a la misma mancomunidad de municipios, titular de un 60% de las acciones, mientras que el 40% restante corresponde al

Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético (IDAE), organismo estatal del Ministerio de Industria y Energía.

El hecho de que tanto el propietario, la mancomunidad de municipios, como los usuarios más importantes y la empresa explotadora compartan órganos de dirección, es a la vez una ventaja y un inconveniente:

La ventaja estriba en que los municipios usuarios, que son a la vez propietarios y gestores, tienen un único objetivo, obtener un buen servicio al mínimo coste posible, con lo que no caben las discrepancias que se originan en ocasiones si el operador de la Planta es una empresa privada, diferente del ente público propietario.

El inconveniente radica en que, en ocasiones, los criterios de una gestión eficaz y un control basado en las leyes de la economía general, quedan supeditados a decisiones de oportunismo electoral (por ejemplo, fijación de precios del servicio por debajo del coste (Nadal, A.R., SIRUSA, 1999)).¹

De las 150.000 T de RSU, se consigue reducir a 30.000 T, que se transportan mediante cintas transportadoras a un separador magnético, luego se separan las escorias en tres fracciones, el retenido superior a 40 mm, la fracción entre 20 y 40 mm y la inferior a 20 mm, Para las dos primeras se separa la parte férrica magnéticamente, este material se suele vender como chatarra y el resto vuelve al ciclo de incineración. Finalmente, la escoria se acopian en una cantera, el montón suele llegar a una altura de 2 y 2,5 m. La fracción 0-20 mm, constituyen las escorias a valorizar. Esta última es la fracción que se ha utilizado en la presente tesis doctoral (anexo A.1.1 planta de Tarragona).

2.3.4 Factores que influyen en las características de los subproductos sólidos de la incineración.

El rango de variabilidad de los metales pesados, así como el resto de características de los residuos sólidos incinerados dependen de cinco factores principales (EPA, 1991):

- 1) Procedencia de los RSU: Se ha visto que la composición química de las corrientes residuales están claramente afectadas por la proporción de residuos quemados según su procedencia sea doméstica, industrial o comercial. Por lo que se ha de hacer un estudio comparativo de las diferentes instalaciones y la composición de los residuos previa incineración.
- 2) Pretratamiento de los RSU: el pretratamiento de la corriente de RSU que alimenta la planta puede afectar la composición y las características físicas de los residuos. Por ejemplo la separación de los metales y las pilas, conduce a una disminución de los niveles de cadmio, mercurio, plomo y otros metales.

¹ Se transcribió textualmente del informe de la Empresa SURUSA (1999).

- 3) Condiciones de operación: La composición de las corrientes residuales sólidas producidas, varían según los parámetros de operación y eficiencia en el modo de explotación de la planta, tipo de horno, cantidad de quemados, tiempo de permanencia en el horno (de 15 minutos a 3 horas), temperatura de combustión en las diferentes zonas de la planta y especialmente la presión de vapor de los metales que constituyen las EIRSU, entre otros.
- 4) Características del equipamiento de los sistemas de depuración de los gases: Los diferentes sistemas de depuración de los gases de combustión dan lugar a variaciones en la composición química. El uso de catalizadores o absorbentes, como puede ser la cal, afectan significativamente a la lixiviación de diferentes componentes de las cenizas y la calidad de las EIRSU.
- 5) Factores postincineración: estos son principalmente la extracción de la fracción férrica (con tecnología simple como el uso de electroimán), esto beneficia el reciclaje de este material y ayuda a mejorar la calidad de la escoria resultante. El tratamiento posterior, se realiza en una instalación independiente de la planta de incineración y por lo general bajo la dirección de otra empresa. En Cataluña hay dos empresas que se dedican al acondicionamiento de las escorias, de las cuales resulta un producto denominado *escograva*, el tratamiento incluye el procesamiento y maduración o envejecimiento. Las EIRSU de Mataró y Tarragona son tratadas en las plantas de acondicionamiento y luego son apiladas un cierto tiempo, hasta que son colocadas en pequeñas obras o enviadas al vertedero.

2.3.5 La escograva.

En Cataluña existen dos empresas que trabajan en la producción de un producto innovador llamado **escograva**, que se crea a partir de las EIRSU, éstas son: Pedreres Rusc (EIRSU de la planta de Mataró) y VECSA (EIRSU de la planta de Tarragona). La escograva está controlada por la normativa del Departamento de Medio Ambiente mediante la orden del 15 de Febrero de 1996 sobre valorización, que permite la utilización de las EIRSU valorizadas en obra civil, como un material destinado a subases de carreteras, relleno de terrenos, nivelación, recubrimiento y restauración de áreas degradadas. Lo que se intenta con este tratamiento es ampliar lo máximo posible las aplicaciones potenciales mediante la mejora de la calidad de las EIRSU al bajar los niveles de contaminación frente a los lixiviados.

Las operaciones de tratamiento que se realizan sobre las EIRSU son las siguientes:

- 1) Eliminación de partículas muy grandes (mayores de 30 mm) de las EIRSU mediante el tamizado. La fracción retenida en el tamiz se ha de triturar para volverla a incorporar al procesamiento.
- 2) Extracción de materiales férricos mediante separadores magnéticos.
- 3) Separación de materiales metálicos no férricos mediante un sistema de corriente de Foucault.
- 4) Extracción de inquemados mediante una separación por corrientes de aire. Estos componentes se devuelven al proceso de incineración.
- 5) Maduración (en el apartado 2.4.2 de caracterización de las EIRSU se verá en que consiste la etapa de maduración) de las EIRSU durante unos meses. Esta etapa de envejecimiento se ha de realizar en contacto con los agentes atmosféricos, cuyas reacciones químicas son beneficiosas para mejorar las características del producto.

2.4.- LAS EIRSU.

2.4.1 Definición de las EIRSU.

Para intentar dar una definición a las EIRSU, se ha citado la utilizada según el Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña (Diario Oficial de la Generalitat de Cataluña Núm. 2181 – 13.03.1996) donde se definen como los residuos industriales de naturaleza principalmente inorgánica, que quedan en el horno una vez acabado el proceso térmico y una vez separada la fracción férrica.

Las EIRSU, conocidas en la terminología anglosajona como Municipal Solid Waste Incineration bottom ash (MSWI bottom ash), son el subproducto sólido residual que se encuentra en el fondo de la cámara de incineración de las plantas incineradoras, usadas para quemar residuos sólidos municipales (Phil, K. A., 1997), a temperaturas semejantes a 850 °C.

Las características y propiedades de las EIRSU dependen principalmente de cinco factores enumerados en el apartado anterior. Las EIRSU son con diferencia, el residuo más

importante cuantitativamente, constituyendo alrededor del 90% del volumen y 70% del peso total de los RSU incinerados (Chandler et al., 1996; Wiles, 1996; Chimenos et al., 1999).

Ya en el congreso de Paris, International Conference on the “Use of By-Products and Waste in Civil Engineering” (1978), se presentaron experiencias de utilización de EIRSU, aunque en esa época no se consideraban los aspectos ambientales (comportamiento frente a los test de lixiviados) que actualmente son la clave en cualquier valorización de residuos que se pueda plantear (Alba, N., 1998).

En el año 2001, en Cataluña se produjeron cerca de 100.000 a 150.000 T de EIRSU (Agencia de Residuos de Cataluña, 2004) y las previsiones futuras incrementan las EIRSU a 600.000 T anuales en todo el territorio nacional. Estas grandes cantidades merecen ser consideradas como un nuevo recurso para obtener un material con múltiples aplicaciones en obra civil. No obstante, es necesario realizar el estudio de caracterización de las EIRSU.

Dada la heterogeneidad de las EIRSU, muchos autores hacen referencia a la etapa de muestreo, como la clave para obtener resultados representativos de las características de este material, y a partir de esta etapa determinar sus propiedades químicas, físicas, geotécnicas y su posible impacto ambiental, para prescribir cuáles son las opciones de tratamiento más adecuadas.

2.4.2 Características de las EIRSU.

Las escorias son fundamentalmente alcalinas, con un pH entre 10 y 12,5; están formadas principalmente por Si, Fe, Ca, Al y en menor cantidad por Mg, Na y K, (junto con el O y C) en forma de óxidos, que suman el 75 % del total de peso de la EIRSU (Seguí, P., y Far, S., 2000), con un contenido de metales pesados menor del 1,5%, aunque este valor es altamente variable de unas instalaciones a otras (Wiles, 1994), se puede decir que son muy semejantes a los materiales geológicos.

En cuanto a los elementos mayoritarios, aquellos que se presentan en concentraciones mayores a 1000 mg por kg, las EIRSU son comparables a los suelos. Respecto a los elementos minoritarios (concentraciones menores a 1000 mg por kg), las EIRSU presentan mayores porcentajes que los materiales geológicos, tales como: Cl, Zn, Pb y Cr. Y otros elementos, como Sn, As, Mn, Ni, Cd, Hg, Br, F y I, aparecen como trazas (concentraciones menores de 1 g/kg).

En la tabla 2.5 se indican los rangos de composición elemental de las EIRSU para incineradoras tipo “mass burn” (Wiles, 1994).

Tabla 2.5: Rangos de composición elemental de las EIRSU para incineradoras tipo “mass burn” (Wiles, 1994)

Elemento	Ag	Al	As	B	Ba	C	Ca	Cd	Cl	Co	Cr
Valores en (mg/kg)	0,29-37	22000-73000	0,12-190	38-310	400-3000	10000-60000	37000-120000	0,3-71	800-4200	6-350	23-3200
Elemento	Cu	Fe	Hg	K	Mg	Mn	Mo	N	Na	Ni	O
Valores en (mg/kg)	190-8200	4100-150000	0,02-7,8	750-16000	400-26000	83-2400	2,5-280	110-900	2900-42000	7-4300	400000-500000
Elemento	P	Pb	S	Sb	Se	Si	Sn	Sr	Ti	V	Zn
Valores en (mg/kg)	1400-6400	98-14000	1000-5000	10-430	0,05-10	91000-310000	2-380	85-1000	2600-9500	20-120	610-7800

La solubilidad en agua es uno de los principales controles que ha de efectuarse sobre las EIRSU para determinar su gestión o tratamiento ya que es un índice del potencial de liberabilidad de sus componentes. Según el estudio realizado por Seguí P. y Far S. (2000), las EIRSU tienen alrededor del 1% del material soluble en agua (en el caso de las EIRSU la solubilidad se atribuye a la disolución de sales como NaCl o CaCl₂), siendo la solubilidad máxima a temperatura ambiente de 19 g de soluto por litro de agua.

El ensayo de pérdida por calcinación puede dar una idea de la eficiencia de la combustión en las incineradoras, al igual que los valores del contenido de materia orgánica por pérdida de peso por calcinación. La constitución de las EIRSU depende en gran medida de la temperatura de incineración, el sistema de calcinación utilizado por la planta, la tipología del RSU y el tiempo de calcinación, entre otros.

Según el Catálogo de Residuos de Cataluña aprobado en el Decreto 34/1996 del 9.1.1996 (DOGC 2166; 9.2.1996) las EIRSU se clasifican como residuos no especiales y son valorizables en el campo de la construcción (valorización regulada en la Orden del 15.2.1996 del DOGC 2181; 13.3.1996).

En el estudio realizado por Seguí P. y Far S. (2000), los resultados sobre EIRSU todo uno (fracción 0-20 mm), concluyeron que tanto las EIRSU como sus lixiviados satisfacen todos los requisitos de la Orden de la Generalitat de Cataluña (Núm. 2181, DOGC 13.03.1996) sobre valorización de escorias, con la única limitante de que las EIRSU deberán estar envejecidas por lo menos un mes antes de utilizarlas.

Los resultados obtenidos de diferentes ensayos de lixiviación de EIRSU todo uno, tanto sueltas como en mezclas con cemento, muestran que es un material aceptable, excepto en el contenido de plomo que es mucho más alto, en especial en las EIRSU con poco tiempo de envejecimiento. No obstante, el Pb y Cu al igual que algunos parámetros como el pH y la conductividad, disminuyen a mayor tiempo de envejecimiento. En la etapa de envejecimiento o maduración de las EIRSU se producen procesos de hidratación, carbonatación y oxidación, lo que determina que la lixiviación sea calificada como aceptable.

Desde el punto de vista físico, las EIRSU se caracterizan por una mezcla de vidrio, metales, restos de cerámica, residuos de construcción y demolición, materia orgánica y un nuevo material llamado de neoformación que está compuesto de varios materiales no combustibles y que en el proceso de incineración han logrado unirse unos con otros mediante fusión (Chimenos et al., 1999; Chandler et al., 1997). La cantidad y calidad de cada constituyente depende de la constitución de la alimentación del horno (residuos sólidos incinerados), el sistema de combustión y la efectividad del tratamiento post incineración (Izquierdo, 2004).

En lo que respecta a la forma de las partículas gruesas, se pueden apreciar formas irregulares, como placas, hilos, etc. A medida que disminuyen las fracciones consideradas, aparecen mayormente las partículas redondeadas.

Muchos de los estudios apuestan por la separación granulométrica de la fracción mayor de 50 mm (en algunos casos hasta 20 o 30 mm). La franja menor de 50 mm, compuesta de material grueso y fino, adquiere características algo más homogéneas en cuanto a su granulometría. Los porcentajes de finos pueden variar entre 20 y 40% del peso del material medio considerado de EIRSU, con un contenido cercano al 5% de partículas inferiores a 60 μm ., con respecto al porcentaje de la muestra.

Las curvas granulométricas recogidas en la bibliografía (Izquiero, M., 2005) también han mostrado una carencia de continuidad en las medidas intermedias entre 5 mm y 20 mm, incluso una medida de grano menor que las recogidas inicialmente. El alto porcentaje de finos, hace que el material tenga absorción muy alta, lo cual conlleva varios problemas mecánicos, siendo los finos de EIRSU no recomendables para ser usadas en construcción. Por lo que respecta a la plasticidad, las EIRSU no son plásticas en consonancia con el alto contenido de finos. Las EIRSU están compuestas de partículas que en su conjunto son muy porosas. Sin embargo, las densidades son semejantes a los materiales geológicos, variando entre 2,3 y 2,6 g/cm^3 .

En cuanto a las propiedades mecánicas de las EIRSU, los estudios realizados (Izquierdo, M., 2005) muestran que la capacidad de soporte (CBR es mayor a 65) y la compacidad son elevadas, incluso para compactación, mientras que las resistencias a la abrasión son muy pobres. Los resultados de ensayos proctor modificado indican densidades de $1,8 \text{ gr/cm}^3$ y 12,3% de humedad óptima (informe V, 2001).

Hasta hace relativamente pocos años, se creía que las EIRSU eran un material inerte, pero actualmente algunos estudios apuntan lo contrario, manifestando una cierta reactividad durante el periodo de maduración o envejecimiento (Chandles, et al., 1997; Izquierdo, 2005). Las EIRSU son entonces termodinámicamente inestables en condiciones atmosféricas, porque se forman a altas temperaturas y se someten a un enfriamiento brusco, Esta inestabilidad química provoca procesos mineralógicos durante el almacenamiento, es decir, la espaciación tanto de los elementos mayoritarios como de los minoritarios y trazas.

La maduración se inicia una vez concluida la fase de enfriamiento. Las EIRSU se acumulan en acopios sometidos a los agentes atmosféricos, en los cuales se producen transformaciones químicas. La mayoría de las reacciones que se producen son exotérmicas y comportan un aumento de la temperatura de los acopios de hasta $70 \text{ }^\circ\text{C}$ (Alkemade et al., 1994). Algunas de estas reacciones que transforman las características de las EIRSU son:

- Hidratación de Óxidos
- Carbonatación de Ca(OH)_2 , formación de calcita con la consecuente disminución del pH (Meima y Comnas, 1997).
- Oxidación de los metales.
- Reacciones hidráulicas de la porlandita con otros óxidos, de manera semejante a aquellas que tienen lugar durante la formación el hormigón (Selinger, 1997).
- Formación de silicatos cálcicos hidratados (CSH) y de otras fases propias del cemento como la ettringita, con el consecuente desarrollo de reacciones expansivas (Alkemade et al., 1994).
- Neoformación a largo plazo de minerales de arcilla (Zevenbergen et al., 1994).
- Reacciones con el Al metálico y que pueden desencadenar fenómenos expansivos por acumulación de gas (Chandler et al., 1997).
- Reacciones lentas con el hierro.
- Disoluciones y reacciones con sulfatos para convertir la anhidrita en basanita y formación directa de basanita.

2.4.3 Tratamientos a las EIRSU

A partir de los años 80 ha surgido una creciente preocupación en torno a la valorización de las EIRSU, basándose en el impacto ambiental que pueden ocasionar, especialmente las concentraciones de metales tóxicos medidas en los lixiviados y el cumplimiento de los valores límites establecidos. Todo ello ha motivado un interés por investigar distintas tecnologías de tratamiento.

Los tratamientos habitualmente aplicados a las escorias tienden a reducir el impacto ambiental a la hora del manejo, transporte, vertedero de residuos o reutilización. Los tratamientos más comunes son la separación de los diferentes materiales que componen las EIRSU, la estabilización/solidificación (E/S), la integración de las EIRSU en matrices cementadas, etc.

La separación consiste en alejar del montón los materiales férricos mediante extracción magnética. Existen otros métodos de separación, utilizando procesos químicos, que pueden extraer metales no férricos o constituyentes perjudiciales, pero son muy costosos, razón por la cual no son de aplicación común.

2.4.3.1 Estabilización y solidificación de las EIRSU.

La estabilización y solidificación pueden ser descritas como una tecnología que consisten en inmovilizar, aislar o confinar un contaminante generalmente inorgánico, en una matriz rígida y compacta. La estabilización se basa en la mezcla de una serie de agentes químicos para conseguir reducir la solubilidad y la migración de los contaminantes (Conner, 1993). Así, estos agentes interaccionan químicamente con los residuos con el objetivo de inmovilizar o transformar los contaminantes. El proceso de estabilización propiamente dicho no implica un cambio en las propiedades mecánicas y de manipulación del residuo. En cambio la solidificación se refiere a las técnicas que intentan mejorar las propiedades mecánicas y la manipulación de los residuos. La solidificación no implica una interacción química entre los agentes solidificantes y los materiales residuales.

Muchos de los procesos que actualmente se llevan a cabo para el tratamiento de residuos, se pueden clasificar como de estabilización y solidificación, ya que existe interacción química y a la vez mejora de las propiedades de manipulación y disposición del residuo. Sin embargo, no se considera dentro de la E/S la recuperación y el reciclaje de residuos.

La E/S puede ser clasificada según la naturaleza de los reactivos químicos utilizados, en procesos de E/S inorgánicos y orgánicos.

Procesos de E/S inorgánicos: Son de tipo genérico y son los más utilizados, se basan en la combinación entre los materiales listados a continuación.

- Utilización del cemento Pórtland como reactivo principal
- Cemento Pórtland/silicatos solubles
- Cemento Pórtland/arcilla
- Cemento Pórtland/calcio
- Cemento Pórtland/cenizas volantes
- Calcio/arcilla
- Calcio
- Yeso
- Roca pulverizada
- Fosfatos solubles.

Los procesos de E/S orgánicos logran conseguir matrices sólidas con permeabilidades inferiores a las conseguidas con la E/S inorgánica. Esta ventaja se traduce en la reducción de la velocidad de lixiviación. Los procesos de E/S orgánicos se pueden subdividir en:

- Procesos de polimerización
- Termoplásticos.

A parte de la clasificación de los sistemas de E/S inorgánicos y orgánicos, existe otra categoría de clasificación de procesos que Conner (1993) señala como sistemas de solidificación no químicos. En esta categoría se incluye la vitrificación de los residuos.

La E/S con cemento Pórtland fue una de las primeras tecnologías de E/S aplicadas a los residuos, así por ejemplo, en los años cincuenta se utilizó esta técnica en el campo de los residuos nucleares. La E/S con cemento Pórtland consiste en añadir al residuo el cemento Pórtland, seguidamente el agua que contiene el residuo reacciona químicamente con el cemento formando los silicatos y aluminatos hidratados, inmovilizando el residuo.

Aplicaciones potenciales de E/S.

La tecnología de E/S con cemento Pórtland ha sido aplicada en un rango muy amplio de residuos, existiendo extensa bibliografía sobre la evaluación de la aplicación de procesos patentados en diferentes tipos de residuos (Conner, 1990).

Las aplicaciones más importantes se han llevado a cabo en los siguientes campos (Conner, op. cit.).

- Residuos con un alto contenido de metales.
- Residuos provenientes de la incineración de RSU (escorias y cenizas).
- Escombros contaminados.
- Residuos de industrias de tratamiento de superficies y acabados metálicos.
- Residuos de la industria del petróleo.
- Residuos de la fabricación de acero.
- Sólidos contaminados.

Ventajas y limitaciones de la E/S.

Existe extensa bibliografía donde se detallan las ventajas y desventajas de la E/S con cemento Pórtland para diferentes tipos de aplicaciones, en este apartado enumeraremos las más importantes.

Ventajas:

- Disminución de la lixiviación de metales pesados debido a las reacciones químicas que tiene lugar en el proceso, reduciendo la permeabilidad y aumentando la durabilidad física de la matriz final (Shively, 1986; Akhter et. al., 1990; Chen y Bishop, 1992; Herrera, et. al., 1992).
- Existen en el mercado gran variedad de reactivos químicos asequibles y baratos que pueden ser utilizados en este proceso, así como tecnologías (sistemas de mezcla y manipulación) muy conocidas.
- No es necesario el presecado del residuo, ya que se requiere de agua para la hidratación, la cantidad de cemento y residuo alimentado es adaptada según el contenido de agua de los residuos.
- El sistema es tolerante a muchas variaciones químicas, la alcalinidad del cemento puede neutralizar ácidos y el cemento se ve poco afectado por oxidantes fuertes.

- La presencia de aditivos puede ayudar a disminuir la lixiviación y contrarrestar los efectos del retardo e inhibición de fraguado y endurecimiento.

Desventajas:

- Es necesario adicionar cantidades de cemento elevadas, dando lugar a un incremento de peso y volumen.
- Para residuos que contengan grandes cantidades de agentes inhibidores o retardantes de fraguado tales como boratos y sulfatos, el tratamiento se encarece, ya que requiere el uso de cementos especiales o el uso de aditivos.

2.4.3.2 Integración de las EIRSU en matrices cementantes con cemento Pórtland.

Es una de las aplicaciones más acertadas a la hora de escoger la gestión adecuada a las EIRSU, ya que la tecnología se basa en la utilización del cemento Pórtland, y el estudio de las interacciones entre el cemento Pórtland y las EIRSU.

El cemento Pórtland requiere de una mínima cantidad de agua para tener la plasticidad adecuada de trabajabilidad. La adición de más agua de la estrictamente necesaria puede dar lugar al aumento de la porosidad y la consecuente reducción de la resistencia del producto final. La formulación óptima debe realizarse para cada tipo de residuo, considerando las posibles interacciones entre los constituyentes del residuo y del cemento.

Uno de los posibles efectos en la mezcla de cemento con residuo es la aceleración o la inhibición de los tiempos de fraguado. Se han realizado amplios estudios sobre los agentes inhibidores y acelerantes en las reacciones del cemento (Cullinane et. al., 1987). Estos estudios son de utilidad para poder predecir el comportamiento que se puede esperar de una matriz final.

Potencial de inmovilización del cemento Pórtland, factores que afectan la solubilidad.

Las características químicas del cemento que afectan a los diferentes mecanismos de inmovilización, en la matriz de cemento, por efecto de la interacción con el residuo, dan lugar a los siguientes mecanismos de inmovilización:

- Precipitación de hidróxidos insolubles (debido a la alta alcalinidad del medio).
- Adsorción de iones en la superficie del C-S-H.
- Incorporación de componentes en la red cristalina del cemento.
- Formación de silicatos hidratados y de sales que contienen calcio, que se convierten en fases limitantes de la solubilidad.

Las características químicas del cemento que se han de estudiar para poder entender el porqué de los mecanismos de inmovilización son:

- PH.
- Potencial Redox
- Reacciones químicas (precipitación de carbonatos, precipitación de sulfatos, precipitación de silicatos)
- Complejación
- Adsorción
- Pasivación
- Incorporación crista-loquímica

pH.

El pH es un factor importante en la movilización de residuos en matrices sólidas de cemento y puzolanas. Generalmente a pH elevados los hidróxidos metálicos presentan una baja solubilidad entre pH: 7.5 y 11. No obstante, algunos metales de interés ambiental se solubilizan a pH bajos y altos, sin llegar a coincidir en un pH determinado, lo que complica determinar un pH de solubilidad de forma generalizada.

El pH de solubilidad dentro de una matriz cementante viene dado por la capacidad tampón denominada ANC (Acid Neutralization Capacity) (EPA, 1989). El test ANC consiste en la realización de varias extracciones de acidez creciente sobre una muestra triturada, midiendo el pH final. Al realizar este test, EPA (1989), concluyó que cuando la capacidad tampón aumenta, crece la posibilidad de mantener condiciones alcalinas y evitar la lixiviación de ciertos metales pesados.

Potencial Redox.

El potencial redox evidencia los efectos de estabilización de los metales con cemento Pórtland, mediante diagramas, cuyas escalas se expresan desde potenciales positivos (oxidantes) a potenciales negativos (reductores). En los diagramas resultantes de un potencial redox, se observan los dominios existentes de diferentes especies. Estos diagramas pueden ser de gran importancia en la aplicación de las tecnologías de estabilización (Conner, 1993).

Un ejemplo claro de la importancia del control del potencial redox se encuentra en la fijación de los metales pesados precipitados con sulfuros (provenientes del tratamiento de

aguas). Estos sulfuros metálicos tienen una solubilidad más baja que los hidróxidos, pero su principal problema es que pueden redisolverse en ambientes oxidantes.

Reacción química.

El mecanismo más importante es la fijación de metales, ya que se pueden formar silicatos y carbonatos en las matrices, que sirven para impedir la solubilidad de los contaminantes.

Potencial de adsorción.

El proceso de adsorción tiene lugar cuando una molécula o ión interactúa con la superficie de un sólido. El tipo y magnitud de las fuerzas de cohesión pueden ser muy diferentes: fuerzas iónicas, covalentes, van der Waals, etc. El potencial de adsorción de un sistema es directamente proporcional a la superficie de la partícula y en consecuencia depende de la medida, forma y porosidad de la misma.

El C-S-H tiene una superficie específica muy elevada (10-50 m²/g) creando un potencial de adsorción muy alto. La carga superficial del S-C-H varía según la composición. Si el S-C-H es rico en Ca, entonces tiene una carga superficial positiva, por lo tanto la tendencia es interactuar con los aniones, en cambio si es rico en SiO₂, el S-C-H es un buen adsorbente de cationes.

Pasivación.

Este fenómeno se produce cuando se disuelven sales metálicas, por ejemplo los cationes entran en contacto con aniones que provocan su precipitación en la superficie del sólido formándose una capa impermeable que bloquea e inhibe reacciones posteriores del sólido a nivel de superficie.

Un ejemplo de pasivación es la formación de silica gel a nivel superficial por la presencia de sales metálicas expuestas en una solución de silicatos solubles. En este caso el gel impide el paso de iones metálicos a la solución previniendo la disolución.

Incorporación cristal-loquímica.

El C-S-H es una estructura mayoritariamente amorfa que no se puede determinar por difracción de rayos X (DRX), pero el cemento también contiene algunas fases cristalinas. Estas fases cristalinas no se hacen presentes simultáneamente, y su presencia dependerá de la formulación del cemento, adiciones, temperatura y duración del curado (Alba, N., 1998).

2.4.4 Utilización de las EIRSU.

Se han planteado varias posibilidades para el empleo de las EIRSU, principalmente en el sector de la construcción, ya sea como áridos sustituyendo áridos naturales, en la producción de hormigón o bloques prefabricados, en firmes asfálticos, como material de relleno en terraplenes, sub-bases de carreteras y otras aplicaciones.

Aplicaciones actuales, experiencias en morteros y hormigones.

En Cataluña y en España en general, se colocan las EIRSU en vertederos controlados, aunque la tendencia actual en toda Europa es implementar políticas de gestión de áridos que potencien la valorización respecto al vertedero y permitan el uso de materiales alternativos, esto se traduce en la introducción de tasas de vertido o tasas sobre áridos naturales o incentivos para recuperar estos materiales secundarios e incrementar su utilización. Por otro lado los mismos productores de EIRSU están interesados en la valorización ya que el vertedero supone un gasto muy importante para las plantas de incineradoras y por lo tanto una salida económica viable.

Las escorias están siendo consideradas como materia prima para diferentes aplicaciones, tal es el caso de algunos países europeos cuya producción y aprovechamiento es importante, entre estos se puede citar:

Dinamarca que produce 420.000 T/año y han aprovechado cerca del 100%.

Alemania que produce 2.560.000 T/año y han aprovechado el 50%.

Holanda que produce 600.000 T/año y que aprovecha el 80% (Informe V, 2001).

Sin embargo, las EIRSU tienen el inconveniente de ser sumamente heterogéneas, lo que les resta garantía a la hora de su aprovechamiento, de tal forma que hace falta un control periódico y ambientalmente seguro de la utilización de las escorias. Esto se resume en la creación de una normativa referencial. Actualmente, el único país que tiene marco legislativo estable es Dinamarca y no está sujeto a revisión. Holanda desde 1989 regula el uso de las escorias dentro del marco legal del uso de residuos, el “management” de todos los residuos

sólidos que van regulados por la ley general del año 1992, cuyo principal objetivo es el llamado “life cycle management” que promueve el mantenimiento o modificación de las propiedades de los residuos, para conseguir su aprovechamiento como materiales granulares de construcción, tantas veces sucesivas como sea posible. Mientras tanto en Alemania se viene diseñando desde 1986, un reglamento para el uso de residuos que sirven de base para otras leyes reguladoras. Varios estados de la federación tienen leyes propias en este sentido (Informe V, 2001).

Puesto que la construcción es uno de los mayores consumidores de arena, grava y piedras, ha sido este sector el que ha venido usando gran parte de la escoria que se produce en el mundo.

Para conseguir EIRSU de mejor calidad para su uso, se debe escoger la incineradora de RSU que mantenga las mejores características de cremación y ambientalmente seguras. Por otro lado el tiempo de envejecimiento tanto como el porcentaje de humedad, también son factores muy importantes a considerar.

Bouchard (1978) planteó la utilización de las EIRSU en subbases para pavimentos conjuntamente con ligantes hidráulicos, cuyos resultados se resume en los siguientes puntos débiles:

- Expansión local
- Fragilidad de la interfase con las capas asfálticas.

Collinis (1978) estudió el uso de las EIRSU en mezclas asfálticas como substitutivo de áridos, obteniendo resultados positivos que muestran una posibilidad real de aplicación, Collinis concluyó que las EIRSU exigen una mayor cantidad de ligante bituminoso para llegar a las especificaciones requeridas.

También existen aplicaciones en zonas de rellenos, parking y aeropuertos (Aeropuerto de Philadelphia), debido a las buenas propiedades geotécnicas, dando buenos resultados y sin experiencias problemáticas. Por otro lado, en Holanda se han utilizado escorias en matrices cementadas con cemento pórtland para bases de carreteras (Alkemade y Eymael, 1994) y con asfalto, detectándose bases irregulares debido a expansiones locales. Con la finalidad de estudiar estas expansiones se llevó a cabo un estudio (ibidem) para identificar la causa de las expansiones. Estas han sido atribuidas a la reacción de metales férricos, particularmente al Zn y Al que al estar bajo las condiciones alcalinas que tienen lugar en la hidratación del cemento, originan la formación de los hidróxidos correspondientes a un notable aumento de volumen. Para evitar estas expansiones Alkema y Aymael (op. cit.) recomiendan:

- Mantener en Stock las EIRSU durante un mínimo de tiempo antes de su utilización
- Mantener un control de la humedad de la capa base, cantidad de cemento y propiedades de las EIRSU (sobre todo pérdida de humedad por ignición).

Las EIRSU han sido probadas como áridos en la fabricación de hormigones por sus características, tomando en consideración la posible formación de mineral expansivo, cuyo estudio está siendo tema de análisis. Algunas investigaciones apuntan al aprovechamiento parcial de las EIRSU como árido grueso y fino. Un estudio realizado por Nectoux (1995), demuestra que la escoria utilizada en un 25% como árido en hormigón tiene propiedades físicas y mecánicas semejantes al hormigón con áridos naturales. Sin embargo, se hace notar que estas escorias fueron envejecidas por 5 años, tiempo necesario para que los minerales y las sales se estabilicen y puedan ser lixiviadas o cristalicen de forma más estable en este período.

La resistencia a la compresión, el esfuerzo a flexión y el módulo de elasticidad de los hormigones hechos con EIRSU, para una relación de agua – cemento de 0,73 se encontraron bastante más cerca a las clásicas de 220 kg/cm³ (Waingwright et. al., 2000). Algunos estudios mostraron que el uso de EIRSU como áridos gruesos en hormigones convencionales, hacen que decrezca la resistencia mecánica y que se generen agrietamientos hasta la rotura, por la reacción del metal de aluminio de las EIRSU a causa de la alcalinidad del cemento (ibidem).

En la actualidad son pocos los estudios realizados con escorias en hormigones a largo plazo, sin embargo cabe recalcar que se han hecho grandes avances en materia de hormigones con aditivos y escorias de RSU. Tales aditivos son el humo de sílice, el cual muestra un fraguado relativamente rápido de la mezcla y una buena resistencia mecánica, otro aditamento en hormigones con escoria es la ceniza de sílico aluminatos y el diátomaceous, los resultados mostraron la posibilidad de obtener buena plasticidad (Quenee, B., 2000).

En el caso de los morteros, los estudios fueron llevados a cabo en las fracciones finas 0-2 mm que es ciertamente la fracción más castigada en términos de tiempo de fraguado del cemento, debido al alto contenido de metales como el Zn, Pb e inhibidores de fraguado como fosfatos y materia orgánica. Diferentes tratamientos apuntan a decrecer o eliminarse el efecto inhibidor fijado por reacción química o por efectos físico-químicos, usando adiciones como cal acelerada, cal apagada, yeso, humo de silicato, etc, siendo las cenizas volantes las más efectivas (Quenee, B., 1999).

En cuanto a las propiedades mecánicas de los morteros, son bastante débiles, imposible medir a edades iniciales. Pero pasado este periodo, son relativamente fuertes comparadas con morteros sin escoria. La matriz de cemento tiene una interesante capacidad de estabilizar metales pesados (Quenee, B., op. cit.).

Como se ha mencionado anteriormente, las EIRSU son utilizadas en obra civil especialmente en la construcción de carreteras, lo que permite por un lado reducir la cantidad de residuos que tienen como destino final los vertederos, y por otro lado reducir el volumen de áridos que se extraen de las canteras. En la tabla 2.6 se indican las aplicaciones de las EIRSU en carreteras en algunos países europeos.

Sin embargo, la reutilización de estos residuos está sujeta a estudios exhaustivos, relacionados con la seguridad ambiental y su utilización a corto y largo plazo, cabe entonces conocer la calidad y el envejecimiento de las EIRSU.

Tabla 2.6: Las aplicaciones de las EIRSU en carreteras, en algunos países europeos.

Fuente: Resumen de utilización de EIRSU por países. (Informe V, 2001).

País	Aplicación	Cantidad utilizada
Dinamarca	Escoria en subbases granulares en aparcamientos, carriles de bicicletas y carreteras con y sin pavimento	Más del 90% de la escoria
Alemania	Escoria en capas granulares	Cerca del 50% de la escoria
Holanda	- Escoria en bases granulares; como árido para hormigón asfáltico - Cenizas volantes como árido fino en asfalto	- Más del 90% de la escoria - Cerca del 50% de las cenizas volantes
Suecia	Escoria en pavimentos	Utilización de la muestra estudiada
Estados Unidos	Escoria suelta y escorias con cenizas combinadas como árido en pavimentos (capas granulares y áridos finos de asfalto) y como áridos en cementos para diversas aplicaciones.	Programas de utilización en desarrollo.

2.4.5 Normativas referentes a EIRSU.

Existen diferentes aspectos que dificultan el aprovechamiento de las EIRSU en el campo de la construcción, principalmente porque las EIRSU son aún desconocidas para muchos constructores, lo que se traduce en desconfianza como material de construcción. Además existen otros motivos que limitan su uso, tales como factores de tipo económico que implica el tratamiento de las EIRSU hasta convertirlas en escograva, más aun si existe disponibilidad de áridos naturales, especialmente en zonas con grandes reservas. Otro factor es la actual

incertidumbre en cuanto al comportamiento mecánico a largo plazo de las EIRSU, además, hay que considerar que las EIRSU son evaluadas como áridos bajo los mismos parámetros que los áridos naturales, lo que podría ocasionar la omisión de algunas de las características particulares de las escorias. Pese a que la utilización de las EIRSU origina beneficios ambientales y existen regulaciones establecidas que intentan normalizar la valorización de las EIRSU, el factor más limitante es la preocupación sobre el posible impacto ambiental, especialmente de los lixiviados que puedan liberar contaminantes a las aguas superficiales y subterráneas, así como otros impactos que alteran el entorno de aplicación.

Para mitigar estos factores, es necesario realizar un estudio integral de las características físicas, químicas y mineralógicas, determinar las propiedades mecánicas y de durabilidad, así como el impacto ambiental y comparar con los requerimientos del marco legislativo vigente según la aplicación que se prevea, tomando en cuenta las recomendaciones existentes. En este sentido se han considerado las recomendaciones del IAWG (International Ash Working Group) (Wiles, 1994) para seleccionar, diseñar y hacer efectiva la utilización de residuos de incineración de RSU. En tanto que también se han de ceñir al marco legislativo de las EIRSU, en los siguientes aspectos de valorización:

- Como un residuo industrial generado: según el Catálogo de Residuos de Cataluña y el Catálogo Europeo de Residuos (Agencia de Residuos de Cataluña, 2004).

- Como un residuo industrial valorizable: según la Orden del 15 de Febrero de 1996 sobre valorización de escorias (Departamento de Medio Ambiente, 1996).

- Como áridos para pavimentos de hormigón compactado y grava-cemento: Esta aplicación es la que se pretende estudiar en la presente tesis, por lo que se ha de considerar el Artículo 516 de hormigón compactado y 513 de grava-cemento del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales par obras de carreteras y puentes (desde este momento PG-3/2002).

2.4.5.1 Recomendaciones generales del “International Ash Working Group” del (IAWG) sobre la utilización de residuos de incineración.

Las EIRSU pueden ser utilizadas con efectividad como sustituto de áridos en varias aplicaciones siempre que coincidan con los criterios estructurales y ambientales. Según la IAWG (1994) para seleccionar, diseñar y hacer efectiva la utilización de EIRSU se han de tener en cuenta los factores que se detallan a continuación.

- La alta alcalinidad causada por la adición de cemento puede aumentar la migración de algunos metales, lo que se ha de tener en consideración en el diseño de la utilización.
- La utilización de EIRSU como rellenos estructurales en grandes aplicaciones puede llegar a lixiviar elevadas sales. En algunas aplicaciones se hace necesario la previa extracción de las sales solubles del material.
- Los metales (férricos y no férricos) de las EIRSU deben ser separados de las antes de su utilización como áridos.
- Las EIRSU antes de ser utilizadas es conveniente que se almacenen durante un tiempo (1-3 meses) para que se produzcan reacciones de hidratación, carbonatación y oxidación, beneficiando la estabilidad química y estructural del material.

El diseño y puesta a punto de la utilización de cualquier tipo de residuos de incineración de RSU se ha de basar en un conocimiento a fondo de los residuos a utilizar, caracterización del residuo, condiciones ambientales, requisitos estructurales necesarios y normativa legal a cumplir. Toda esta información se ha de añadir a un protocolo completo de evaluación, incluido ensayos para conocer la capacidad potencial de lixiviación, solubilidad, velocidad de migración, durabilidad física, entre otros.

Además el productor del residuo ha de desarrollar un protocolo de evaluación de la calidad de su producto para asegurar su aplicación.

Por otro lado, por la diferente composición en cuanto a metales y sales solubles (mucho más elevada en los residuos de depuración de gases), se recomienda que la gestión de EIRSU se realice de forma separada de otros residuos. También el IAWG recomienda separar la criba de las EIRSU, de las rejillas de la planta (si es que estas son utilizadas), (Wiles, 1994), así se evita que la filtración proveniente de las rejillas este contaminada con plomo. Además, es importante resaltar el problema de los residuos de la depuradora de gases, que pueden llegar a impedir que sean utilizados, ya que tienen un elevado contenido de sales solubles difíciles de tratar y que fácilmente lixivian.

2.4.5.2 EIRSU como un residuo industrial generado.

El Catálogo de Residuos de Cataluña y el Catálogo Europeo de Residuos, califican y clasifican a los residuos en función del origen y características, así como recomiendan la gestión que ha de realizarse. No obstante, los dos catálogos proponen la valorización como la forma de gestión prioritaria. Las opciones de valorización son: comercialización y reutilización o reciclaje. También indican los sistemas óptimos de tratamiento y disposición de cada residuo.

En el caso de las EIRSU, el Catálogo de Residuos de Cataluña propone la valorización “V71” que corresponde a “Utilización en la construcción”, esta valorización es muy semejante al “V48” del Catálogo Europeo de Residuos en que valoriza a las EIRSU como “Utilización para recubrimiento del terreno, restauración y actividades extractivas.

En cuanto a la disposición se propone la opción “T-12” como corresponde a la naturaleza del material, no considerándose como residuo peligroso y desde luego se trata de un residuo no especial.

2.4.5.3 Legislación medioambiental.

El aprovechamiento de las EIRSU está regulado por la Orden del 15 de Febrero de 1996, sobre valorización de escorias del Departamento de Medio Ambiente (Ministerio de Medio Ambiente, 1996). La evaluación del aprovechamiento se realiza según la composición química y el comportamiento frente a los test de lixiviación, según esto la Orden califica a las EIRSU en:

Valorizables: Aquellas EIRSU que cumplen con las características especificadas en el anexo 1 de dicha Orden.

No valorizables: Aquellas que no cumplan con las características especificadas en el anexo 1. Estas serán por tanto gestionadas a través de un vertedero controlado.

En la tabla 2.7 se indican los límites establecidos en dicho anexo de la Orden del 15 de Febrero de 1996, sobre valorización de escorias del Departamento de Medio Ambiente (Departamento de Medio Ambiente, 1996).

Tabla 2.7: Límites establecidos en el anexo 1 de la Orden del 15 de Febrero de 1996, sobre valorización de EIRSU del Departamento de Medio Ambiente (1996).

Parámetros a determinar sobre los lixiviados de EIRSU según: DIN 38414-S4		Parámetros a determinar sobre muestras sólidas	
Elemento	Concentración límite	Parámetro	Valor límite
As	0,1 mg/lit	Pérdida a 105 °C	5%
Cd	0,1 mg/lit		
Cu	2 mg/lit	Inquemados	5%
Cp	0,1 mg/lit		
Pb	0,5 mg/lit	Fracción soluble	3%
Zn	2 mg/lit		

Las EIRSU valorizables podrían ser utilizadas de acuerdo con la Orden de Valorización de EIRSU en las siguientes aplicaciones:

- subbases de carreteras.
- nivelación y relleno de terrenos.
- recubrimiento y restauración de áreas degradadas por actividades extractivas.
- Otras aplicaciones autorizadas por la junta de residuos.

Además la Orden establece algunas condiciones para su utilización de manera que todas las posibles aplicaciones de las escorias han de tener en cuenta las siguientes prohibiciones.

No se utilizará:

- En zonas inundables.
- A menos de 30 m de distancia de ríos ni torrentes.
- En terrenos que tengan el nivel freático a menos de 5 m de la superficie del suelo.
- A menos de 100 m de distancia de cualquier explotación de aguas subterráneas que abastezca de agua potable a poblaciones.

No se podrán emplear en zonas con importantes espesores de los siguientes materiales:

- Material consolidado con elevada permeabilidad por intensas fisuraciones.
- Materiales porosos no consolidados como son los dispositivos aluviales y las zonas costeras.

La Orden también establece ciertas limitaciones para cada una de las aplicaciones propuestas. En el caso de subbase de carreteras es necesario que la capa de EIRSU utilizada no sobrepase un grueso de 50 cm y que la carretera tenga una capa superficial de mezcla asfáltica.

2.4.5.4 EIRSU como áridos para pavimentos de hormigón compactado y grava-cemento.

El sector de la construcción de carreteras es uno de los mayores consumidores de áridos naturales, principalmente de arena, grava y materiales de cantera, las cantidades de áridos requeridas son lo suficientemente extensas como para justificar el estudio de viabilidad del uso de EIRSU como áridos artificiales para firmes. La presente tesis pretende estudiar la viabilidad de la utilización de EIRSU como áridos en firmes de pavimentos de hormigón compactado y grava-cemento, por lo que se ha de considerar el Artículo 516 de hormigón compactado y 513 de grava-cemento del PG-3/2002

2.5- ESTUDIO DE PAVIMENTOS CON HORMIGÓN COMPACTADO Y GRAVA- CEMENTO.

2.5.1 Definición.

El hormigón compactado con rodillo (HCR) es un hormigón que resulta de la mezcla de áridos homogéneos, más cemento, adiciones (si es el caso), y agua, cuya relación agua cemento es baja, con una resistencia y contenido de conglomerante semejantes al de un hormigón vibrado convencional. La grava-cemento es semejante al HCR, pero con un contenido de cemento mucho más bajo.

2.5.2 Características principales del hormigón compactado y la grava-cemento.

La estructura del HCR es semejante a la de una grava-cemento (G-C), aunque el contenido de cemento que posee y las resistencias que alcanza el HCR se asemejan más a un hormigón convencional.

La característica más importante de un HCR y de la G-C es su bajo contenido de agua en la mezcla (del 4,5 al 6%, cercano al obtenido con el ensayo Proctor modificado con un asentamiento nulo), lo suficientemente bajo como para conseguir resistencias elevadas que permitan perfectamente soportar cargas de los equipos de consolidación, pero no tan bajas como para impedir que la pasta se distribuya entre los áridos durante el proceso de amasado y compactación y no logre su unión.

Otras de las características son:

- La fabricación se puede realizar en una planta continua de grava-cemento. En el caso del HCR habrá que adaptar los sistemas de dosificación del cemento, ya que se incrementará la cantidad dosificada de un 5-6% (4,5% según el PG-3/2002) a un 10-14% (10% según el PG-3/2002), o en una planta discontinua de hormigón convencional.
- La puesta en obra se realiza mediante la maquinaria utilizada para la extensión de la grava-cemento o bien la utilizada para la puesta en obra de un aglomerante asfáltico.
- El contenido de conglomerante para el hormigón compactado es similar al de un hormigón convencional, pudiéndose utilizar cemento con alto contenido de ceniza volante o escoria.
- La capacidad de soporte inicial es elevada, por la estabilidad del esqueleto mineral de los áridos, una vez en estado compacto.
- Poseen baja retracción hidráulica, ya que su relación agua-cemento es inferior a 0,4.

Ventajas e inconvenientes de utilizar HCR y la grava-cemento.

Algunas de las propiedades del HCR y de la grava cemento, hacen más versátil su utilización, tales ventajas se pueden traducir en que el contratista no tiene la necesidad de invertir en la maquinaria para puesta en obra y fabricación, ya que es totalmente convencional (maquinaria para firmes asfálticos o compactación de terraplenes); otra de las ventajas es la mayor separación entre juntas de retracción que en el hormigón vibrado, finalmente está la alta capacidad de soporte inicial que permite una apertura inmediata al tráfico una vez finalizada la compactación.

El principal inconveniente que presentan el HCR y la grava cemento es la exigua regularidad superficial, pero en vías de baja intensidad de tráfico y de velocidades reducidas, la regularidad superficial resultante y el acabado superficial antideslizante, producido mediante el fratasado mecánico es suficiente para garantizar comodidad y seguridad al usuario. En caso de

tráfico importante y velocidades elevadas, hay que cubrir la superficie del hormigón con una capa de mezcla bituminosa o con un tratamiento superficial de varios centímetros de espesor, colocándose algunos de los dispositivos existentes para evitar la reflexión de las juntas.

Otra limitación en la utilización del HCR y grava-cemento, es la notable sensibilidad de su resistencia a pequeñas variaciones de densidad en el proceso de puesta en obra. Por este motivo, es importante asegurar una adecuada compactación del material con un número suficiente de pasadas de los rodillos vibrantes, y controlar que la densidad mínima exigida se haya alcanzado.

2.5.3 Experiencias de hormigones en pavimentos compactados en España.

El empleo de hormigón compactado con rodillo (HCR) para pavimentos está creciendo rápidamente en las construcciones civiles, tanto en España como en otros países. En España, en la provincia de Barcelona en 1970, se puso en marcha esta técnica para pavimentos con tráfico ligero, en urbanizaciones y caminos rurales. Esta aplicación fue desarrollada por algunos contratistas locales de forma autodidacta, es decir sin estudios previos de laboratorio y sin los suficientes controles durante la ejecución.

Los resultados de estas aplicaciones han servido para ganar experiencia, y se puede afirmar que esta tecnología es totalmente adecuada a los tipos de vías en las que se ha utilizado. Actualmente la superficie pavimentada con HCR en España supera los cuatro millones de metros cuadrados.

Desde 1985 esta tecnología se ha utilizado en España para toda clase de tráfico y en todo tipo de obras, tanto en calzadas nuevas como en refuerzos, ensanches, adición de carriles lentos o en sustitución parcial de firmes existentes.

2.5.4 Secciones estructurales utilizadas.

Para vías rurales y urbanas, cuyo tráfico se puede asimilar al definido en la instrucción 6.1 y 2-IC de la Dirección General de Carreteras por T4 (menos de 50 vehículos pesados en el carril del proyecto y en el año de puesta en servicio), se ha utilizado generalmente un espesor de 15 cm de HCR y en caso de zonas industriales con vehículos pesados se han usado espesores de HCR de hasta 20 cm.

En cuanto a las subbases utilizadas en HCR, generalmente han sido granulares de 15 cm de espesor y si la explanada es de buena calidad, apoyado directamente sobre esta.

Las especificaciones españolas exigen una resistencia característica a la tracción indirecta del HCR de 3,3 MPa (33 kg/cm²) a los 28 o 90 días, en función del porcentaje de adición que se incluya en el aglomerante o si se utiliza cementos con alto contenido de conglomerantes. Esto equivale a conseguir una resistencia media de a flexotracción de 5.5 MPa (55 kg/cm²). Esta última es la resistencia normalmente requerida al hormigón vibrado utilizado para pavimentos sometidos a tráfico pesado.

En caso de vías de baja intensidad de tráfico la resistencia característica a tracción indirecta exigida se puede reducir a 2,8 MPa (28 kg/cm²).

2.5.5 Áridos, cemento y dosificaciones recomendadas.

Áridos.

Los áridos para HCR deben cumplir con las prescripciones requeridas para su utilización en una grava-cemento establecidas en el artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3/2002.

Para una mejor trabajabilidad de la mezcla se ha de utilizar áridos menores a 20 mm, evitando la segregación y obteniendo un buen acabado superficial. La experiencia española, de más de 20 años y en especial la de Cataluña ha demostrado también que se puede utilizar tamaños mayores, incluso de 38 mm, ya que mientras se realiza el proceso de fratasado mecánico con que se obtiene el acabado superficial final, las oquedades superficiales que hubieran quedado al utilizar el árido demasiado grueso, se terminan cerrando con el material fino.

En la tabla 2.8 se indican los husos granulométricos incluidos en el pliego de prescripciones técnicas PG-3/2002 del ministerio de Fomento, que son extrapolables en caso de vías de baja intensidad de tránsito. Y para limitar el total de finos, que son los que podrían crear problemas de compactación.

Tabla 2.8: Husos granulométricos incluidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3/2002. Fuente: Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3/2002 del Ministerio de Fomento.

TAMAÑO DEL TAMIZ	PORCENTAJE QUE PASA	
	Tamaño máximo 16 mm.	Tamaño máximo 20 mm.
25 mm	-	100
20 mm	100	85 – 100
16 mm	88 – 100	75 – 100
10 mm	70 – 87	60 – 83
5 mm	50 – 70	42 – 63
2 mm	35 – 70	30 – 47
400 μm	18 – 30	16 – 27
80 μm	10 – 20	09 – 19

La curva granulométrica idónea se encuentra mediante ensayos de laboratorio, utilizándose dos o tres tamaños de árido (0-5 mm, y 12-20 mm), generalmente con granulometría continua, aunque hay casos en que ciertas granulometrías no encajan dentro del huso, pero es posible utilizarlas en la obra.

En cuanto al coeficiente de desgaste Los Ángeles, se estipula como no menor a 35, permitiéndose en la arena con contenido de finos (tamiz 0,08 UNE) mayor que el hormigón convencional, donde se limita al 5%. Estas menores restricciones permiten aprovechar los áridos locales con calidades incluso inferiores a las requeridas para hormigones convencionales.

El índice CBR debe ser superior a 65 para lograr una capacidad portante inmediata. Para lograr esta característica, se recomienda que los áridos sean de origen generalmente silíceos y calizos, mayormente de machaqueo y con un mínimo de dos caras de fractura (normalmente 1/3 de machaqueo y 2/3 de cantos rodados). Tras lo cual se logra que el esqueleto mineral tenga alta capacidad portante, capaz de soportar el tráfico una vez terminado el curado y protección.

Cemento.

En el hormigón compactado se recomienda utilizar cementos con un alto contenido de adiciones activas (cementos tipo V con adiciones de cenizas volantes o de escorias granuladas de horno alto entre el 36% y el 80%) (IECA, 1996), y que a edades mayores puede alcanzar similares resistencias que otros tipos de cementos, aunque poseen un desarrollo de resistencia lenta a primeras edades con un bajo calor de hidratación durante el fraguado y menor retracción

térmica (por tanto menor fisuración). Otra de las ventajas de utilizar este tipo de cementos es que mantiene la trabajabilidad del material durante más tiempo, aportando docilidad al hormigón y en consecuencia facilitando la puesta en obra.

Las ventajas de evitar la mezcla en la planta de hormigón son a la vez no tener que almacenar (duplicidad de silos) y manipular dos materiales pulverulentos, garantizando además, una mejor homogeneidad y mezcla del producto si este proceso se desarrolla durante la molienda del clinker. En caso de adicionar cenizas en obra, se recomienda el uso de cenizas silicoaluminosas, de la misma forma, poniendo especial cuidado a las posibles expansiones que se puedan producir en el caso de utilizar cenizas sulfocálcicas, cuidando además, los ensayos de recepción de la muestra, para comprobar y asegurar lo mejor posible su homogeneidad, evitando así, grandes dispersiones que afecten negativamente a las resistencias.

Dosificación.

La dosificación de conglomerante en estos hormigones era inicialmente de unos 260 kg/m³ aproximadamente (170 kg de cemento I/45 y 90 kg de cenizas), siendo en la actualidad del orden de 300 a 330 kg/m³, adiciones incluidas (50-60% del total). En algunas zonas de España, en particular en Asturias, se dosifican porcentajes mayores de cemento (alrededor de 400 kg/m³), pero con unos contenidos en adiciones más altos (hasta del 75%).

Para la dosificación de los áridos se ha de utilizar normalmente 2 o 3 tamaños (0-5 mm, 5-12 mm y 12-20 mm), distribuyéndose según las recomendaciones del IECA (1996) en 35% de fracción 0-5 mm y 52% de fracción 5/20 mm.

Los contenidos de humedad varían entre el 4,5% y el 6,3% siendo el más utilizado el 5,5%. En alguna ocasión se ha utilizado un retardador de fraguado, en una proporción del 0,5% del peso de conglomerante, para asegurar la no formación de una junta fría longitudinal en caso de puesta en obra por semianchos.

2.5.6 Fabricación y puesta en obra.

Para la fabricación de este tipo de hormigón se puede emplear indistintamente plantas continuas (las mismas utilizadas para las mezclas de las bases tratadas con cemento, aunque adaptándolas a este caso) o plantas discontinuas como las utilizadas en la fabricación del hormigón tradicional. Si se utiliza una planta continua de grava-cemento hay que adaptar los

sistemas de dosificación del cemento de un 5-6% a un 10-14%, así como aumentar el volumen o número de silos. Además el sistema de dosificación deberá ser ponderal.

En algunas obras especialmente cuando estas tienen poco volumen, se han utilizado plantas dosificadoras, realizándose el amasado en camiones hormigonera, aunque el rendimiento de fabricación es en este caso muy inferior.

El tiempo de amasado deberá ser más o menos prolongado que en el caso de un hormigón convencional por la escasa cantidad de agua que dificulta el mezclado (algo más de un minuto).

Habitualmente el transporte del material desde la planta a la obra se efectúa mediante camiones volquete (bañeras) de 8 a 12 m³ de capacidad, siendo importante reducir la altura de la caída del material desde la mezcladora al camión para evitar segregaciones, cubriéndolo con una lona en el caso de temperatura ambiente elevada y con una gran distancia entre la planta y la obra, para impedir pérdidas de humedad.

Extendido.

Para el extendido del hormigón en vías rurales y urbanas se utilizan habitualmente motoniveladoras, el empleo de este tipo de maquinaria viene prácticamente impuesto por el contratista, ya que suele ser el equipo del que dispone.

Las motoniveladoras se adaptan muy bien a obras urbanas en las que existen ciertas dificultades de carácter geométrico y a caminos rurales que suelen ser muy estrechos y en los que, cada cierta distancia, se realiza un ensanche para facilitar el cruce de los vehículos.

Por otra parte, la desventaja de no obtenerse con ellas una regularidad superficial muy elevada no suele ser un factor muy decisivo en este tipo de vías, dada la velocidad a la cual circulan los vehículos. En este caso, la regularidad obtenida dependerá de la habilidad del maquinista, siendo aconsejable un refino posterior con la motoniveladora para lograr un buen acabado, evitándose las aportaciones de capa delgada que suelen levantarse. El refino se realiza extendiendo 1 ó 2 cm de más y, alcanzando el 95% de la densidad, luego se retira el material con la cuchilla de la motoniveladora, continuándose la compactación.

En algunas obras se han utilizado extendedoras viejas de aglomerado, pero la escasa compactación lograda con ellas hace que no sean muy adecuadas, ya que no se mejora la regularidad superficial. Sin duda, la mejor solución desde el punto de vista de una obtención de

buena regularidad superficial es el uso de extendedoras para capas tratadas con cemento, dotadas de regla vibrante y tamper, aunque no suelen disponer de ellas los contratistas que ejecutan ese tipo de vías.

Previo al extendido del material conviene humedecer la explanada para que no absorba la humedad del hormigón, así como pulverizar agua sobre el material (no regar) si este se deseca mucho superficialmente. Hay que tener en cuenta, que la relación entre material compactado y material extendido es del orden de 0,8, por lo que será necesario extender un espesor de 20 cm sí se desea obtener una sección con un espesor compactado final de 16 cm.

Compactación.

Para obtener un correcto comportamiento del material es fundamental la fase de compactación. Las especificaciones españolas recomiendan una densidad media no menor del 97% de la densidad óptima del ensayo proctor modificado y una densidad mínima en superficie no menor al 95%.

El equipo usual de compactación está compuesto por un rodillo vibrante pesado que suele dar 10 pasadas, efectuando las 2 ó 3 primeras sin vibración, al igual que la última. El exceso de pasadas de rodillo, además de ser un gasto inútil de energía, puede llegar a dañar la superficie del pavimento (aparición de múltiples fisuras con levantamiento superficial), pero no hay que olvidar la importancia de obtener densidades de las que depende la resistencia del pavimento.

Es importante cerrar completamente la superficie para que no se degrade y los áridos se desprendan con el paso del tráfico. Por esta causa, deberá ascender durante la compactación suficiente lechada para que se cierre perfectamente. Una vez abierto al tráfico, parte de la lechada se desprenderá originando un polvillo deslizante que desaparecerá inmediatamente, pero dejando los áridos bien embutidos.

Para la compactación de los bordes exteriores de la calzada se utilizan equipos ligeros como las placas vibrantes o pequeños rodillos manuales, en ocasiones se ha utilizado también un compactador de neumáticos para obtener una superficie de hormigón más cerrada.

A ser posible, conviene colocar previamente una contención lateral, bien sean los propios bordillos en calles o bien dejar un sobreecho para evitar que el tráfico dañe las zonas

peor compactadas y evitar el paso inmediato del tráfico por estos puntos hasta lograr una resistencia adecuada.

Juntas.

Juntas longitudinales.

En este tipo de pavimentos no se ejecutan juntas longitudinales. En caso de que el pavimento se extienda por semianchos, se deja sin compactar una franja de 40 a 50 cm o en la lateral de la primera banda extendida, compactándose posteriormente con la segunda banda. Por supuesto, esta última operación debe realizarse dentro del tiempo de trabajabilidad del material colocado en la primera (si no se puede utilizar un retardador de fraguado que alarga este tiempo de trabajabilidad hasta 1 ó 2 horas según el clima), siendo conveniente pulverizar agua sobre la franja no compactada para evitar su desecación.

Esta junta no se forma si se realiza adecuadamente este proceso como se ha podido comprobar en algunos pavimentos con anchos de hasta 12 m.

Juntas transversales.

En vías de baja intensidad de tráfico, donde no se coloca ningún tipo de capa de rodadura, las juntas se pueden realizar de las siguientes maneras:

- Por serrado mediante sierra de discos sobre el hormigón endurecido.
- En fresco, mediante un rodillo pequeño o placa vibrante a la que se suelda una lámina metálica en forma de cuchilla, de 1 cm aproximadamente de espesor, que corta el hormigón cuando está prácticamente compactado (entre el 92 y 95%), procediéndose después a terminar la compactación permitiendo la libre fisuración.

Por diversos motivos es necesario que se sieren las juntas, pudiéndose mencionar, además de las razones estéticas, el que logran unos bordes de junta mucho más resistentes.

Esta distancia de serrado se ha ido reduciendo desde los 10 o 15 m iniciales a los 7 m actuales, con una profundidad de corte entre 5 y 7 cm en función del espesor (se recomienda 1/3 del espesor HCR) . El tiempo de serrado no es tan crítico como el hormigón vibrado, pudiendo variar entre 9 y 18 horas en tiempo caluroso y entre 24 y 28 horas en climas suaves.

En el caso particular de vías urbanas, la distancia y situación de las juntas debe conjugarse con la disposición de los elementos rígidos de servicio (alcantarillas, etc.), para evitar que se produzcan juntas espontáneas.

Juntas de hormigonado.

Las juntas de hormigonado o de fin de día deben realizarse cuidadosamente dejando el borde vertical para evitar riesgos de pandeo o de cabalgadura de una losa sobre otra.

Las recomendaciones de diferentes autores aconsejan realizarlas de la siguiente forma:

- Se compacta el extremo en cuña para permitir bajar la maquinaria, colocándose previamente una lámina de plástico debajo.
- Se retira una franja de 30 ó 40 cm previos a la cuña rellenándose con grava y se compacta bien el borde.
- Al iniciar el tajo, se retira la cuña y la grava, limpiándose bien la junta vertical con el aire y agua a presión o con cepillo, y se continúa el extendido con un sobreespesor, compactando la unión cuidadosamente.

Esta junta se deberá realizar cada vez que se interrumpa el extendido por un plazo al de la trabajabilidad del material que, en caso de no utilizarse un retardador de fraguado, será de 2 horas.

Una forma más rápida de realizar la junta, aunque con peores resultados, se logra mediante la colocación de un tablón como encofrado, apoyado en una cuña de arena para permitir la entrada y salida de los equipos. Con el tablón hay que cuidar especialmente que no quede inclinado, que no se levante de un lateral al pasar el rodillo por el otro y que la compactación de los últimos 20 ó 30 cm sea adecuada, evitando que los rodillos se apoyen sobre el tablón.

Otra posible solución es compactar una cuña de HCR para posteriormente eliminarla, cortándola, por ejemplo, con la cuchilla de la motoniveladora y formando una sección bien acabada en la que quede un borde totalmente vertical que debe ser curado a continuación.

Curado.

Para evitar la desecación del hormigón por la pérdida del agua, necesaria para su fraguado, se debe proceder al curado del mismo una vez compactado. En este tipo de vías el curado se puede llevar a cabo mediante varios métodos:

- Una pulverización final manual de agua constante a fin de evitar la desecación de la superficie durante varias horas.
- El recubrimiento mediante plásticos de la superficie hormigonada de manera que eviten la evaporación del agua del HCR.
- La extensión de un producto de curado al acabar las operaciones de extendido, compactación y acabado superficial.

Textura superficial.

Con el objeto de obtener una textura antideslizante, hay que efectuar algún tratamiento de acabado que produce el paso de los rodillos vibrantes. Después de realizada la compactación puede darse unas pasadas adicionales, previa la extensión de una lechada de cemento que cierre totalmente el pavimento y que sirve como terminación superficial.

Para eliminar el posible exceso de lechada se efectúa un fratasado mecánico con helicóptero. Este tipo de acabado es solo recomendable para velocidades inferiores a 40 km/hora, como suele ser el caso urbanizaciones residenciales, aparcamientos y vías urbanas. Para velocidades superiores es recomendable un tratamiento superficial con ligantes modificados. Si esta deja que desear, habrá que acabar con una capa de aglomerado asfáltico en caliente de composición bien estudiada, dado que suele ser de pequeño espesor.

Limitaciones durante la construcción: Lluvia y helada.

El proceso de compactación del HCR, mediante rodillo es muy sensible a las variaciones en la humedad de la mezcla. El exceso de agua que produce la lluvia durante estas operaciones, puede causar el colchoneo del material y, por tanto, su deficiente compactación, a parte de un lavado superficial de la lechada de cemento. Se ha podido comprobar en algunos casos que un pavimento recién abierto al tráfico, pero sometido a una intensa lluvia, ha resultado dañado. Por tanto, es conveniente no extender HCR mientras llueva.

Otra limitación en los periodos de extensión el HCR surge del tipo de conglomerante utilizado que contiene normalmente un alto porcentaje de adiciones. Este tipo de cemento presenta una curva de endurecimiento más tendida que la de un cemento con pocas adiciones.

Este hecho provoca que durante el tiempo de endurecimiento el material es sensible a posibles descensos de las temperaturas por debajo de los cero grados Celsius. Por tanto, si se prevé que esta circunstancia puede ocurrir, es conveniente interrumpir la extensión del material.

Consideraciones económicas de las obras de HCR y G-C.

En los pavimentos compactados y en la grava-cemento, aplicados para vías de baja intensidad de tráfico, las soluciones son económicamente competitivas respecto a las soluciones más tradicionales. Otra de las ventajas antes reseñadas es la utilización de equipos que normalmente ya poseen los contratistas locales y que les permite ejecutar este tipo de obras de pavimentación a precios competitivos, puesto que no tienen que realizar grandes inversiones económicas en maquinaria. Por otra parte, frente a métodos manuales de construcción de pavimentos de hormigón vibrado, el HCR presenta las ventajas de su mayor rendimiento y, por tanto menor coste (Josa, A., 1996; IECA, 1996 y 2003).

CAPITULO 3

3.-CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.

3.1.- INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se realizó la caracterización, física, mecánica y química, la determinación de la composición mineralógica y el estudio de la reacción del sulfato de magnesio en las EIRSU. Además, se compararon las EIRSU estudiadas con los áridos naturales, para la fabricación de hormigones, lo que permitió ver el grado de aprovechamiento de las EIRSU en este tipo de mezclas, reemplazando de forma parcial los áridos naturales. Los resultados obtenidos sirvieron de referente para los capítulos posteriores de la presente tesis.

Previo a la caracterización de las EIRSU, se hizo un análisis de los resultados de caracterización de las EIRSU, sobre muestras **todo uno (0-20 mm)**, realizado en base Informe V (2001), Estas escorias provienen de las 7 plantas de incineración de RSU en Cataluña.

Como consecuencia de dicho análisis se marcaron una serie de directrices a tomar en cuenta para la utilización de las EIRSU en esta tesis. Así pues, se seleccionaron las EIRSU provenientes de las plantas de incineración de RSU de Tarragona y Mataró. Al mismo tiempo, se argumentaron las limitaciones de utilizar EIRSU pertenecientes a la fracción fina 0-5 mm, quedando la fracción gruesa 5-20 mm como material idóneo a utilizar. Además, se separaron en dos fracciones 5-12 y 12-20 mm y se utilizaron las EIRSU con un tiempo de envejecimiento de tres meses.

A continuación se procedió a la caracterización, física, mecánica y química y en la determinación de la composición mineralógica. También se realizó el estudio reacción del sulfato de magnesio en las EIRSU para determinar el grado de estabilidad de las EIRSU frente a ciclos de hielo-deshielo y finalmente se redactaron las conclusiones de la caracterización.

En las conclusiones del presente capítulo, se realiza una comparativa de las EIRSU estudiadas y los áridos naturales, para la fabricación de hormigones. Esta comparativa permite ver el grado de aprovechamiento de las EIRSU como áridos en hormigones. A partir de este punto se escogieron las muestras de EIRSU de la planta de Mataró que se utilizaron en los capítulos posteriores de esta tesis.

3.2.- EVALUACIÓN DE LAS EIRSU DE CATALUÑA

La evaluación de las EIRSU de Cataluña se hizo bajo la luz del Informe V (2001), de donde se extrajo el estudio de caracterización de las EIRSU todo uno envejecidas por lo menos tres meses antes de su utilización (se utilizaron EIRSU envejecidas puesto que dicha maduración o envejecimiento provoca una mejora en las características que resulta positiva para su uso como materiales en la construcción). Estas EIRSU provienen de las 7 plantas de incineración de RSU en Cataluña, ubicadas como se muestra en la figura 3.1.

Del estudio de caracterización del Informe V (2001) se citan los ensayos y resultados de caracterización más relevantes sobre las EIRSU todo uno, así como también se elabora una lista de las principales conclusiones y recomendaciones para la selección de las EIRSU. Finalmente, se incluyen las consideraciones estimadas en esta tesis para la selección de la planta de RSU de donde se extraerán las EIRSU que se utilizarán en la presente investigación como árido para HC y G-C. Lo citado en este apartado se indica en el siguiente orden:

- 1) Clasificación de los tipos de materiales constituyentes en las EIRSU todo uno (excepto la fracción 0-5 mm -Informe V, 2001-)
- 2) Granulometría (Informe V, 2001).
- 3) Composición química (Informe V, 2001).
- 4) Determinación del contenido de materia orgánica (Informe V, 2001).
- 5) Compuestos mineralógicos (Informe V, 2001).
- 6) Lixiviación, pH y conductividad (Informe V, 2001).
- 7) Conclusiones y recomendaciones generales de selección del las EIRSU en base al Informe V (2001).

8) A partir de las conclusiones y recomendaciones generales de selección de las EIRSU en base al Informe V (2001), se establecieron una serie de directrices a la hora de seleccionar las EIRSU utilizadas en la presente tesis, planteando así las condiciones favorables que han de prestar las plantas de incineración de RSU, para utilizar sus EIRSU en la aplicación de un tramo experimental de carretera.

Figura 3.1: Plantas de incineración de RSU en Cataluña



Plantas de incineración de RSU en Cataluña

Fuente: <http://www.icc.es/>

1) Clasificación de los tipos de materiales constituyentes en las EIRSU todo uno, excepto la fracción 0-5 mm (Informe V, 2001).

La clasificación de los tipos de materiales constituyentes en las EIRSU todo uno se realizó por medio de la identificación visual de cada muestra (excluyendo la parte fina o menor al tamiz 5 mm, por la imposibilidad de identificar a simple vista los materiales componentes en estas fracciones). Para realizar este ensayo se lavó la muestra, posteriormente se secó en la estufa a 110

°C, se cribó 35 kg del material según la normativa UNE-EN 933-1, se separó el retenido entre los tamices 5 mm y 20 mm y se pesó, a continuación se separaron los materiales según la clasificación que se muestra en los resultados, y finalmente se calculó el porcentaje de participación de cada material con respecto al 100% del peso total de la muestra utilizada. En la foto 3.1 se puede ver una de las muestras de EIRSU utilizadas en este apartado. Los resultados de las EIRSU de la fracción gruesa 5-20 mm se muestran en la tabla 3.1 y gráfico 3.1.

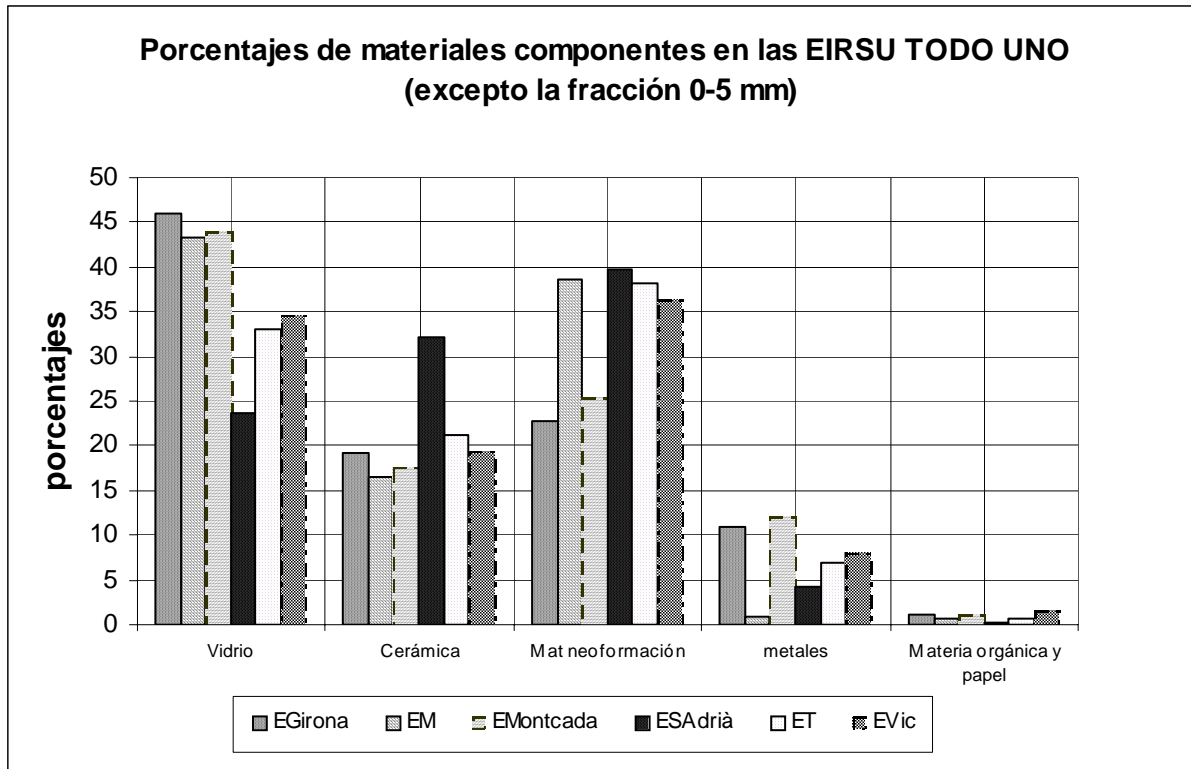
Foto 3.1: EIRSU utilizadas en la identificación visual.



Tabla 3.1: Clasificación de los tipos de materiales constituyentes en las EIRSU todo uno (excepto la fracción 0-5 mm), en función de la planta de incineración de origen. Fuente: Informe V (2001).

Materiales componentes en las EIRSU con respecto al 100% en peso de la muestra						
Incineradoras de origen	EIRSU de Girona	EIRSU de Mataró	EIRSU de Montcada	EIRSU de San Adrià	EIRSU de Tarragona	EIRSU de Vic
Nomenclatura de las EIRSU con respecto a la planta	EGirona	EM	EMontcada	ESAdrià	ET	EVic
Vidrio	46,1%	43,2%	43,9%	23,6%	33,0%	34,5%
Cerámica	19,2%	16,5%	17,5%	32,2%	21,2%	19,4%
Mat. de neoformación	22,8%	38,7%	25,4%	39,8%	38,3%	36,3%
Metales	10,9%	0,8%	12,1%	4,2%	6,9%	8,1%
Mat. orgánica y papel	1,0%	0,8%	1,0%	0,2%	0,6%	1,7%

Gráfico 3.1: Porcentajes de materiales que componen las EIRSU todo uno, dependiendo de la planta de incineración. Fuente: Informe V (2001).



Como se puede observar en el gráfico 3.1 el vidrio es el material mayoritario (excepto en San Adrià), seguido por los materiales de neoformación, luego están los restos cerámicos, los metales y la materia orgánica (incluido el papel).

De la identificación visual se observa la presencia de materiales de neoformación, que están formados por diferentes componentes de las EIRSU y que en el proceso de cremación se han logrado unir por fusión a trozos de vidrio, de hierro o de cerámica, dando como resultado un material poroso e irregular. Dependiendo del proceso de incineración, la composición de estos materiales puede variar significativamente, tanto cuantitativa como cualitativamente.

En cuanto a los metales, la identificación visual muestra que la mayor parte es hierro, luego hay algo de cobre y muy poco de aluminio; hay otros metales que se fusionaron entre ellos, como el plomo, zinc, etc. La presencia de metales depende de la existencia o no de plantas de tratamiento de RSU, ya que en algunas plantas como Montcada las EIRSU una vez salidas del horno se transporta a la planta de San Adrià donde se someten a un electroimán separando la parte férrica. En el caso de Mataró, la presencia de metales es baja (0,8%), esto se debe a que las muestras de EIRSU son llevadas a la planta de tratamiento de Pedreres Rusc, donde se realiza una separación exhaustiva de materiales metálicos, no sólo con electroimán, sino también con otros

métodos como corrientes de Coulomb. Con respecto a la cantidad de materia orgánica en las EIRSU es baja en todas las incineradoras, dependiendo del tipo de planta y temperatura de incineración, estos valores cambian, aunque no de forma significativa.

2) Granulometría (informe V, 2001).

Los resultados de la tabla 3.2 a partir de las granulometrías de muestras de EIRSU todo uno del Informe V (2001), mostraron la presencia de finos menores de 63 μm , los cuales son bastante bajos en todos los casos, lo que evitaría los consecuentes problemas de absorción excesiva de agua y variaciones de volumen (entre otros inconvenientes).

El informe señaló que las granulometrías evidencian la presencia de partículas con medidas variables y convenientemente repartidas de granos gruesos y finos, por lo tanto se definió a estas muestras como una “zahorra” bien graduada y como un material aceptable para su utilización en la construcción, garantizando una buena compactación.

Tabla 3.2: Porcentaje de filler en las muestra de EIRSU todo uno (dependiendo de la planta de incineración que da origen a las EIRSU. Fuente: Informe V (2001).

EIRSU (Plantas de incineración)	EGirona	EM	EMontcada	ESAdrià	ET	EVic
Finos que pasan el tamiz 63 μm	5 – 6%	4%	1 – 3,5%	2%	6%	5 – 9%

3) Elementos químicos.

La comparación entre los elementos mayoritarios contenidos en la litosfera, suelos, EIRSU del mundo y EIRSU todo uno de Cataluña, indican que mientras algunos elementos se encuentra en forma abundante, como el Fe que después del Si, se presentan a nivel mundial en el rango de 1,3 a 25,8 %, en Cataluña los valores son sumamente bajos: entre 2 y 3,5 %, lo que prueba la existencia de centrales de recuperación magnética en algunas de las plantas de incineración de Cataluña. En la tabla 3.3 se presenta un resumen de los resultados para Al (como mayoritario) y Ti (como minoritario), puesto que son los elementos cuyos datos encontrados son comunes en las cuatro tipologías.

Tabla 3.3: Comparación entre el contenido (en mg/kg) de Al y Ti en la litosfera y en los suelos, con los contenidos en las escorias de todo el mundo y EIRSU todo uno de Cataluña. Fuente: Informe V (2001).

Tipologías estudiadas	Elemento mayoritario: Al	Elemento minoritario: Ti
Litosfera	81.000	6.000
Suelos	10.000 – 30.000	1.000 – 10.000
EIRSU del mundo	21.900 – 72.800	2.600 – 9.500
EIRSU todo uno de Cataluña	Tarragona: 52.422 Vic: 24.506	Vielha: 1.852 Montcada: 3.842

Los resultados muestran también los siguientes elementos mayoritarios (> 1000 mg/kg); Al, Fe, Si, Ca, Na, K y Mg, aunque algunos de ellos resultan ser minoritarios en Vielha (K y Mg), Vic (Mg) y Girona (K).

Los elementos mayoritarios como el Al, Ca, y Na de las EIRSU de Cataluña tienen valores comparables al de escorias extranjeras valorizadas; esto resulta coherente con la afirmación de la bibliografía, donde se menciona que las EIRSU generalmente son muy similares en cuanto al contenido de elementos. Igualmente ocurre con los elementos minoritarios, como es el caso del Mn, Ti, Zn, Cu, Pb y Cr, cuyos valores son semejantes a las EIRSU extranjeras.

En cuanto a los elementos minoritarios relacionados con los ciclos bioquímicos, se encuentra el azufre (S), que en todas las EIRSU de Cataluña son altos (excepto en Vielha), sobrepasando los 5.000 mg/kg, cuando los valores normales son de 1.000 a 5.000 mg/kg, pudiendo ocasionar problemas de durabilidad en la aplicación de escorias tanto sueltas como con aglomerantes. Este alto contenido se debe a la deficiente incineración en comparación con las plantas extranjeras.

Los elementos traza se presentan en diferentes proporciones, así por ejemplo el antimonio (Sb) que normalmente es el elemento traza más abundante (alrededor de 430 mg/kg), en las EIRSU de Cataluña no supera los 89 mg/kg, y su promedio está cercano a 50 mg/kg. El vanadio (V) se mueve dentro de las cantidades habituales (excepto en Vic donde supera con el doble). Molibdeno (Mo), arsénico (As), níquel (Ni), cobalto (Co), cadmio (Cd), plata (Ag) y boro (B) son siempre bajos, el estaño (Sn) está dentro de los límites, mientras que el estroncio (Sr) supera con diferencia los 450 mg/kg, valor muy alto con respecto al límite. El Mercurio (Hg) dio valores muy bajos y se muestran en la tabla 3.4. No obstante, sólo se estudió el contenido de Hg en las EIRSU todo uno de Tarragona a modo representativo, puesto que el realizar este tipo de control requiere de un equipo de análisis que demanda mayor inversión económica.

Como se puede ver en los datos mencionados, es difícil definir una línea de referencia con respecto a los resultados, puesto que la heterogeneidad de las EIRSU produce tales dispersiones.

Tabla 3.4: Resultados de la cantidad de mercurio (Hg) en las EIRSU todo uno de Tarragona. Fuente: Informe V (2001).

Cantidad de Mercurio (Hg) en las EIRSU de Tarragona. (ET)	
Fracción EIRSU	Cantidad en mg/kg
Menor a 0,08 mm	0,09
0,08 – 0,32 mm	0,05
0,32 – 0,63 mm	0,04
0,63 – 2,5 mm	0,03
2,5 – 5 mm	0,01

4) Determinación del contenido de materia orgánica.

El porcentaje en peso que se perdió cuando se sometió las muestras de EIRSU todo uno, a una temperatura de 550 °C durante tres horas (las EIRSU todo uno, se secaron previamente a 105 °C), se expresa como la pérdida de materia orgánica por efecto del fuego, cuya ecuación se presenta como sigue (3.1):

$$P.f. = \frac{W_{105^{\circ}C} - W_{550^{\circ}C}}{W_{105^{\circ}C}} * 100\% \tag{3.1}$$

Donde:

p.f. = pérdida al fuego.

*W*_{105 °C}: Peso de la muestra a 105 °C.

*W*_{550 °C}: Peso de la muestra a 550 °C.

En la tabla 3.5 se muestran los resultados del contenido de materia orgánica, obtenidos mediante el procedimiento mencionado, que según la Orden del 15 de Febrero de 1996, sobre valorización de escorias, establece un máximo de 5%.

Tabla 3.5: Resultados de los porcentajes de pérdida a fuego de las EIRSU todo uno de las incineradoras de Cataluña. Fuente: Informe V (2001).

EIRSU	EGirona	EM	EMontcada	ESAdrià	ET	EViella	EVic
Pérdida al fuego por calcinación en %	4,51	4,44	2,61	2,05	4,25 – 4,75	9,76	8,83

Como se puede observar en la tabla 3.5, los resultados del contenido de materia orgánica de las EIRSU todo uno, con excepción de Vielha y Vic, están dentro del límite recomendado por la Orden del 15 de Febrero de 1996 sobre valorización de escorias del Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Catalunya, en el que estipula como valor máximo el 5%. El Informe V (2001) también indica que en Vielha se apreció materia orgánica a simple vista, lo cual confirma el resultado del 9.76% de la tabla, en cambio en Vic el resultado reflejó la cantidad de carbonilla producto de una incineración deficiente. También se señaló la dificultad de encontrar valores reales con un solo ensayo, puesto que por ejemplo en Tarragona el resultado inicial fue del 6,51%, valor considerado como erróneo puesto que se notó ausencia de materia orgánica, por lo se realizaron nuevos muestreos y se ensayó nuevamente. Los nuevos valores obtenidos fueron 4,25% y 4,75% lo que permitió considerar a los resultados del primer ensayo como valores no representativos.

5) Compuestos mineralógicos.

El informe V (2001) determinaron los compuestos mineralógicos de las EIRSU todo uno mediante la técnica de difracción de rayos X (DRX), cuyos resultados fueron muy similares a los de las EIRSU extranjeras. En la fase vítrea, el cuarzo y la calcita son los componentes mayoritarios. La gehlenita es otro de los minerales característicos de todas las muestras estudiadas, por otro lado se encuentra la larnita (C_2S) que es la fase característica de cemento.

Los feldespatos, al igual que los materiales férricos como la hematites y la magnetita, se encontraron en cantidades muy bajas en las fracciones más gruesas. En algunos casos se presentaron también en estas fracciones diópsidos y wallastonita y algunos minerales que aparecen en contadas muestras como son: dolomita, calcio, aluminio y talco.

Cabe destacar que el informe V (2001) señala la aparición de la cristobalita, que suele presentarse cuando el cuarzo se cristaliza a 1600 °C. En este caso su presencia se debió a la recristalización del vidrio a una temperatura más baja de la que le corresponde.

Las muestras revelaron una cantidad de sulfatos alta, excepto las de Tarragona. Fue muy frecuente en todas las muestras la presencia de anhidrita, bassanita, polihalita. En la mayoría de casos el yeso, que es la fase sulfatada característica de las escorias maduras.

En las fracciones finas el informe señala la presencia significativa de tobermorita que es un silicato cálcico hidratado, señalando el carácter puzolánico de estas muestras de EIRSU. Por otro

lado, observa un aumento de los feldspatos especialmente en la franja de 0,63 a 2,5 mm. Un componente importante de los finos fue la calcita, que aumentó gradualmente hasta 0,32 mm, a partir de este tamaño disminuyó considerablemente. El otro compuesto importante fue el cuarzo, que estuvo en menor grado en la fracción más fina y llegó a ser importante a partir de 0,32 mm. Las fracciones finas fueron las más castigadas por la presencia de metales pesados.

6) Lixiviación, pH y conductividad.

Los resultados de lixiviación obtenidos mediante el ensayo DIN 38 414-S4 (este método mide la fracción soluble) del 15 de febrero de 1996 del Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña, califica a las EIRSU todo uno como valorizable. Sin embargo, el mismo Informe V (2001) recomienda comparar con otros ensayos de lixiviación.

Para encontrar los resultados del pH se utilizó el pH-metro que también registró la conductividad. Los resultados se indican en la tabla 3.6.

Tabla 3.6: Resultados del pH y conductividad de las EIRSU todo uno de las incineradoras de Cataluña. Fuente: Informe V (2001)

EIRSU	pH	Conductividad K ($\mu\text{S/cm}$)
ESAdrià	10,73	2.800
EMontcada	8,07	2.100
EVic	10,12	4.000
EGirona	7,78	3.050
EViella	7,55	2.800
EM	8,76	1.900
ET	11,08	2.670

Las EIRSU todo uno tuvieron un pH entre 7 y 11 lo que les da el carácter básico, esto se atribuyó a la presencia de Ca en el medio. Los análisis químicos y mineralógicos corroboraron esta afirmación, mostrando una gran cantidad de calcio, no sólo en forma de calcita o anhidrita, sino también como porlandita.

En cuanto a la conductividad los resultados variaron entre 1.900 y 4.000 $\mu\text{S/cm}$. Estos valores fueron más bajos que los de las EIRSU no envejecidas lo que se atribuyó al almacenamiento de las EIRSU en silos y su consecuente carbonatación, e incluso al aporte de agua de lluvia que se filtra y moviliza a las fases solubles como son algunas sales. La conductividad va ligada a la cantidad de finos que contengan las EIRSU. Así, en Vic y Girona la cantidad de finos fue mayor, en consecuencia aumentó la conductividad. Sin embargo, en San Adrià la cantidad de

finos fue baja y la conductividad más o menos elevada. Esto justifica por que el apagado de estas EIRSU se realizó con agua de mar lo que supone el aporte adicional de sales.

7) Conclusiones y recomendaciones generales de selección del las EIRSU en base al Informe V (2001).

El Informe V (2001) hace las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- a) Se recomienda un tiempo de envejecimiento de las EIRSU de tres meses antes de su utilización, puesto que esta etapa de maduración o envejecimiento de la EIRSU, provoca una mejora en sus características (especialmente carbonatación e hidratación que resultan positivas para el uso como materiales en la construcción).
- b) Todas las muestras de EIRSU todo uno de las incineradoras de Cataluña, que fueron sometidas a ensayos de lixiviación DIN 38 414-S4 del 15 de febrero de 1996 del Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña, dieron resultados favorables, calificando de esta forma las EIRSU como valorizables. No obstante, el informe V recomienda comparar con otros ensayos de lixiviación.
- c) Algunas de las características que se han de tener en cuenta a la hora de aplicar una muestra han de ser los análisis del contenido de elementos nocivos. Así, Las EIRSU todo uno (excepto las EVic) tienen considerables cantidades de azufre, que podrían ser problemáticas a la hora de la aplicación, en especial con el cemento Pórtland. Otro dato importante que arroja el informe es con respecto a las fracciones finas, cuya presencia de metales pesados es muy destacada, lo que ocasionaría problemas en la utilización en hormigón y el consecuente impacto ambiental.
- d) Los resultados del ensayo de pérdida al fuego de las EIRSU todo uno, con excepción de Vielha y Vic, están dentro del límite recomendado por la Orden del 15 de Febrero de 1996 sobre valorización de escorias del Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña, que estipula como valor máximo el 5%, por lo que las EIRSU pueden ser aptas para su valorización.
- e) Se recomienda en el informe V (2001), utilizar EIRSU cuyo origen sean las plantas de incineración de RSU provistas con plantas de tratamiento, puesto que este particular otorgaría a las EIRSU buenas características para su utilización en hormigones y la mejora de la calidad de las EIRSU.

8) Condiciones favorables que han de prestar las plantas de incineración de RSU, para utilizar sus EIRSU en la etapa de laboratorio y en la aplicación de un tramo experimental de carretera.

La presente tesis plantea una serie de condiciones que han de prestar las plantas de incineración de RSU, para utilizar sus EIRSU tanto para la etapa de laboratorio como en la puesta en obra en un tramo experimental de carretera. Estas condiciones se exponen a continuación:

1. Que haya interés y colaboración (logística, facilidad de transporte de las EIRSU, etc.) por parte de los entes encargados de las plantas de incineración de RSU, en la investigación de la posible utilización de sus EIRSU para ser valorizadas.
2. Que las escorias a utilizar pertenezcan a incineradoras que cuenten con plantas de tratamiento.
3. Por último, que las incineradoras tengan en acopio EIRSU envejecidas, por lo menos tres meses antes de su utilización.

Por todas las conclusiones, recomendaciones y condiciones requeridas para la planta de RSU, anteriormente citadas, se han seleccionado para la presente tesis las EIRSU provenientes de las plantas de incineración de RSU de Mataró y Tarragona, que desde ahora en adelante se denominarán como EM y ET respectivamente, de las fracciones 5-20 mm, envejecidas dos o tres meses. Más adelante se seleccionará una sola EIRSU para la aplicación en obra.

3.3.- CARACTERIZACIÓN DE LAS EIRSU DE MATARÓ (EM) Y EIRSU DE TARRAGONA (ET), PARA SU USO COMO ÁRIDOS EN HORMIGONES.

La caracterización de las EIRSU es de suma importancia para entender el comportamiento frente a las sollicitaciones mecánicas y a los agentes agresivos.

Anteriormente los áridos eran considerados como material de relleno inerte, pero el creciente conocimiento de las propiedades del hormigón desvela que los áridos influyen notablemente en ellas (Mehta y Monteiro, 1994).

En esta tesis las EIRSU serán utilizadas como áridos para la fabricación de hormigones compactados y grava-cemento, por lo que conocer sus características, de la misma forma que con

los áridos naturales, contribuye a determinar el grado de trabajabilidad en estado fresco, y la resistencia y durabilidad del hormigón en estado endurecido. Antes de iniciar la caracterización de las EIRSU, se ha de decidir el tamaño de las muestras de EIRSU necesarias para ser almacenadas en el laboratorio hasta su caracterización.

3.3.1 Cualidades y tamaños de las muestras de EIRSU.

Una vez escogidas las dos plantas de incineración de RSU (Tarragona y Mataró), las fracciones a utilizar (5-20 mm) y realizado el estudio de cada planta con sus procesos de incineración, el sistema de enfriamiento de las EIRSU y el grado de envejecimiento de cada una de ellas (ver capítulo 2), se prosiguió a decidir el tamaño de la muestra necesaria de EIRSU fracción 5-20 mm, para realizar todos los ensayos de laboratorio de esta tesis.

Tamaños de las muestras de EIRSU.

Se hizo un cálculo aproximado de la cantidad total de EIRSU de cada incineradora seleccionada, de tal forma que la misma muestra sea suficiente para realizar todos los ensayos previstos, desde la etapa de caracterización, fabricación de HC y G-C, durabilidad de los sistemas mencionados, hasta el estudio del comportamiento ambiental en la aplicación. Esta cantidad, se fijó en tres toneladas de cada muestra (Tarragona y Mataró) y de cada una de las siguientes fracciones: 5-12 mm y 12-20 mm, que desde este momento adoptan la siguiente nomenclatura: EIRSU de Mataró de la fracción 5-12 y 12-20 como EM5-12 y EM12-20 y además, se llamará a las EIRSU de Tarragona de la fracción 5-12 y 12-20 como ET5-12 y ET12-20 respectivamente.

Como se observa en la foto 3.2 se utilizó una criba móvil para separar la franja 5-20 mm en 5-12 y 12-20 mm, esto se realizó con el objetivo de estudiar por separado el comportamiento de cada fracción de EIRSU tanto en la etapa de caracterización como de dosificación del HC y G-C.

Foto 3.2: Planta móvil de cribado, donde se fraccionó las EIRSU en 5-12 y 12-20 mm.



Para calcular las cantidades de EIRSU necesarias a cribar y para conseguir tres toneladas de cada fracción y de cada muestra, se realizó un corte en la granulometría determinada en el Informe V (2001) y con la densidad aparente del mismo informe, se calculó la capacidad de las bolsas y el número necesaria de éstas, para el transporte y almacenamiento de las EIRSU. Este procedimiento se hizo tanto con la granulometría de Mataró, como con la de Tarragona.

Así, se inició la recogida de EIRSU el mes de marzo de 2001, llenando un camión grúa, con una capacidad de 20 m³, luego se transportó el material a la criba (foto 3.2), situada en las afueras de Barcelona, se procedió a cribar el material por los tamices mecánicos 5-12 y 12-20 mm y se recogió el material en las bolsas, para finalmente llevarlo a la UPC. La capacidad aproximada de cada bolsa es de 1,5 T de gruesos, lo que significó llenar dos bolsas por cada fracción (dos bolsas de 5-12 mm y dos bolsas de 12-20 mm de EIRSU). El mismo proceso se realizó en ambas plantas de incineración, Mataró y Tarragona.

Una vez con las EIRSU en la UPC, se procedió a realizar el muestreo, y se obtuvo una muestra representativa y luego se realizó la caracterización de las EIRSU, para su uso como áridos para hormigón. Así, las muestras fueron sometidas a diferentes ensayos de laboratorio ya que generalmente de la muestra de EIRSU se requiere saber sus características físicas, químicas, durabilidad, mineralogía y el posible impacto ambiental.

3.3.2 Objetivo y planteamiento experimental de la caracterización.

Un estudio de Bernard Queen (1999), probó el uso de EIRSU en hormigones y morteros, con resultados muy favorables. Sin embargo, el tipo de EIRSU es diferente a la que se utiliza en el presente estudio, de hecho cada escoria es distinta, lo que lleva a hacer un estudio de caracterización por separado; así será posible conocer si este árido artificial puede o no ser tratado como árido para hormigones y grava-cemento.

Las EIRSU fueron caracterizadas como áridos para HC y G-C. No obstante, son áridos artificiales con escasa experiencia de uso en España. Por lo tanto han sido sometidas a otros ensayos para áridos que puedan determinar sus características, y establecer especificaciones adicionales, si ese fuera el caso.

A continuación se indican los diferentes ensayos realizados en las EM y ET:

Ensayo	Normativa utilizada
Muestreo	EN 932-5 y UNE-EN 932-2
Densidad, absorción y porosidad	EN 1097-6 (NLT-153/92)

Ensayo	Normativa utilizada
Granulometría	UNE-EN 933-1
Índice de lajas	UNE-EN 933-3
Coefficiente de desgaste Los Ángeles	UNE-EN 1097-72
Coefficiente de forma	UNE 7-238
Composición química	EN 1744-1998

Adicionalmente se determinó el contenido de materia orgánica por pérdida al fuego, seguidamente se realizó el análisis mineralógico por DRX, a continuación se determinó el porcentaje de materiales constituyentes en las EIRSU y finalmente se realizó uno de los ensayos que evalúan la durabilidad del material -ensayo del sulfato de magnesio- que mide el potencial de degradación que sufre el material a los ciclos de hielo-deshielo, según la normativa ASTM C88-83 o UNE-EN 1367-2.

3.3.3 Ensayos físicos

Las características físicas de los áridos son importantes para la tecnología del hormigón, y dependen tanto de la composición mineralógica de la roca madre como del tipo de producción del árido. En este sentido, la composición de las EIRSU depende de su origen, que en este caso son los RSU y del proceso de incineración y tratamiento al que han sido sometidas (capítulo 2).

Con las EIRSU en la UPC, se escogió el sistema de muestreo más apropiado para obtener una muestra representativa del lote de material. Para cada caso, se redujo la muestra de 3 T (por fracción y por muestra) a 90 kg (por fracción y por muestra), cantidad necesaria para realizar los ensayos de caracterización.

3.3.3.1 Muestreo.

Para obtener una cantidad de material lo más representativa posible de las EIRSU se llevó a cabo el muestreo. El muestreo se puede hacer por vía mecánica o por vía manual. En el caso de las EIRSU, se utilizó la vía manual con la ayuda de un cuarteador.

Siguiendo el procedimiento descrito en las normativas EN 932-5 y UNE-EN 932-2 se extrajo 360 kg de cada una de las dos bolsas de EIRSU pertenecientes a la fracción 5-12 mm. Esto se hizo por medio de paladas en diferentes zonas de cada pila, luego se mezclaron los 720 kg de esta fracción y se dividió la muestra con el cuarteador, hasta conseguir los 90 kg necesarios de

EIRSU 5-12 mm para ser caracterizados. Lo mismo se realizó con la fracción 12-20 mm de EIRSU. Este procedimiento se realizó por separado tanto para las EM como de ET.

Efectividad del muestreo de las EIRSU.

El grado de efectividad del muestreo se verá posteriormente reflejado en la coherencia de la mayoría de resultados que arrojan los ensayos de caracterización, desarrollados a lo largo de esta tesis. Cuando un mismo ensayo se hace por duplicado, y los resultados se asemejan, esto indica que las muestras han sido representativas del material. Sin embargo, no hay que olvidar que el material es muy heterogéneo, dando una cierta probabilidad de que el muestreo no cumpla su cometido, teniendo que repetir los ensayos correspondientes con diferentes muestras de la misma pila. Los resultados poco referenciales se han omitido, ya que pretendemos encontrar la caracterización de las muestras de EIRSU seleccionadas y no el grado de variabilidad que puede dar un muestreo de EIRSU. No obstante, la razón de la variabilidad de los resultados de caracterización se atribuye a la heterogeneidad de las EIRSU.

3.3.3.2 Humedad, densidades, absorción y porosidad.

Las densidades y absorciones de los áridos son un parámetro importante para calcular las relaciones masa-volumen y la proporción de poros que contienen los áridos, informaciones necesarias a la hora de hacer la dosificación de hormigones. Además, el valor de la absorción es un indicativo de la resistencia de la muestra a ciertas susceptibilidades a los cambios de temperatura en los ciclos de hielo-deshielo. No obstante, en el caso de las EIRSU su heterogeneidad puede hacer que varíen de las características mencionadas, dependiendo entonces de la muestra estudiada.

Normativas de referencia

Para calcular las densidades de las partículas, tanto densidad de partículas secas en estufa (correspondiente a la densidad relativa aparente de la norma NLT 153/92), densidad de partículas aparente (correspondiente a la densidad relativa real de la norma NLT 153/92) y la densidad de partículas con saturación y secadas en la superficie del árido (correspondiente a la densidad relativa aparente en estado de saturación superficie seca de la norma NLT 153/92), así como la absorción de agua y la porosidad conectada al exterior, se ha utilizado el procedimiento de la normativa EN 1097-6 sobre las fracciones gruesas, por ser mucho más clara y específica que la NLT 153/92. El procedimiento se hizo por duplicado, tanto para las EM como para las ET de cada fracción.

Resultados de las densidades, porosidades y absorciones de las partículas de EIRSU.

Tabla 3.7: Resultados de densidades, porosidades y absorciones de las partículas de EM5-12, EM12-20, ET5-12 y ET12-20.

EIRSU	EM5-12	EM12-20	ET5-12	ET12-20
Densidad de partículas secadas en estufa (ρ_s) (g/cm ³)	2,19	2,26	2,18	2,30
Densidad de partículas con saturación y secado en la superficie del árido (ρ_{ssd}) (g/cm ³)	2,30	2,32	2,31	2,38
Densidad de partículas aparente (ρ_{ap}) (g/cm³)	2,46	2,42	2,50	2,51
Porosidad (%)	11,09	6,41	10,58	7,14
Absorción (%)	5,77	2,84	5,07	3,58

Para llegar a los resultados de la tabla 3.7, se ha tenido que evaluar los valores medios resultantes, ya que las muestras son materiales muy heterogéneos y están sujetos a dispersiones, cabe destacar que estos valores pueden tener variaciones considerables, según el origen de las muestras ensayadas, así como los procesos de obtención de las EIRSU.

Según el Código CEB-FIP (1995) los áridos pueden ser calificados según su densidad real (que en el caso de la nomenclatura adoptada -EN 1097-6- se denomina densidad aparente) en:

De peso normal: si la densidad real está entre 2 g/cm³ y 3 g/cm³

Pesados: si la densidad real es superior a 3 g/cm³

Y ligeros: si la densidad real es menor a 2 g/cm³

Según los resultados obtenidos en la tabla 3.7, se observa que las EIRSU son de peso normal, en todas las fracciones.

Según Cánovas (1996), los áridos naturales usados en hormigón suelen estar entre 2,4 y 3 g/cm³. Como se indica en la tabla 3.7 las EIRSU de las fracciones gruesas están dentro o muy cerca de estos valores.

Comparando las ρ_{ap} de las EIRSU de ambas fracciones, con los áridos naturales que se utilizaron en la dosificación del HC del subtramo de referencia en el tramo experimental de carretera, que se detalla en el capítulo 5, donde se utilizaron calizas de machaqueo de la fracción 5-10 mm (G1-5/10) y 10-20 mm (G2-10/20) cuyas densidades son 2.69 y 2.72 g/cm³ respectivamente y arena de río con 2.69 g/cm³, se observa que las EIRSU mantiene unas densidades algo más bajas. Esto podría ser un signo de que las partículas de EIRSU tienden a densidades ligeras y por tanto en su interior existen huecos cerrados los cuales si bien aumentan el volumen, no elevan la masa y por lo tanto disminuyen la densidad.

En cuanto a las densidades de partículas secas en estufa en las fracciones 5-12 mm, son sensiblemente menores que en las fracciones 12-20 mm, lo que se puede atribuir al mayor porcentaje de poros interiores y exteriores de la fracción 5-12 mm, por tanto mayor superficie específica (poros exteriores). En todo caso, las fracciones consideradas tienen la misma tendencia en cuanto al aumento de la ρ_s hasta la ρ_{ap} . Este comportamiento indica la variabilidad del contenido de poros conectados al exterior.

Respecto a los resultados de la densidad de partículas con saturación y secado en la superficie del árido (ρ_{ssd}), de las EIRSU de la fracción mayor a 5 mm determinadas según la tesis doctoral de M. Izquierdo (2005), los resultados son semejantes a las ρ_{ssd} de las EIRSU de ambas fracciones, lo mismo sucede con las densidades de las escorias de áridos reciclados (ITEC, 1995). Sin embargo, existe gran divergencia con las densidades de los áridos siderúrgicos, cuyos valores son superiores a 3 g/cm^3 (Amarall, 1999).

En cuanto a la absorción de agua, es bien sabido que es la capacidad de retención de agua que penetra en los poros accesibles, cuyos valores se calculan a partir de la relación entre la masa de agua de los poros accesibles y la masa seca del árido. En este sentido, el PG-3/2002, no limita los valores de absorción, por lo que se ha decidido comparar con la EHE (1998) que estipula como límite de absorción valores menores al 5%. Las fracciones 5-12 mm de EIRSU tienen absorciones un tanto más altas al 5% y las fracciones 12-20 mm cumplen esta recomendación.

Comparando las absorciones de las EIRSU de ambas fracciones, con los áridos naturales que se utilizarán en la dosificación del HC y G-C, se observa que las EIRSU mantienen absorciones, lo que concuerda con el resultado de las densidades propensas a disminuir (y calificar a las EIRSU como áridos ligeros), esto se atribuye al incremento de poros abiertos al exterior, este hecho que podría ser motivo de posibles expansiones en la aplicación con ligantes hidráulicos, y plantear algunas otras dificultades, ya que al absorber una excesiva cantidad de agua, podría disminuir la trabajabilidad, afectar la durabilidad del sistema ante fuerzas mecánicas y el aumento de la tendencia a la meteorización. El ensayo indicativo de la resistencia a los ciclos de hielo-deshielo se realiza cuando las absorciones obtenidas son mayores a los estipulados en dicha normativa. En el caso de las EIRSU se realizará este ensayo mediante el método del sulfato de magnesio, como se muestra en el apartado 3.3.12.

En cuanto a las absorciones de las fracciones 5-12 mm, son mayores que en las fracciones 12-20 mm, lo que se puede atribuir al mayor porcentaje de poros de las fracciones finas, en todo caso ambas nuestras (Tarragona y Mataró) tienden a aumentar su absorción en tanto disminuye el

tamaño de la partícula, coincidiendo también esta predisposición con los resultados de las grandes absorciones de las fracciones más finas, mayores al 10% (Informe V, 2001).

3.3.4 Granulometría.

Mediante el cálculo del porcentaje de EIRSU retenida en cada uno de los tamices de la serie normalizada UNE, con respecto al peso total de la muestra, se determinaron las curvas granulométricas, estableciéndose así la distribución de los tamaños de granos que componen la muestra de EIRSU.

Objetivo y normativas de referencia de la granulometría.

El objetivo de realizar la granulometría es encontrar las curvas granulométricas de cada una de las fracciones y de cada muestra, para saber qué cantidad de finos y gruesos hay en la muestra y como se encuentran distribuidos, esto servirá para la fabricación de hormigón, cuando se hagan las dosificaciones. La normativa que se utilizó fue la UNE-EN 933-1. Antes de realizar la granulometría se redujo el tamaño de las muestras (fracciones 5-12 mm y 12-20 mm tanto de Mataró como de Tarragona) de acuerdo a la tabla 3.8

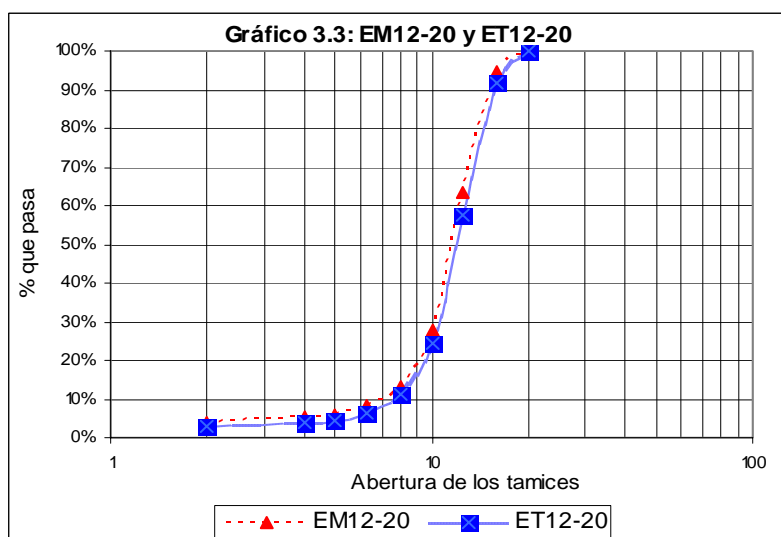
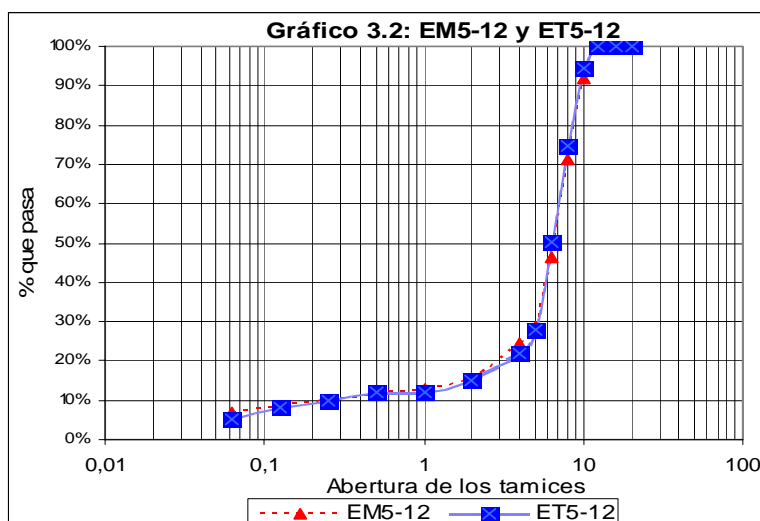
Tabla 3.8: Masa de las muestras de ensayo para áridos de densidad normal de partícula (normativa EN 933-1).

Tamaño máximo del árido D (mm)	Masa mínima de la muestra de ensayo (kg)
20	4,5
12	1,6
5	1
<4	0,5

Una vez obtenidas por cuarteo las muestras, hasta aproximarse a los valores correspondientes de la tabla 3.8 (para las fracciones 5-12 mm la masa de las muestras fue de 1,6 kg y para 12-20 mm de 4,5 kg), se pesaron y lavaron cada una de las muestras por el tamiz 0,063 mm, para eliminar el filler. Se dejaron secar 24 horas en la estufa a 110 °C y enfriar hasta masa constante, se pesó la muestra nuevamente y se tamizó por las cribas que indica la normativa, con los retenidos en cada tamiz se procedió a hacer los cálculos y las curvas granulométricas. A la hora de realizar el tamizado de las EIRSU, se decidió continuar la criba por los tamices menores a 0,5 mm, ya que se observó que las muestras contenían más finos que los correspondientes a las fracciones indicadas.

Tabla 3.9: Resultados de la granulometría.

Abertura Tamiz UNE (mm)	% que pasa de EM		% que pasa en ET	
	Fracción 5-12	Fracción 12-20	Fracción 5-12	Fracción 12-20
20	100%	100%	100%	100%
16	100%	94%	100%	92%
12,5	100%	64%	100%	58%
10	92%	28%	94%	24%
8	71%	13%	75%	11%
6,3	46%	8%	50%	6%
5	29%	6%	28%	5%
4	24%	5%	22%	4%
2	15%	4%	15%	3%
1	13%	3%	12%	2%
0,5	11%	3%	12%	2%
0,25	10%	2%	10%	2%
0,125	8%	2%	8%	1%
0,063	7%	1%	5%	1%



La granulometría de las EIRSU de las muestras de Mataró y Tarragona, en especial la medida máxima de las partículas, está supeditada en gran medida por el acondicionamiento de la planta de tratamiento que poseen,. No obstante, este valor puede variar, como es en el caso de las muestras estudiadas. La tabla 3.9, que genera las gráficas 3.2 y 3.3, muestra que las fracciones reales no corresponden a las nominaciones de 5-12, y 12-20 mm, sino a fracciones más finas tales como 4-10 y 10-16 mm respectivamente. Esto se debió en gran medida a que la manipulación y el lavado de las EIRSU desgastaron las partículas, degradándolas y fragmentándolas, en especial a aquellas cuyo origen fueron los vidrios y los materiales de construcción y demolición. Por otro lado, la disminución de los diámetros podría ser un defecto del sistema de cribado al que fueron sometidas las EIRSU en la misma planta. En todo caso este particular es común en las EIRSU de Cataluña (Izquierdo, M., 2005) y por tanto se ha considerado oportuno conservar las nomenclaturas iniciales de las fracciones a lo largo de la presente tesis.

Las curvas granulométricas dentro de la franja 4-10 mm, indican una distribución de medidas de granos de todos los tamaños, a pesar de que se aprecian curvas algo inclinadas, lo que confirma la tendencia de mayores finos en las franjas 4-10 mm. En la parte superior de las curvas se observa un escalón, lo que significa carencia de la franja 10-12,5.

En las fracciones 10-16 mm se observa buena granulometría y desde 16 a 20 mm la curva se escalona evidenciando la carencia de esta fracción, caso contrario sucede con la fracción 10-12,5 cuya curva es muy inclinada, lo que indica un contenido considerable de material en esta franja.

Otra característica derivada de la granulometría es el porcentaje de filler, que en las EM5-12 y ET5-12 están alrededor del 5 al 7% y en 12-20 mm son de 1%, valores aceptables según la Pr-EN 13424. No obstante, estos valores del porcentaje de filler son mayores que en los de áridos naturales (no sobrepasan el 5%), lo cual podría comprometer la aplicación de las EIRSU, dando problemas de durabilidad, ya que la muestra se vuelve susceptible a los cambios volumétricos por la presencia del agua.

Tanto las curvas EM como las ET de ambas fracciones tienden a superponerse, observándose cierto carácter homogéneo en la granulometría de ambas EIRSU.

3.3.5 Índice de lajas

La forma de las partículas de árido grueso afecta fundamentalmente al esqueleto mineral del hormigón, pues es un indicativo de la geometría de las partículas y de la trabajabilidad del material. La forma de las partículas puede ocasionar modificaciones en la granulometría por rotura o dificultad para la compactación. Tomando en consideración las aplicaciones destinadas del árido, se ha evaluado el índice de lajas de las muestras de EIRSU y comparado con los límites estipulados por el PG3/2002.

Objetivo y normativas de referencia

El Índice de lajas expresa el porcentaje de partículas que tienen una dimensión menor que la mitad que las otras dos dimensiones, es decir que son formas planas que incluyen también las agujas, donde la morfología de las muestras pueden ser definitorias a la hora de evaluar el material.

El Índice de lajas se determina sólo sobre áridos naturales o artificiales con un tamaño de 4 mm a 80 mm. Para el caso de las EIRSU el tamaño máximo es de 20 mm, por lo que se procedió a realizar este ensayo sobre las dos fracciones de cada muestra. La normativa utilizada fue la UNE-EN 933-3

Previamente se redujo la muestra, a continuación se lavó por el tamiz 0,063, se secó 24 horas en la estufa a 110 °C, se pesó hasta masa constante y se tamizó como indica la norma EN 933-1, rechazando las partículas que pasaron el tamiz 4mm.

Se determinó el Índice de lajas para cada fracción y muestra: EM5-12, EM12-20, ET5-12 y ET12-20, que se indica en la tabla 3.10.

Resultados del ensayo

Tabla 3.10: Resultados del ensayo del Índice de lajas.

EIRSU	Índice de lajas
EM5 – 12	32
EM12 – 20	36
ET5 – 12	28
ET12 – 20	31

El PG-3/2002 limita el índice de lajas a valores menores o iguales a 35 (para calzadas con tráfico T3 y T4), en el caso de las EIRSU estudiadas los valores son prácticamente semejantes o menores a 35, por lo que se considera a las muestras de EIRSU aceptables, para los límites establecidos por el pliego. Desde luego, también se podría modificar la composición de las EIRSU bajando los índices de lajas con la aplicación de las 3R (capítulo 2) o disminuir el índice de lajas de las muestras, al mezclarlo con áridos de origen natural cuyos valores sean menores a las determinadas en las EIRSU.

Los resultados del índice de lajas de la tabla 3.10 permiten observar las diferencias morfológicas de las muestras, donde Mataró posee índices de lajas mayores en ambas fracciones que las de Tarragona, lo que se justifica a partir de la procedencia de las EIRSU y su correspondiente heterogeneidad entre las EIRSU (Izquierdo M., 2005).

La variabilidad de los resultados con respecto a las fracciones granulométricas indican una menor cantidad de placas en las fracciones 5-12 mm. Esto puede deberse a que en estas fracciones los materiales constituyentes sean de formas más cúbicas como los materiales de neoformación (capítulo 2) o residuos metálicos fusionados, etc, en tanto que en las fracciones 12-20 mm están la mayoría de residuos de vidrio doméstico y materiales cerámicos, cuyas formas suelen ser aplanadas (foto 3.3).

3.3.6.- Resistencia al desgaste (coeficiente Los Ángeles).

Uno de los ensayos que señalan resistencia al desgaste es mediante la determinación del coeficiente “Los Ángeles”, que es una medida indirecta de la resistencia a compresión y a tracción de un hormigón que contiene estos áridos. Este ensayo da la medida de degradación por impacto provocada por el rozamiento, y la acción conjunta impacto–machaqueo, instando a la fragmentación y choque entre los áridos gruesos.

Objetivo y normativas de referencia.

El objetivo de este ensayo es obtener una medida de la calidad de un árido, calidad relevante en términos de durabilidad al impacto. Las respuestas del material ante este ensayo han de ser consideradas en el empleo de los áridos en hormigones.

La norma que se ha utilizado es la UNE-EN 1097-2, donde se describe el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos utilizando la máquina de “Los Ángeles”. Los resultados obtenidos se comparan con los límites recomendados en el PG-3/2002.

Para determinar el coeficiente Los Ángeles en las EIRSU se siguió el procedimiento de la normativa mencionada, determinándose en primera instancia las masas granulométricas que correspondientes al grupo C de gravillas, y al grupo B de gravas, y que para ambos casos fue de 2,5 kg. Para lograr obtener esta masa de material en las franjas 5-6,3 y 6,3-10 mm para las gravillas y 12,5-20 mm en las gravas, se utilizaron las granulometrías, realizando una interpolación de los porcentajes que pasan entre los tamices límites y los de las franjas mencionadas. Finalmente se tamizó la cantidad encontrada y se obtuvo algo más de los 2,5 kg deseados, se lavó este material y se secó en estufa a 110 °C, y se volvió a pesar a masa constante, llegando a 2,5 kg de EIRSU. Este proceso se realizó tanto con las EM como con las ET.

Una vez con el material listo para el ensayo, se depositó junto con 8 esferas de acero para el caso de la gravilla (B) y 11 esferas para la grava (C), se hizo girar por cada caso por separado en la máquina de Los Ángeles a 500 rotaciones, luego se descargó el material de la máquina, y se separó la muestra a través de un tamiz con abertura 1,6 mm. El coeficiente Los Ángeles (C.L.A.) determina la pérdida porcentual de polvo y árido fino (menor que 1,6 mm) con la siguiente fórmula.

$$C.L.A. = \frac{M_o - M_f}{M_f} * 100 \quad (3.2)$$

Donde M_o es la masa lavada y seca en estufa, y M_f es la masa final del material resultante de medida superior a 1,6 mm.

Resultados del ensayo.

Tabla 3.11: Resultados del ensayo de desgaste Los Ángeles.

EIRSU	Los Ángeles
EM5 – 12	40
EM12 – 20	39
ET5 – 12	38
ET12 – 20	37

En la tabla 3.11 se muestran los resultados del ensayo Los Ángeles, donde tanto las muestras de EM como ET, fluctúan entre 37 y 40, éste es un valor un tanto más alto que el límite de 35 recomendado en el PG-3/2002 (artículo 513 para tráfico pesado -T1-, tráfico medio -T2- y valor de referencia para árido natural), esto se debe al elevado contenido de vidrio en las

fracciones gruesas. El reemplazo parcial de una fracción de vidrio por árido natural haría que disminuyese este valor, pudiendo así llegar a ser aceptable para la utilización en firmes, consideración que se debe tomar en cuenta para la fabricación de hormigones.

En cuanto a la comparación de los resultados en las fracciones y en las muestras de EIRSU, se observa cierta similitud, cuyo valor es muy cercano a 40. Este coeficiente Los Ángeles coincide también con el determinado para EIRSU todo uno del Informe V (2001), lo que indica una cierta similitud y coherencia de resultados. No obstante, este valor pierde vigencia a la hora de comparar con los áridos naturales cuyos valores son alrededor de 10 a 30 (Izquierdo M., 2005), hecho que implica una cierta dificultad en la utilización de EIRSU en áridos para capas superficiales con tráfico pesado.

3.3.7 Coeficiente de forma.

La evaluación de la forma (plana, esférica, etc.) de los elementos que componen un árido, se realiza a través de la determinación del coeficiente de forma. El coeficiente de forma, al igual que otro de los ensayos de propiedades geométricas de los áridos, sirve para tener un referente, respecto a la trabajabilidad del material.

Objetivo y normativas de referencia

El coeficiente de forma proporciona una relación entre el volumen de un conjunto de partículas de tamaño superior a 5 mm y el volumen de las esferas circunscritas a cada una de ellas. Dado un conjunto de partículas de masa m_i y dimensiones máximas L_{\max}^i con densidad media ρ , el coeficiente de forma se determina mediante la fórmula 3.3:

$$Cf = \frac{6 \sum m_i}{\pi \rho \sum (L_{\max}^i)^3} \quad (3.3)$$

Este ensayo sólo se realiza con los áridos gruesos, puesto que con los finos sería dificultoso determinar las dimensiones máximas con precisión. La normativa empleada es la UNE 7-238.

El procedimiento se describe en la norma UNE 7-238, para el caso de áridos cuyas fracciones estén en la franja de 4 a 63 mm, por lo que se realizó sobre las fracciones 5-12 y 12-20 mm de las plantas de incineración de Mataró y Tarragona del presente estudio.

Las muestras se obtuvieron como en todos los ensayos, por medio de cuarteo, hasta obtener las cantidades necesarias para este ensayo (esto es para cada fracción y para cada una de las EIRSU). Se midió la máxima dimensión (L_{\max}^i) de cada pieza y la masa del conjunto de la muestra en cuestión, a continuación se determinó el volumen de dicha muestra y se realizaron los cálculos correspondientes, cuyos resultados se indican en la tabla 3.12.

Resultados del ensayo

Tabla 3.12: Resultados del ensayo de coeficiente de forma.

EIRSU	Coefficiente de forma
EM5 – 12	0,2
EM12 – 20	0,3
ET5 – 12	0,2
ET12 – 20	0,3

El PG-3/2002 no hace ninguna recomendación del coeficiente de forma para HC y G-C, por lo que se ha tomado como referencia la normativa EHE (1990), que señala que el coeficiente de forma del árido grueso determinado por la norma UNE 7-238 no debe ser menor a 0,15. En el caso de las EIRSU de este estudio, los resultados de la tabla 3.12 indican que las EIRSU, satisfacen este requerimiento al tener valores entre 0,2 para la gravilla y 0,3 para la grava, presentando entonces trabajabilidad y cierta garantía a la buena compactación.

La norma francesa (P 18-301) que es más exigente, recomienda que para áridos de 12,5-25 mm el coeficiente de forma sea mayor o igual a 0,15 y para áridos comprendidos entre 25-50 mm el coeficiente de forma se mayor o igual a 0,11 (Cánovas, 1986). En ambos caso las EIRSU cumplen estas recomendaciones.

3.3.8 Caras de fractura y textura superficial

Las caras de fractura y la textura superficial de un árido tienen una gran influencia en las resistencias del hormigón, especialmente en la flexotracción, esto se debe al grado de rugosidad y resistencia al deslizamiento (fricción) que posea el árido, ya que cuando más rugoso es el árido, mayor adherencia tiene con la pasta de cemento.

Los áridos pueden tener diferentes tipos de texturas superficiales y caras de fractura, dependiendo de la naturaleza de la roca de origen y del proceso de obtención de los granos, porosidad, etc, así como del estado físico en el que se encuentren las partículas. En el caso de

las EIRSU su origen son los RSU y su proceso de obtención es la incineración y tratamiento, los cuales en conjunto determinan las características de las EIRSU. De forma general se puede decir que las EIRSU cambian su rugosidad en función del material que contengan, así por ejemplo, el material más importante cuantitativamente de las muestras de EIRSU estudiadas de la fracción 12-20 mm es el vidrio (cerca del 60% del total) cuya superficie es lisa, no porosa y sin caras de fractura. En segundo lugar están los materiales de neoformación que tiene superficies vesiculares, y que como consecuencia de la fusión que han experimentado, son porosos y rugosos, cuyos puntos de anclaje producen mayor adherencia con la pasta de cemento y menor deslizamiento entre partículas. A continuación, están los materiales cerámicos y restos de construcción y demolición cuyas rugosidades pueden variar desde lisas a granulares, pero la mayoría pueden compararse a los áridos naturales de machaqueo. En tercer lugar está presente en las EIRSU una pequeña proporción de metales, cuyas rugosidades dependen de los procesos de meteorización, por ejemplo si estos materiales han sufrido oxidación y deformaciones por efecto de los cambios de temperatura entonces tienen superficies rugosas, el resto de casos pueden ser lisas. No obstante, esta fracción es bastante pequeña, por lo que su influencia no llega a ser importante con respecto a las caras de fractura.

En consecuencia, en las EIRSU 12-20 mm el material de difícil geometría y que podría ocasionar dificultades mecánicas es el vidrio de origen doméstico cuyo contenido en las EIRSU es bastante considerable. El vidrio posee una forma de laja con superficies lisas y cuya fragilidad es la directa responsable de los altos valores del coeficiente Los Ángeles. Añadir un porcentaje de fracción gruesa de origen natural, podría solucionar en primer lugar la deficiencia de granos en esta fracción, además disminuiría la fragilidad de la fracción y mejoraría la forma con el aumento de anclajes.

En las muestras de EIRSU 5-12 mm el vidrio ocupa un tercio del total de los materiales constituyentes. Sin embargo, sigue influyendo negativamente en las propiedades geométricas, aunque no en el mismo grado que la fracción más gruesa. Las EIRSU 5-12 tienen especialmente materiales cerámicos y de neoformación, lo que en conjunto se puede afirmar que son materiales de geometría más equidimensional, con textura superficial rugosa, determinado en esta fracción mejor carácter geométrico y comportamiento mecánico.

En cuanto a la comparación entre las EM y ET, se pudo observar un sensible incremento de vidrio en las EM y algo más de metales en ET. Pero de forma general ambas fracciones y muestras guardaron bastante homogeneidad dentro del análisis geométrico con igual problemática de la fracción 12-20 mm por la presencia sustancial de vidrio.

3.3.9 Composición Química.

La composición química de los diferentes materiales que forman las EIRSU está en función de la procedencia (RSU), los pretratamientos, condiciones de operación e incineración, etc., por ello, las concentraciones de los elementos presentes en las EIRSU pueden ser muy variadas.

La composición química permite conocer los posibles elementos peligrosos para el medio ambiente y para la durabilidad del hormigón con EIRSU. Los elementos mayoritarios determinan las propiedades químicas y controlan las condiciones de lixiviación cuando el material entra en contacto con el agua. Desde luego, también es importante determinar los elementos minoritarios y traza que podrían ser potencialmente peligrosos para el medio ambiente, aunque estén presentes en menores concentraciones. En cuanto a la durabilidad, los áridos pueden contener compuestos que produzcan variaciones volumétricas en el hormigón por aumento de la demanda de agua, alteración en los tiempos de fraguado, y corrosión de las armaduras, lo cual obliga a determinar el contenido de estas especies en las EIRSU.

En la composición química de las EIRSU, se ha determinado la concentración de elementos mayoritarios (mayor a 10000 mg/kg), minoritarios (1000 a 10000 mg/kg) y traza (menor de 1000 mg/kg), análisis que sólo se realiza para áridos secundarios y reciclados, ya que con áridos naturales generalmente las normativas solo se refieren a los límites que han de tener estos en contenido de impurezas orgánicas, sulfatos solubles en ácido, sulfatos solubles en agua, cloruros solubles en agua y azufre, que se determina mediante los ensayos correspondientes y que para el caso de las EIRSU también se han realizado.

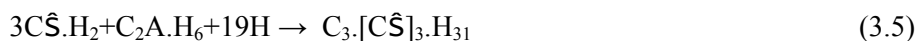
A continuación se indica la nomenclatura utilizada para abreviar algunos compuestos que serán nombrados frecuentemente y se indica algunas reacciones químicas que se producen en los hormigones ante la presencia de ciertos compuestos, de esta forma se intenta explicar las posibles reacciones a las que pueden estar sometidos los sistemas con cemento y EIRSU.



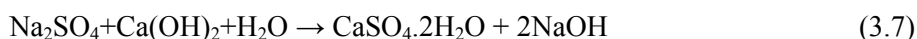
Aunque el mecanismo de ataque del ión sulfato no está esclarecido del todo, lo que sí se tiene como punto de partida, es que son las fases del aluminato tricálcico las causantes de este fenómeno perjudicial para el hormigón, produciendo expansiones y pérdida de cohesión por ataque al CSH (Mehta y Monteiro, 1994).

La ettringita secundaria y los sulfatos cálcicos hidratados, se forman por la reacción entre los sulfatos cálcicos, alcalinos o de magnesio con el hidróxido de calcio y los aluminatos de la pasta de cemento (Mehta y Monteiro, 1994).

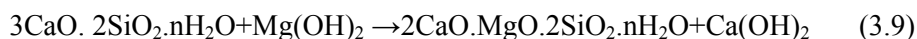
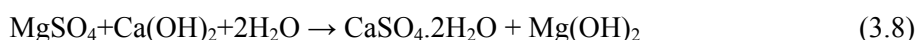
La ettringita secundaria formada por el ataque por sulfatos, puede resultar de la reacción entre el sulfato cálcico hidratado y el aluminato tricálcico hidratado, según las siguientes reacciones (Mehta y Monteiro, 1994):



El sulfato cálcico conforme la reacción (3.5), puede ser generado por el ataque del sulfato alcalino, y continuar con el ataque según (3.6):

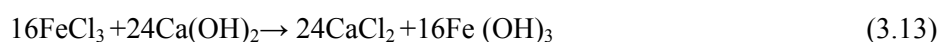
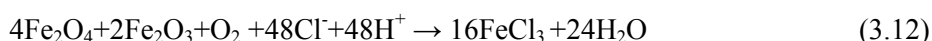
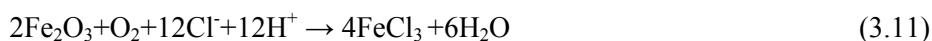
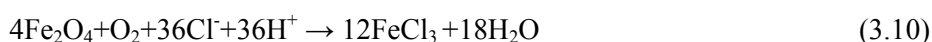


Son los sulfatos de magnesio los que ocasionan el ataque más severo al hormigón, puesto que el catión puede intercambiarse con el calcio del silicato cálcico hidratado causando pérdida de cohesión, además de formación de sulfato cálcico y posterior formación de ettringita conforme las reacciones (3.8) y (3.9).



Los sulfatos cálcicos, alcalinos o magnésicos pueden originarse a partir de los áridos, causando un ataque desde el interior, como también venir desde la propia composición del cemento cuando se trata de prefabricados. El ataque también puede ser desde el exterior hacia el interior, en este caso los agentes serían el agua o el suelo que están en contacto con el hormigón (Mehta y Monteiro, 1994).

En cuanto a los cloruros, estos pueden causar corrosión por despasivación de la armadura del hormigón. El cloruro que está libre en el interior del hormigón, puede reaccionar con los óxidos de la capa pasivadora iniciando la corrosión. El cloruro, que está físicamente adsorbido o químicamente fijado es inofensivo, siempre que permanezca fijado. Según Calleja (1996) las reacciones que ocurren entre el ión cloruro y el hierro pueden ser representadas de la siguiente manera.



El hidróxido de hierro formado es un producto voluminoso, esponjoso, poroso y poco adherente, que no sólo no protege a la armadura, sino que perjudica la adherencia entre esta y la matriz cementante y facilita la llegada de nuevos iones cloruros (Calleja, 1996).

3.3.9.1 Composición elemental de las EIRSU.

Se analizó de forma conjunta el contenido de elementos mayoritarios (Al, P, Na, Ca, Fe, Mg, Si, S, K) y de elementos minoritarios (Pb, Cu, Zn, y Cr.) mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX). Para el análisis se han elaborado perlas de tetraborato de litio (LiBH_4) por duplicado con una dilución 1:20. El proceso se inició con la separación de las muestras para la digestión, estas muestras fueron trituradas y posteriormente pulverizadas hasta que pasen en tamiz menor a 0,08 mm, de cada muestra se separó 0,3 g y se calcinó en estufa a 1000 °C durante 3 horas. A continuación se mezcló con 5,7 gr de tetraborato de litio (dilución 1/20) y se homogeneizó. Seguidamente se fundió la mezcla a 1500 °C con un horno de inducción, marca *Perle X-2*, hasta convertirlas en perlas de 30 mm de diámetro. La intensidad de fluorescencia se ha medido con un espectrofotómetro marca *Philips PW 2400*. Para cuantificar los elementos se utilizó una recta de calibración, a partir de 56 muestras geológicas de referencia internacional.

Dentro del proceso de separación de las muestras para la digestión, se encontraron inconvenientes a la hora de pulverizar el material (inconveniente común en todos los ensayos de fracción pulverizada), ya que en ciertas muestras de la fracción 12-20 mm y en especial la 5-12 mm, contenían algunos materiales metálicos que por su dureza (mayor al resto de los componentes de la EIRSU) resultó engorroso molerlos, y excepcionalmente se tuvo que separar manualmente estos componentes. Otra parte de los materiales metálicos cuyo punto de fusión es más bajo, se adhirieron al molino de anillos ya que el efecto del cizallamiento aumentó la temperatura del material, teniendo entonces que descartar dichas muestras en conjunto. Desde luego este inconveniente no fue un denominador común en todas las muestras ya que la mayoría de materiales metálicos se presentan como hierros oxidados, facilitando su reducción y pulverización. En consecuencia los resultados muestran más o menos homogeneidad en ambas fracciones.

Resultados de la Composición elemental de las EIRSU.

Los resultados de las EIRSU se han hecho por separado para cada fracción, tanto de las EIRSU de Mataró como de Tarragona. A continuación se presenta en la tabla 3.13 estos resultados.

Tabla 3.13: Elementos mayoritarios y minoritarios de las EIRSU de Mataró y Tarragona en porcentaje de óxidos.

EIRSU	EM5-12	EM12-20	ET5-12	ET12-20
Elementos	Porcentaje de elementos en forma de Óxidos			
Si	53,76	60,30	43,96	52,12
Ca	14,73	12,87	12,64	10,14
Al	2,41	2,03	3,97	2,33
Fe	3,98	2,94	5,16	4,85
Mg	1,12	1,05	1,35	2,09
K	1,38	1,34	1,39	1,34
Mn	0,101	--	0,18	--
Elementos	(mg/kg)			
P	3900	2100	5500	2300
Na	61500	70800	59000	67900
Pb	3500	1200	5700	2380
Cu	6700	1900	10500	2000
Zn	2900	1950	4800	2400
Cr	700	700	710	670

Comparando los resultados de la tabla 3.13 con los elementos mayoritarios y minoritarios encontrados en el estado del arte para las EIRSU vemos que son semejantes. No obstante, los metales pesados más abundantes se encuentran en las fracciones más finas de EIRSU todo uno. En cuanto a la comparación entre las fracciones estudiadas, se puede observar que conservan una cierta uniformidad en cuanto a la concentración de los elementos. Así por ejemplo, el elemento más abundante es el sílice $-SiO_2-$ con valores muy similares en ambas muestras. Esto se debe a que las proporciones de vidrio doméstico están directamente relacionadas con la gestión de recogida y selección de este material, que al parecer es bastante similar en ambas plantas (en Mataró posiblemente hay una proporción ligeramente superior en contenido de vidrio que en Tarragona). Lo mismo sucede con la cal $-CaO-$, que es el segundo elemento con mayor presencia en las EIRSU.

El contenido de CaO para ambos residuos (EM y ET) es similar, el calcio se encuentra más asociado a la matriz sílico-aluminosa (análisis de Difracción de rayos X $-DRX-$) y por tanto mucho menos disponible a la lixiviación, aunque influirá sobre la actividad del cemento. La presencia de altos contenidos de Ca modificaría la reactividad de las EIRSU, haciéndolas más reactivas tanto puzolánica como hidráulicamente (Mehta, 1983). El problema surge cuando las EIRSU con un elevado contenido de Ca y Al presentan cantidades significativas de C_3A , lo que puede ser altamente nocivo para un hormigón en caso de ataque por sulfatos (Mehta, 1983). Los siguientes elementos presentes en las EIRSU son el Al, Na, Fe, Mg y K que están en porcentajes semejantes a los materiales geológicos.

La cantidad de Fe es un dato a tener en cuenta en la valorización de las EIRSU. Los valores medios a nivel mundial según el informe V (2001) están entre 1,3 y 25,8%, mientras que en las EIRSU estudiadas bordean valores entre 2,94 y 5,16%, reflejando que las EIRSU de ambas incineradoras fueron llevadas a plantas de tratamiento, donde existe una instalación de recuperación de hierro por magnetismo e incluso el uso de corrientes de Fucol. Esto hace que exista menor presencia de Fe y también de Al. Otro factor que justifica estos valores, es la efectividad del reciclaje realizado en las zonas de Mataró y Tarragona.

Haciendo una evaluación de los resultados entre muestras y fracciones se puede apreciar que el Si, Na y Mg están presentes en mayor porcentaje en la franja 12-20 mm, esto se debe a que esta fracción está compuesta mayoritariamente por vidrios (Si) de origen doméstico y alguna fracción de material cerámico, que contiene Na y Mg, en tanto que en la franja media predominan tanto los materiales cerámicos como también el vidrio, esto se puede apreciar en la presencia predominante de Ca y Si. El resto de elementos presentan concentraciones más elevadas en la fracción 5-12 mm. Además, la misma tabla de resultados indica que las concentraciones de los elementos de las muestras de ET son sensiblemente más altas que las EM.

De los resultados obtenidos se desprende que las EM y ET tienen una composición de elementos mayoritarios semejante a los materiales geológicos. En términos de óxidos el SiO_2 y el CaO suponen las fases principales de las muestras, seguidas por Na_2O , Al_2O_3 y Fe_2O_3 (naturalmente también interviene el O, formando parte de los óxidos de los elementos citados, o en forma de silicatos, aluminatos, etc.). En cuanto a los elementos minoritarios como son los metales pesados Cr, Pb, Cu, Mg, Zn, y Cr sus concentraciones son claramente superiores a los minerales de áridos naturales en especial el Cu y el Zn.

Según la bibliografía, la composición química de las escorias depende del material original de alimentación del horno, del tipo de incineradora, de la operación del sistema de combustión y de la volatilidad de los elementos. Comparando la composición de la mayoría de escorias investigadas (Informe V, 2001), se observa que son comparables en cuanto a los elementos mayoritarios contenidos en la litosfera y el suelo.

Además como se muestra en la tabla 3.14 y gráfico 3.4, los valores de las EM y ET de ambas fracciones son menores a las otras plantas. Podría deberse a que las EIRSU de otras plantas incluyen los finos (con mayores contenidos de metales pesados) o que las plantas no tengan tratamientos de separación de metales. Los valores de Cr y Ni son semejantes, sin embargo el Pb y Zn son más altos en ET (excepto el Zn en Palma de M. y Girona), mientras que las EM son bastante parecidas en ambas EIRSU.

Tabla 3.14: Concentraciones de metales encontrados en las EIRSU en diferentes estudios (mg/kg).

Fuente: Alba, N. (1998).

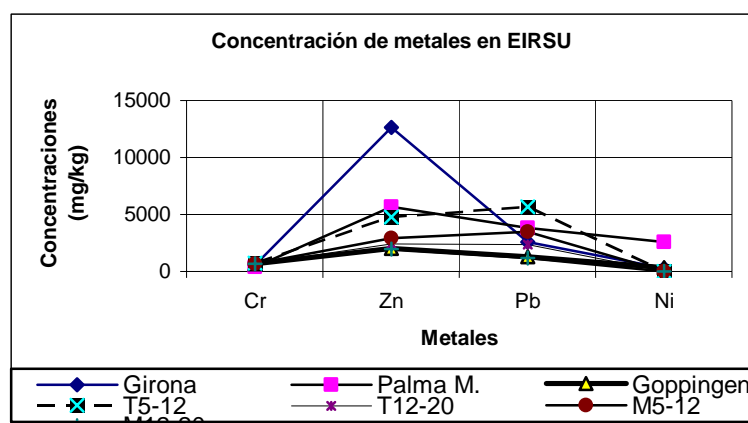
EIRSU	EGirona (1)	EIRSU Palma de Mallorca (2)	EIRSU Goppingen (3)	EM5-12 (4)	EM12-20 (5)	ET5-12 (6)	ET12-20 (7)
Cr	560	390	664	700	700	710	670
Zn	12660	5660	2020	2900	1950	4800	2400
Pb	2590	3800	1280	3500	1200	5700	2380
Ni	280	2590	314	--	--	--	--

(1) y (2) Resultados de los metales pesados según metodología Cahiers Techniques de la DPP (ANRED, 1984, Baldasano, 1989).

(3) No se especifica metodología de preparación y extracción seguida (Stegemann, et. al. 1995)

(4), (5), (6) y (7) son los resultados del estudio realizado en este apartado con EM5-12, EM12-20, ET5-12 y ET5-12.

Gráfico 3.4: Comparación del Cr, Zn, Pb y Ni con EIRSU de otras plantas de incineración.



3.3.9.2 Sulfatos totales o sulfatos solubles en ácido, sulfatos solubles en agua, azufre y cloruros solubles en agua.

Como ya se ha mencionado antes, las normativas para áridos naturales generalmente se refieren a los límites que han de tener estos en contenido de impurezas orgánicas, sulfatos solubles en ácido o sulfatos totales, sulfatos solubles en agua, cloruros solubles en agua y azufre. En el caso de las EIRSU también se ha determinado estos parámetros mediante los ensayos para determinar las “propiedades químicas de los áridos” correspondiente a la normativa UNE-EN 1744-1 (1998) y los resultados se han comparado con los límites del PG-3/2002 para los sulfatos solubles en ácido y para el resto con la EHE (1999) para áridos en hormigones, ya que a falta de límites establecidos en el pliego, se creyó necesario tener un referente que comporte cierta restricción al respecto. Los procedimientos de los ensayos se detallan a continuación en cada apartado y los resultados se indican en la tabla 3.15.

Contenido de azufre.

El análisis de Azufre se determinó conjuntamente con el contenido de materiales mayoritarios y minoritarios, con la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX). Los resultados se presentan junto con los de sulfatos totales o sulfatos solubles en ácido y cloruros solubles en agua.

Sulfatos totales o sulfatos solubles en ácido.

Para determinar los sulfatos totales o sulfatos solubles en ácido, se prepara una muestra no menor a 5 kg (para EIRSU de dimensión máxima 20 mm), se tritura y se deja 24 horas en estufa a temperatura no mayor a 110 °C para evitar la oxidación de los sulfatos. A continuación, posteriormente se enfría y se pesa hasta masa constante, para proceder a pulverizar para que pase por el tamiz 0,125 mm, luego se homogeniza y se extrae por lo menos 20 g de muestra, y a continuación se separa 0,1 mg, esta cantidad se introduce en un vaso de 250 ml, se añade 90 ml de agua destilada fría y se agita enérgicamente, mientras se va adicionando 10 ml de ácido clorhídrico concentrado. Seguidamente se calienta moderadamente la disolución, a medida que se va disolviendo las partículas sólidas con el extremo aplanado de una varilla agitadora de vidrio. Se deja la disolución en digestión durante 15 minutos a una temperatura menor a la de ebullición, al cabo del lo cual, se filtra la disolución en un vaso de 400 ml, a través de una papel filtro de textura media. Finalmente se lava el fondo con agua hirviendo hasta que el filtrado esté exento de iones cloruro (y se comprueba con una disolución de nitrato de plata). Una vez realizada la digestión de la muestra se mezcla con una disolución de ácido clorhídrico se determinó por gravimetría el contenido de iones sulfatos. El valor obtenido se expresa en tanto por ciento con respecto a la masa del árido.

Sulfatos solubles en agua.

En una muestra pulverizada de ensayo del árido tratado con agua, se extraen los iones sulfato solubles, La cuantificación de los iones sulfato solubles al agua se realiza por precipitación, a pH comprendido entre 1 y 1,5 con una disolución de cloruro de bario a ebullición. La dosificación se realiza por gravimetría, donde el contenido en iones sulfato se expresa en porcentaje de masa con relación a la masa del árido (este método se aplica también, en el análisis de los áridos que contengan sulfuros como es el caso de las escorias).

El procedimiento consiste, en una vez extraída una muestra no menor a 5 kg, para nuestro árido de dimensión máxima 20 mm, se seca a 110 °C y se deja enfriar hasta masa constante, posteriormente se muele hasta que pase a través del tamiz de 16 mm, se homogeniza la muestra y se separa en dos muestras de aproximadamente 2 kg. Seguidamente se preparan dos botellas de 5 litros de capacidad, pesadas anteriormente, se introduce el árido y se vuelve a pesar el conjunto, encontrando por diferencia de masas, la masa del árido contenido en cada botella. A continuación, se añade en la botella una masa de agua igual o el doble de la masa de árido correspondiente, se cierra herméticamente las botellas y se agita durante 24 horas en el agitador de sacudidas o de rodillo. Una vez finalizado este periodo de agitación, se deja reposar y se filtra por lo menos 100 ml, para seguidamente depositarlos en recipientes limpios, secos y sellados. Inmediatamente realizados los procedimientos para obtener las extracciones, se realizó el análisis de éstas, por medio de la determinación cromatográfica o cromatografía de intercambio iónico, utilizando para esto el cromatógrafo marca Metrohm, modelo 761 compact IC.

Cloruros solubles en agua.

La determinación de los cloruros solubles en agua se realiza por el método de Volhard (método de referencia), para áridos cuyo contenido de cloruros procede del contacto directo con aguas salinas, cuyo procedimiento se indica a continuación.

En una muestra de árido tratada con agua se extrae los iones cloruro. El método de análisis de la disolución se basa en la determinación de Volhard, en el que se añade una sobredosis de una disolución de nitrato de plata a la disolución que contiene los iones cloruro; la cantidad de disolución de nitrato de plata que no ha reaccionado se valora por retroceso con una disolución patrón de tiocianato, utilizando como indicador otra disolución de sulfato de amonio y de hierro. Los cloruros se expresan como iones cloruro en porcentaje de la masa, con relación al contenido en iones cloruro del árido.

En el caso de las EIRSU, se realizó las extracciones, con el procedimiento seguido para los sulfatos solubles en agua. A continuación, se realizó el análisis de éstas, por medio de la determinación cromatográfica o cromatografía de intercambio iónico, utilizando para esto el cromatógrafo marca Metrohm, modelo 761 compact IC.

Resultados de los sulfatos totales o sulfatos solubles en ácido, sulfatos solubles en agua, azufre y cloruros solubles en agua.

Tabla 3.15: Resultados de los ensayos para la determinación de sulfatos totales, sulfatos solubles en agua, azufre y cloruros solubles en agua.

Resultados	EIRSU Mataró		EIRSU Tarragona		Límites
	EM5-12	EM12-20	ET5-12	ET12-20	
Sulfatos solubles en ácido	0,67%	0,48%	0,76%	0,41%	PG-3/2002 0,8%
Sulfatos solubles en agua	0,014%	0,04%	0,07%	0,08%	EHE (1999) <0,08%
Cloruros	0,42 %	0,15%	0,33%	0,21%	EHE (1999) <0,05% (horm. en masa) <0,03%
Azufre	0,18%	0,14%	0,06%	0,14%	EHE (1999) < 1,0%

En la tabla 3.15 de resultados, se observa que los sulfatos solubles en ácido, sulfatos solubles en agua y cantidades de azufre de todas las muestras de EIRSU están dentro de los límites señalados. Sin embargo, los sulfatos solubles en ácido de las fracciones 5-12 de ambas EIRSU, están relativamente cerca del límite recomendado por el PG-3/2002, por lo que a la hora de determinar el tipo de cemento, para la fabricación de hormigones, se utilizó esta información para intentar evitar las posibles expansiones del hormigón por ataque del SO_4 a la pasta y la formación de ettringita. En cuanto a los límites de la EHE, se han considerado en este apartado, ya que el pliego no hace ninguna especificación en los parámetros de la tabla 3.15 respecto a los sulfatos solubles en agua, cloruros y azufre) para áridos en HC y G-C, por lo que se creyó conveniente tener un valor referencial. Así, como muestra la tabla 3.15, se obtuvieron altas concentraciones de cloruros en las EIRSU, lo que podría ser peligroso si se utilizaran las escorias en hormigón armado.

De los resultados obtenidos, es necesario saber si estos compuestos están fijos o pueden ser liberados por el hormigón al entorno, por lo que posteriormente se hace un estudio de lixiviación. Además, es importante determinar el contenido de materia orgánica, como se indica en el siguiente apartado.

3.3.9.3 Contenido de materia orgánica.

En este apartado se encontró la pérdida de masa por efecto del fuego a 550 °C, este valor no solo es un índice del contenido de materia orgánica, sino de la calidad de combustión en el

proceso de incineración de los RSU. La pérdida al fuego a 550 °C está incluida en la Orden de valorización de escorias del 15 de Febrero de 1996, estableciendo un valor máximo de 5%.

Este ensayo proporcionó una aproximación de la cantidad de materia orgánica de la muestra. Consiste en obtener una muestra representativa de 15 g de cada fracción, molerla hasta convertirla en muy finos, con tamaño menor a 125 micras. Se seca la muestra en la estufa a 110 durante 24 horas para eliminar la humedad, se deja enfriar la muestra a peso constante y se pesa. Se deposita en crisoles y se pone dentro del horno a 550 °C (4 o 5 horas), se saca la muestra después de 45 minutos, se deja enfriar, se pesa nuevamente a masa constante y por diferencia de pesos se obtiene la cantidad de materia orgánica que pierde la muestra. Esto se realizó para todas las muestras gruesas por duplicado y se obtuvieron los resultados de la tabla 3.16.

Resultados del contenido de materia orgánica por pérdida de peso por calcinación.

Tabla 3.16: Resultados del contenido de materia orgánica por pérdida de peso por calcinación.

EIRSU	Contenido de materia orgánica.
EM5 – 12	2,02%
EM12 – 20	0,96%
ET5 – 12	2,04%
ET12 – 20	0,87%

Como se observa en la tabla 3.16, los valores de contenido de materia orgánica son bastante bajos, en comparación con los límites de la Orden del Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña (del 15 de Febrero de 1996), en el que estipula como valor máximo el 5%, lo que indica que son aptas para su valorización. Este valor como hemos mencionado es un indicativo de la alta calidad de incineración de las dos plantas (Izquierdo, M., 2005). Por otro lado se ha comparado con las EIRSU todo uno (Informe V, 2001) de estudios anteriores de las mismas plantas y los resultados son semejantes cumpliendo también con dicha Orden.

3.3.10 Análisis mineralógico.

Los elementos químicos que forman los áridos están distribuidos en la matriz formando compuestos cristalinos y amorfos. Cuando se deja enfriar de forma lenta un material que está inicialmente a altas temperaturas y en estado líquido, los elementos que lo constituyen se agrupan ordenadamente formando estructuras cristalinas estables. Pero cuando el enfriamiento es brusco los elementos no se agrupan de forma ordenada formándose compuestos amorfos.

Es importante conocer las especies mineralógicas que forman a las EIRSU, para esto se ha utilizado el análisis de difracción de rayos X (DRX) de donde se obtienen los difractogramas. No obstante, en estos gráficos sólo se aprecia con claridad la representación mineralógica cristalina reflejada en espectros caracterizados por la existencia de picos discretos representativos de sus diferentes fases presentes, mientras que el carácter vítreo se caracteriza en los mismos gráficos de forma concluyente cuando los espectros muestran fondos continuos con ausencia de picos.

Para determinar las especies mineralógicas que forman las EIRSU, se han utilizado tres muestras de cada fracción de EM y ET. El procedimiento realizó con un difractómetro *Siemens D-500*, con radiación $K\alpha$ Cu ($\lambda = 1,5418\text{\AA}$), monocromador de grafito y detector de centelleo, bajo unas condiciones del tubo de rayos X de 30 mA y 40 kV. La velocidad angular fue de 0,05 (2θ) cada 3 segundos, con un rango de barrido de 2θ entre 4° y 70° . El reconocimiento de los compuestos formadores es posible a partir de las fichas del JCPDS (*Joint Committee for Powder Diffraction Standards*), en las cuales se describe la celda primitiva, los índices de Miller, el espaciado reticular (d) y la intensidad porcentual de la difracción experimental. En los difractogramas se representa la intensidad de difracción en función de 2θ , donde θ es el ángulo entre el haz de rayos X y el plano cristalino que difracta. El ángulo de difracción θ se relaciona con la distancia entre planos, d , y la longitud de onda del rayo incidente λ , a través de la fórmula de Bragg -3.14-:

$$\lambda = 2 d \sin \theta \quad (3.14)$$

Resultado de las Fases cristalinas.

Los resultados se muestran en la tabla 3.17 y los difractogramas de los gráficos 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8, correspondientes a las dos fracciones de EIRSU de Mataró y Tarragona.

Tabla 3.17: Resultados de la composición mineralógica de las EIRSU de Mataró y Tarragona.

Familia de compuestos	Nombre del compuesto.	EIRSU Mataró		EIRSU Tarragona	
		EM5-12	EM12-20	ET5-12	ET12-20
Silicatos cálcicos	Gehlenita ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$)	P	A	P	P
Compuestos de hierro	Magnetita (Fe_3O_4)	P	P	P	P
Compuestos de calcio	Calcita (CaCO_3)	P	P	P	P
	Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	P	A	Pr	P
Compuestos de Magnesio	Periclasa (MgO)	P	P	P	S
Otros Compuestos	Cuarzo (SiO_2)	P	P	P	P
	Halita (NaCl)	Pr	S	P	P
	Microcline (KAlSi_3O_8)	P	Pr	Pr	P
	Hausmanite (Mn_3O_4)	P	P	P	A
	Albita ($\text{Na Si}_3\text{O}_8$)	P	P	A	P

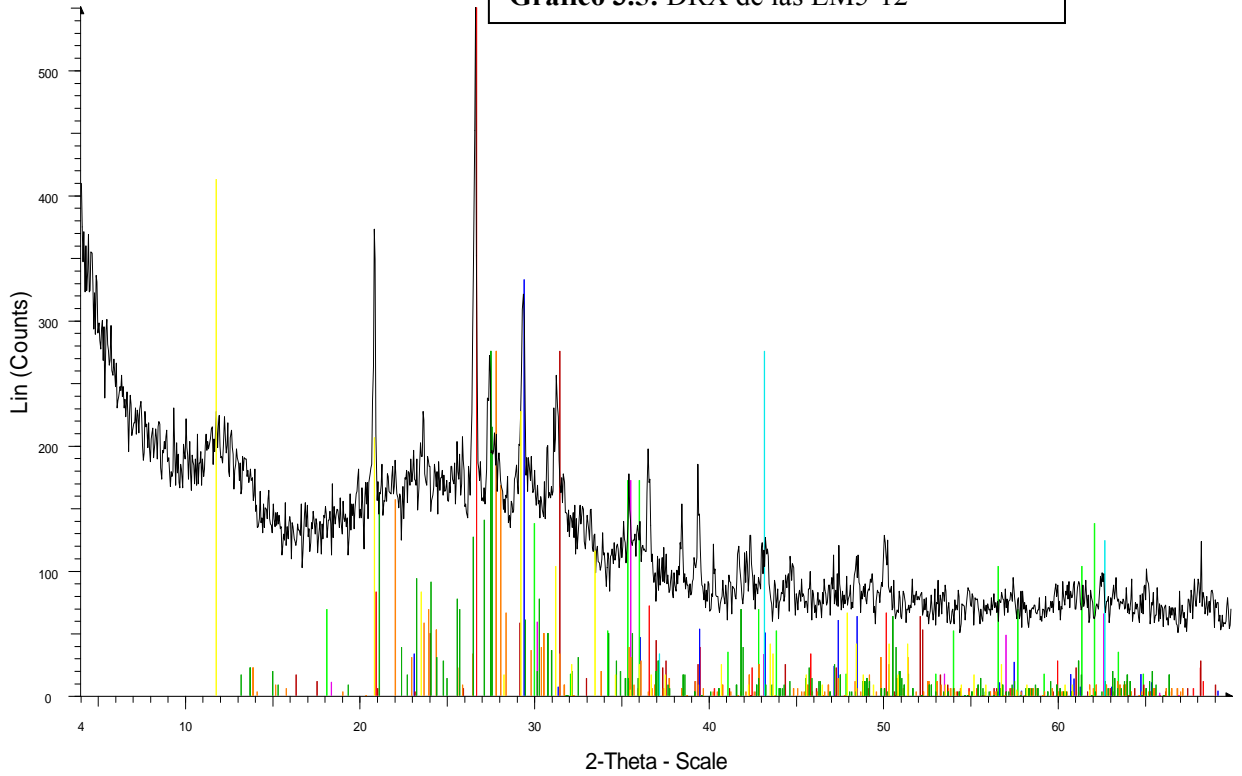
Presente (P): Cuando se ha detectado el compuesto en las tres muestras.

Ausente (A): Cuando el compuesto no se ha detectado en ninguna muestra.

Probable (Pr): Cuando el compuesto se ha detectado en pequeña cantidad o en una o dos muestras.

Similar (S): Cuando la identificación del compuesto es compleja y puede confundirse con otros compuestos de estructura similar.

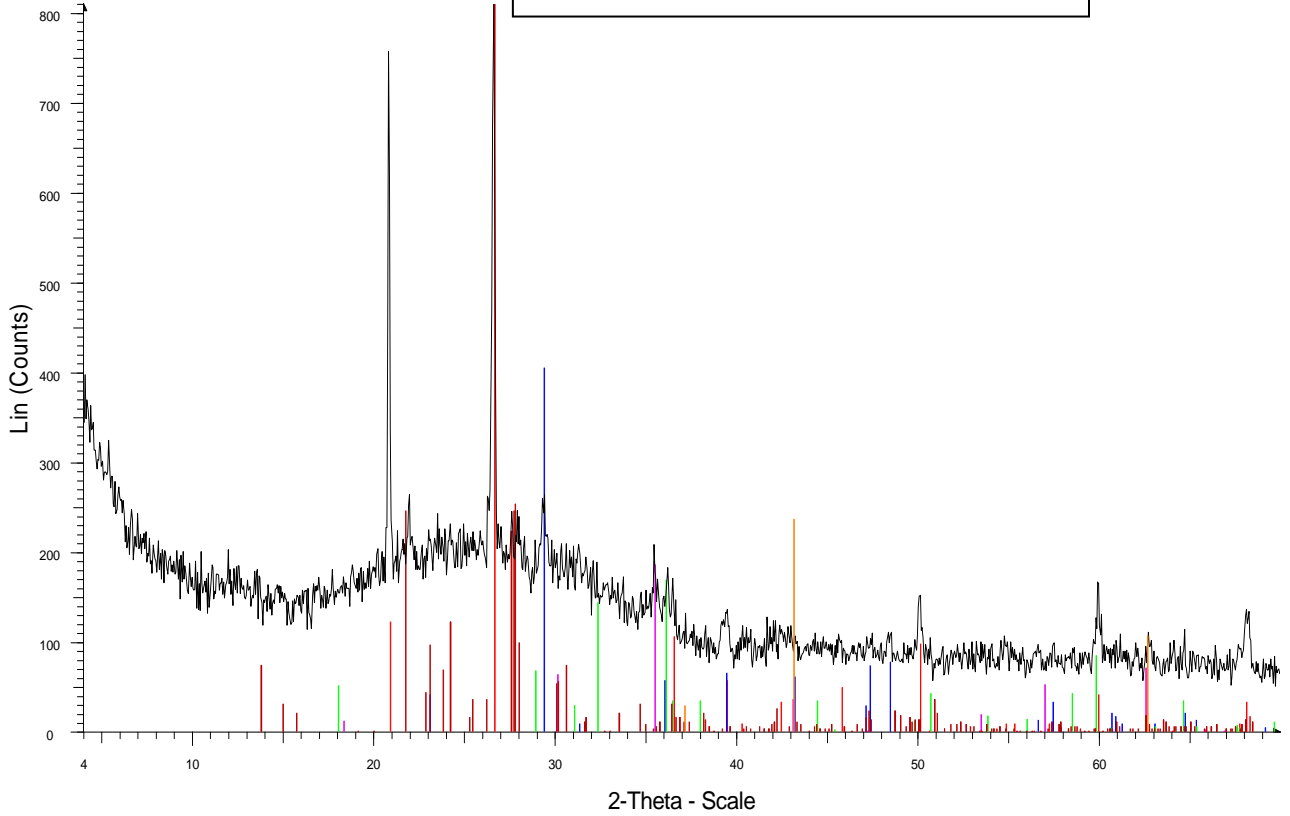
Gráfico 3.5: DRX de las EM5-12



M5/12 - File: 11442.raw - Type: 2Th/Th unlocked - Start: 3.976 ° - End: 69.976 ° - Step: 0.050 ° - St
 Operations: Import

79-1906 (C) - Quartz - SiO2	84-1455 (C) - Microcline Pellotsalo - K-rich phase - (K.95Na.05)AlSi3O8
86-2339 (C) - Calcite - Ca(CO3)	75-1525 (C) - Periclase - MgO
18-0791 (D) - Hausmannite - (Mn,Mg)(Mn,Fe)2O4	06-0047 (D) - Gypsum - CaSO4.2H2O
80-0390 (C) - Magnetite - Fe0.65Fe1.81Mg0.42Al.1Ti.03O4	
87-0970 (C) - Gehlenite (Cr, B-bearing), syn - Ca2Al((AlSi)O7)	
76-0926 (C) - Albite calcian low - (Na0.75Ca0.25)(Al1.26Si2.74O8)	

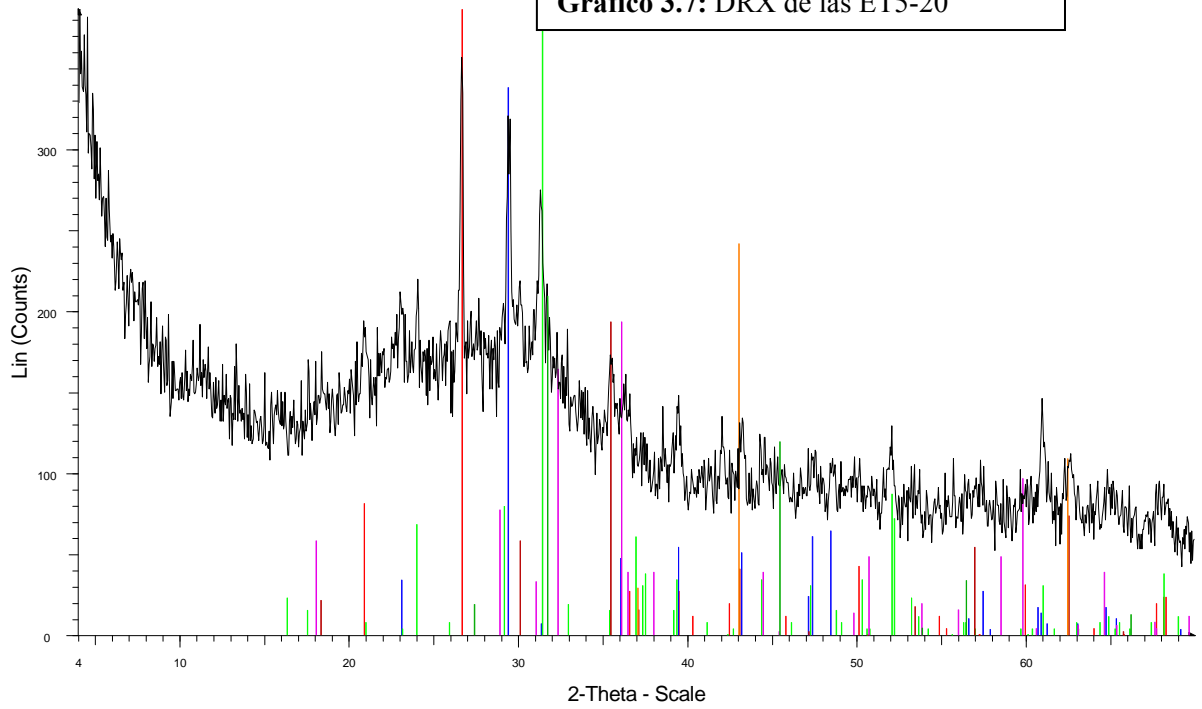
Gráfico 3.6: DRX de las EM12-20.



M12/20AQ - File: 11441.RAW - Type: 2Th/Th unlocked - Start: 3.976 ° - End: 69.976 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 3. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 3.976 ° - Theta: 0.000 ° - Chi: 0.0
 Operations: Import

79-1906 (C) - Quartz - SiO2	
86-2339 (C) - Calcite - Ca(CO3)	
24-0734 (*) - Hausmannite, syn - Mn3O4	
80-0390 (C) - Magnetite - Fe0.65Fe1.81Mg0.42Al.1Ti.03O4	
76-0899 (C) - Albite low - Na(AlSi3O8)	
75-1525 (C) - Periclase - MgO	

Gráfico 3.7: DRX de las ET5-20

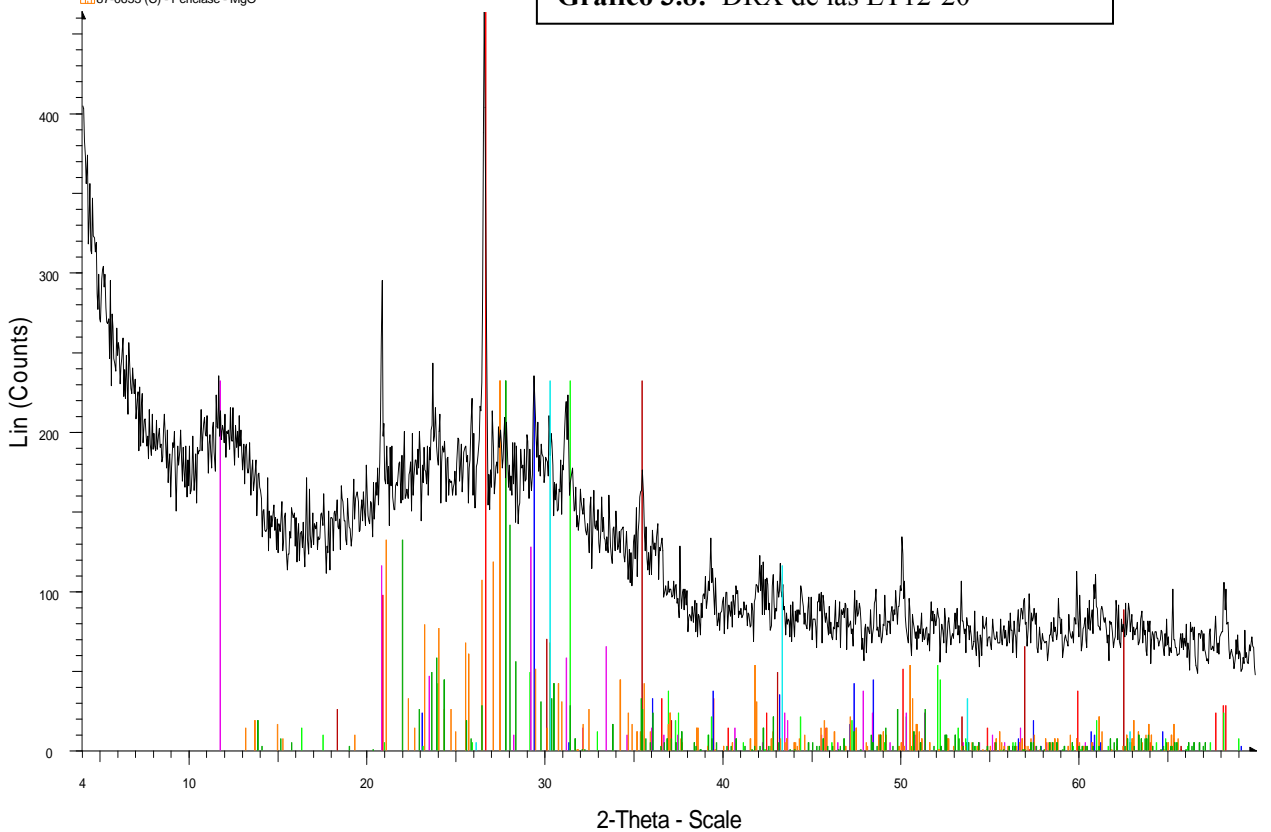


T5/12 - File: 11443.RAW - Type: 2Th/Th unlocked - Start: 3.976 ° - End: 69.976 ° - Step: 0.050 ° - ■ 75-0306 (C) - Halite - NaCl

Operations: Import

- 79-1910 (C) - Quartz - SiO₂
- 86-2339 (C) - Calcite - Ca(CO₃)
- 87-0970 (C) - Gehlenite (Cr, B-bearing), syn - Ca₂Al₂(AlSi)O₇
- 24-0734 (*) - Hausmannite, syn - Mn₃O₄
- 85-1436 (C) - Magnetite - Fe₃O₄
- 87-0653 (C) - Periclase - MgO

Gráfico 3.8: DRX de las ET12-20



T12/20 - File: 11444.RAW - Type: 2Th/Th unlocked - Start: 3.976 ° - End: 69.976 ° - Step: 0.050 ° - ■ 76-0926 (C) - Albite calcian low - (Na_{0.75}Ca_{0.25})(Al_{1.26}Si_{2.74}O₈)

Operations: Import

- 79-1910 (C) - Quartz - SiO₂
- 86-2339 (C) - Calcite - Ca(CO₃)
- 87-0970 (C) - Gehlenite (Cr, B-bearing), syn - Ca₂Al₂(AlSi)O₇
- 06-0047 (D) - Gypsum - CaSO₄·2H₂O
- 85-1436 (C) - Magnetite - Fe₃O₄
- 84-0709 (C) - Microcline - KAlSi₃O₈
- 26-0919 (C) - Halite, polassian, syn - K_{0.4}Na_{0.6}Cl

Como se puede observar en los espectros de los gráficos 3.5 y 3.6 de Mataró y 3.7 y 3.8 de Tarragona, la fase vítrea aumenta con la medida del grano. Los espectros presentan picos muy altos que dificultan la identificación de los minerales que están en pequeñas proporciones e incluso llegan a disfrazarlos.

Tabla 3.18: Resultados de DRX en las EM, ET y otros estudios de EIRSU.

DRX	EIRSU de Mataró	EIRSU de Mataró	EIRSU Tarragona	EIRSU Tarragona	EIRSU todo uno (5)	EIRSU todo uno (6)
	EM5-12 (1)	EM12-20 (2)	ET5-12 (3)	ET12-20 (4)		
Halita (NaCl)	Pr	S	P	P	P	P
Silvita (KCl)	A	A	A	A	P	--
Anhidrita (CaSO ₄)	A	A	A	A	A	P
Calcita (Ca CO ₃)	P	P	P	P	P	P
Portlandita Ca (OH) ₂	A	A	A	A	A	A
Cuarzo (SiO ₂)	P	P	P	P	P	P
Gehlenita (Ca ₂ Al ₂ SiO ₇)	P	A	P	P	A	P
Albita (NaAlSi ₃ O ₈)	P	P	A	P	A	P
Microcline (Fe ₃ O ₄)	P	Pr	Pr	P	P	P
Hematite (Fe ₂ O ₃)	A	A	A	A	P	P
Periclase (K ₉₅ Na ₅ AlSi ₈ O ₃₈)	P	P	P	S	S	S
Yeso (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	P	A	Pr	P	S	P
Hausmanita (Mg,Mn,Fe) ₂ O ₄	P	P	P	A	P	S
Magnetita (Fe ₃ O ₄)	P	P	P	P	P	S

Presente (P): Cuando se ha detectado el compuesto en las tres muestras.

Ausente (A): Cuando el compuesto no se ha detectado en ninguna muestra.

Probable (Pr): Cuando el compuesto se ha detectado en pequeña cantidad o en una o dos muestras.

Similar (S): Cuando la identificación del compuesto es compleja y puede confundirse con otros compuestos de estructura similar.

En ambas fracciones de EM y ET, se puede distinguir la presencia (o similar) de albita, periclase, hausmanita (excepto en ET12-20) y magnetita, estos guardan correlación con los investigados en las EIRSU de la bibliografía tal y como se indica en la tabla 3.18, donde se incluyen los resultados del análisis de DRX de las EIRSU estudiadas en esta tesis (columnas 1, 2 para EM5-12 y EM12-20 y columnas 3, 4 para ET5-12 y ET12-20), EIRSU todo uno de Cataluña del Informe V (2001) (columna 5) y EIRSU de Mataró todo uno (Alba, N., 1998) (columna 6).

En todas las escorias de la tabla 3.18 se puede ver la presencia de calcita y cuarzo, esto coincide con las EIRSU de otras incineradoras, donde la fracción fina contiene más calcita (Vázquez, 2001), y a medida que aumenta el diámetro de las partículas, la calcita disminuye y el cuarzo aumenta, hasta convertirse en el mineral más importante. Siendo este el caso de las fracciones 12-20 mm, este mismo comportamiento también se puede apreciar en el análisis de FRX (ver página 3.39 y 3.40), donde la cantidad de sílice es mayor en la fracción más gruesa y disminuye en la fracción 5-12 mm, En cuanto al contenido de Ca, se cree que está relacionado con los áridos y el material cerámico.

En cuanto al contenido de halita se manifiesta en las dos EIRSU, aunque no es debido al agua de apagado, puesto que se hace con agua dulce, sino más bien por la proximidad a la costa, lo que supone un aporte de NaCl mediante el aerosol marino (material particulado atmosférico), de ahí que en la FRX también se evidencia el Na, que en la DRX se encuentra asociado con el Cl. Por otro lado la gehlenita se encuentra muy presente en la mayoría de EIRSU formando una matriz silicoaluminosa y es un mineral que se ha encontrado en todas las muestras estudiadas de la bibliografía y pertenece al grupo de la melilita y akermanita que cita Vehlow et al. (1992).

El contenido de sulfatos como la basanita, no se evidencian en los difractogramas, sin embargo posiblemente están presentes en las EIRSU, aunque el secado en estufa de las muestras pudo ocasionar que se descompusiesen.

El Fe aparece como feldespatos en el microcline y especialmente en forma de magnetita, lo que constituye un resto de material magnético que ha quedado, posterior a la planta de tratamiento de EIRSU, ya que como se indicó, las plantas de tratamiento, captan entre otros materiales a los metales. En el caso de las dos plantas estudiadas la captación magnética de los metales es efectiva. No obstante, aunque los resultados por FRX coincide con el análisis por DRX (contenido de elementos mayoritarios), este último indica que la cantidad de magnetita de EM es sensiblemente menor que en las ET. Es importante tener en cuenta que el aluminio en forma elemental y en pequeñas acumulaciones en lugar de estar diseminado puede originar alteración por efectos de pH elevados y en presencia de agua (Izquierdo, M, 2005).

En la tabla 3.18 también se puede ver la presencia de anhidrita y hematite, en las EIRSU todo uno, lo que posiblemente corresponde a las fracciones más finas (0-5 mm).

Por lo que respecta a las EIRSU, cabe recordar que las EIRSU de la tabla 3.18 tanto de las EM como de ET, así como las citadas de la bibliografía en la misma tabla, son EIRSU envejecidas por lo menos 3 meses. Según Stampfli (1992), el envejecimiento de las escorias tiene una influencia en la mineralogía de éstas. Así, se ha observado que en algunos residuos envejecidos aparecen nuevas fases como por ejemplo yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). En muchos casos se cree que el yeso es la fase sulfatada característica de las escorias maduras y la anhidrita es el único sulfato de las EIRSU frescas. No obstante la anhidrita puede estar presente en algunas fases.

Como se indica en el la tabla 3.18, es notable la ausencia de portlandita, esto se debe a que todas las EIRSU de la tabla han tenido un proceso de maduración, tiempo en el cual la portlandita reaccionó con el CO_2 atmosférico o con los sulfatos para dar lugar a otros compuestos como la

calcita y ettringita respectivamente (Stampfli, 1992). Además, las reacciones de la portlandita están implicadas en los procesos de carbonatación formando yeso y larnita (Izaquierdo M., 2005).

Las gráficas de DRX muestran también cantidades considerables de calcita, esta es otra de las características de las EIRSU envejecidas. Por otro lado hay ciertas fases que con el envejecimiento tienden a desaparecer, algunas de ellas son: la cromita (FeCr_2O_4) y el diópsido ($\text{Ca}(\text{NgFe})\text{Si}_2\text{O}_6$).

3.3.11 Clasificación de los tipos de materiales constituyentes en las EIRSU.

No existe una normativa de referencia, sin embargo se ha decidido hacer esta descripción visual, con el objetivo de tener un conocimiento del tipo de materiales que contiene la muestra, y las cantidades que intervienen en la fracción gruesa de las EIRSU. Esta identificación podría proporcionar algunas de las respuestas, respecto al comportamiento que podría tener el hormigón si se usara a las EIRSU como parte de los áridos constituyentes.

Las EIRSU contienen diferentes tipos y cantidades de materiales, en el caso de las ET y EM de ambas fracciones, al tratarse de franjas gruesas, se realizó una identificación a simple vista. Así, algunos de los elementos que forman las EIRSU fueron relativamente fáciles de identificar, tales como el vidrio, cerámica, metales, restos de materiales de construcción y demolición, etc. Sin embargo, también existen otros materiales a los que se les ha llamado de *neoformación*, formados en el proceso de incineración de los RSU y que se han fundido con otros constituyentes y cuyas propiedades dependen especialmente de los componentes que lo formen.

Se ha de tener en cuenta, que cada material que forma parte de las EIRSU, tiene en principio un comportamiento distinto uno del otro, por lo que la mayor o menor cantidad del tipo de material, también influirá en el comportamiento del hormigón fabricado, parcial o completamente con áridos de EIRSU, ya que desde luego, los áridos son materiales que contribuyen trabajabilidad en el hormigón fresco y en la estabilidad de volumen, resistencia y durabilidad del hormigón en el estado endurecido. Para realizar la clasificación de los materiales componentes de las EIRSU, se extrajo una muestra representativa del EM y EM y se lavó. Posteriormente se secó en estufa a 110 °C, se cribó según la normativa UNE-EN 933-1, 35 kg del material. Se separó el retenido en cada tamiz y se pesó, luego se separaron los materiales según la clasificación que se muestra en los resultados, y finalmente se calculó el porcentaje de cada uno con respecto al total de la muestra.

Resultados del ensayo

En la foto 3.3 se puede ver algunos de los materiales identificables a simple vista, tales como el vidrio, cerámica, residuos de construcción y demolición y algo de hierro. Para cuantificar éstos y otros materiales constituyentes como los materiales de neoformación y materiales orgánicos, se siguió el procedimiento indicado en el párrafo anterior, cuyos resultados se indican en la tabla 3.19 y gráfico 3.9.

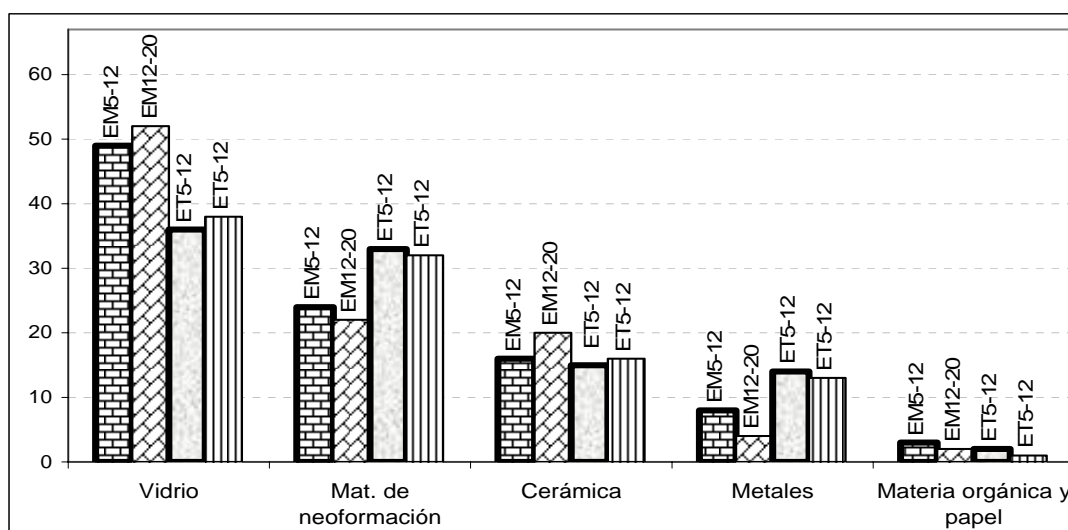
Foto 3.3: Detalle de algunos de los materiales constituyentes en las EIRSU.



Tabla 3.19: Resultados de los materiales constituyentes en las muestras de EIRSU de Mataró y Tarragona.

Materiales componentes en las EIRSU	EM5-12	EM12-20	ET5-12	ET12-20
Vidrio	49	52	36	38
Mat. de neoformación	24	22	33	32
Cerámica	16	20	15	16
Metales	8	4	14	13
Materia orgánica y papel	3	2	2	1

Gráfico 3.9: Comparación entre los porcentajes de materiales constituyentes en las EM y ET.



En la tabla 3.19 y en el gráfico 3.9 se puede apreciar que las EM mantienen un sensible incremento en la cantidad de vidrio comparado con las ET. No obstante, en ambas muestras habrá que tener en cuenta la fracción de sílice que podría reaccionar con los álcalis del cemento en aplicación en hormigones. En cualquier caso los resultados mantienen una coherencia con los obtenidos en el análisis de la composición química, donde el Si es un tanto mayor en EM que en ET y el contenido de Fe es mayor en ET que en EM (la presencia de Fe en forma metalizada podría causar problemas de durabilidad al hormigón). En cuanto a la cantidad de cerámica, material de neoformación y cantidad de materia orgánica (incluido el papel), las dos EIRSU tienen porcentajes bastante similares.

A la hora de comparar las EIRSU del Informe V (2001) con las EIRSU de esta caracterización, se observa un pequeño cambio en los porcentajes. Sin embargo, no son muy importantes, tomado en cuenta que las EIRSU son materiales heterogéneos y variables.

Vidrio

Es el que mayormente se encuentra en todas las muestras, especialmente en las fracciones gruesas. Los vidrios poseen colores marrones y bordes redondeados, a causa de la temperatura de incineración, sin embargo, no llegan al punto de fusión. Una minoría de vidrios tienen fragmentos de otros materiales fundidos en sus paredes, al examinar el vidrio por separado se raya y quiebra con mucha facilidad.

Material de neoformación

Después del vidrio es el material que se encuentra en mayor porcentaje, y su franja más fuerte está entre las fracciones medias. Se pueden apreciar dos grupos:

- Se ha denominado a los materiales que resultan de la fusión entre: vidrio, metal, cerámica, y la asociación con otros materiales, que forman una masa porosa en forma de terrón semi redondeado.
- La otra se puede describir como un terrón poroso, más pequeño que el anterior, en el que no se pueden distinguir a simple vista los materiales que lo forman.

Restos de cerámica

Se encuentran en las fracciones más gruesas, aunque se puede ver en las finas restos de cerámicas y calizas, ladrillos, y rocas (en esta clasificación también se incluye los restos de rocas), pero en menor cantidad, caracterizándose por ser más angulosas. La mayoría provienen de materiales de construcción y demolición.

Metales

Por lo general conservan sus formas. Se pueden encontrar llaves, monedas, papel de aluminio y otros elementos más pequeños que se han unido, pero que aún conservan sus formas originales. Cabe recordar que en las dos plantas de incineración, se han instalado magnetizadores para captar el material férrico, por esta razón los metales de mayor tamaño son escasos en ambas muestras.

Materia orgánica y papel

Es muy escaso en todas las fracciones, sin embargo, se puede encontrar con residuos de cartón y telas especialmente en las fracciones del tamaño de las gravillas.

3.3.12 Ensayo del sulfato de magnesio.

La marcada diferencia de temperaturas, la humedad, los ciclos de hielo-deshielo, etc, pueden ocasionar cambios volumétricos en los áridos. Uno de los ensayos para cuantificar los efectos destructivos del aumento de volumen por efecto del agua en los poros al congelarse, se realiza por medio del ensayo de sulfato sódico o de magnesio.

El ensayo de sulfato de magnesio da información útil para atribuir el carácter de durabilidad de un árido frente a los ciclos de hielo-deshielo. Sin embargo, este ensayo es considerado exclusivamente como cualitativo. Se puede considerar que los áridos que lo cumplen no presentan problemas de inestabilidad, pero si un árido no lo cumple, no quiere decir que sea necesariamente rechazable.

El ensayo utilizado fue el descrito en la UNE 1367-2, que consistió en preparar una solución de sulfato de magnesio y la preparación de una muestra de árido de EIRSU según la granulometría determinada por la normativa. A continuación se sumergió el árido en la solución y después de un tiempo de inmersión de 16 a 18 horas se retiró y secó el material en estufa a 105 °C, la operación se repitió 5 veces, al cabo de lo cual se determinó la pérdida del material por un tamiz determinado.

Resultados del ensayo

Los resultados de pérdida de peso de las EM y ET de ambas fracciones, obtenidos mediante el ensayo de sulfato de magnesio, se presentan en la tabla 3.20.

Tabla 3.20: Resultados del ensayo de sulfato de magnesio.

EIRSU de Mataró		EIRSU de Tarragona		Límites de la EHE-98 (en áridos naturales para hormigones)
EM5-12	EM12-20	ET5-12	ET12-20	
10%	8%	8%	6%	Menor al 18% en gruesos

La tabla 3.20 indica los resultados obtenidos en las muestras de EM y ET de ambas fracciones, y se los ha comparado con los límites de la EHE-98 para áridos naturales en hormigones (pérdida de peso por efecto de la disolución, no mayor a 18% en áridos gruesos), ya que en este sentido el PG-3/2002 no establece ningún límite para áridos en HC y G-C. De los resultados se concluye que la utilización de las muestras de EM y ET en hormigones, no provocaran cambios volumétricos por efecto de los ciclos de hielo-deshielo que afecten irreversiblemente al hormigón.

3.4.- CONCLUSIONES DERIVADAS DEL ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE LAS EIRSU.

- 1) Del análisis realizado por el Informe V (2001), se descarta la posibilidad de utilizar EIRSU de la fracción menor a 5 mm, ya que la fracción fina de las muestras de EIRSU tienen excesivas cantidades de metales pesados. Por otro lado, se utiliza para la presente tesis EIRSU envejecidas por lo menos tres meses ya que esta etapa de maduración o envejecimiento provoca en las EIRSU una mejora en sus características (especialmente carbonatación e hidratación) que resultan positivas para el uso como materiales en la construcción. Además, el mismo informe recomienda utilizar EIRSU cuyo origen sea el de incineradoras provistas de plantas de tratamiento, que mejoren la calidad de las EIRSU. De esta forma, se ha seleccionado la fracción 5-20 mm de las plantas de Mataró y Tarragona como las más apropiadas para el estudio de caracterización como áridos para hormigón. No obstante, la fracción 5-20 mm se ha decidido fraccionar en dos franjas: 5-12 mm y 12-20 mm para obtener por separado las características de cada fracción, y facilitar el estudio de dosificación de los hormigones, posibilitando la variación de los porcentajes de participación en el hormigón, hasta encontrar la dosificación más apropiada.
- 2) Las muestras de EM y ET son de peso normal en todas las fracciones, ya que están dentro del rango de densidad de los áridos naturales de usados en hormigón (2,4 y 3 g/cm³). Sin embargo, al comparar las densidades de las EIRSU con los áridos naturales utilizados en el tramo experimental de carretera (subtramo de referencia realizado solo con áridos naturales en HC -capítulo 5-), donde se empleó calizas de machaqueo de la fracción 5-10

mm (G1-5/10) y 10-20 mm (G2-10/20) cuyas densidades son 2.69 y 2.72 g/cm³ respectivamente y arena de río con 2.60 g/cm³, se observa que las EIRSU mantiene unas densidades algo más bajas. Esto podría indicar que las EIRSU tienden a ser áridos sensiblemente más ligeros y por tanto en su interior existen huecos cerrados los cuales si bien aumentan el volumen, no elevan la masa y por lo tanto disminuyen la densidad.

En cuanto a las absorciones se observa que las EIRSU mantienen absorciones más altas en ambas fracciones, en comparación con los áridos naturales utilizados en el capítulo 5 (G1-5/10 y G2-10/20) con absorciones 0,99% y 0,98% respectivamente y arena de río con 2,01%, lo que concuerda con el resultado de las densidades propensas a disminuir, esto se atribuye al incremento de poros abiertos al exterior, pudiendo ocasionar expansiones en la aplicación con ligantes hidráulicos, y plantear algunas otras dificultades, ya que al absorber una excesiva cantidad de agua, podría disminuir la trabajabilidad, afectar la durabilidad del sistema ante fuerzas mecánicas y de meteorización. Ante esto, La normativa EHE (1998) estipula como límite de absorción valores menores al 5%. Las fracciones 5-12 mm de EIRSU tienen absorciones un tanto más altas al 5% (las fracciones 12-20 mm cumplen esta recomendación). Por lo tanto se realiza en el apartado 3.3.12 el ensayo del sulfato de magnesio.

La razón por la que las fracciones 5-12 mm tienen mayores absorciones que en las fracciones 12-20 mm, se puede atribuir a la mayor superficie específica que poseen las fracciones más finas, con lo cual las EIRSU tienden a aumentar su absorción en tanto se disminuye el tamaño de la partícula, coincidiendo también esta predisposición con los resultados de alta absorción (16%) de las fracciones menores a 5 mm (Informe V, 2001).

- 3) La granulometría de las EIRSU, está supeditada en gran medida por el acondicionamiento de la planta de tratamiento que poseen las plantas incineradoras, en especial la medida máxima de las partículas. No obstante, este valor puede variar, como es el caso de las muestras estudiadas, cuyas fracciones reales no corresponden a las nominaciones de 5-12, y 12-20 mm, sino a fracciones más finas tales como 4,5-10 y 10-16 mm respectivamente, esto se debió a que la manipulación y el lavado de las EIRSU desgastaron las partículas, degradándolas y fragmentándolas, en especial a aquellas cuyo origen fueron los vidrios y los materiales de construcción y demolición. Por otro lado, la disminución de los diámetros podría ser un defecto del sistema de cribado al que fueron sometidas las EIRSU en la misma planta. En todo caso este particular es común en las EIRSU de Cataluña (Izquierdo M., 2005) y por tanto se ha considerado conservar las nomenclaturas iniciales de las fracciones a lo largo de la presente tesis, pese a la casi nula presencia de las franjas

10-12,5 mm y 16-20 mm. En este sentido se cree que para obtener las franjas granulométricas deseadas, se puede añadir áridos naturales gruesos, que además de salvar los límites granulométricos exigidos por el PG-3/2003, también mejorarían la calidad del producto.

Otra característica derivada de la granulometría es el porcentaje de filler, que en las EIRSU 5-12 están alrededor del 5 al 7% y en 12-20 mm son de 1%, valores aceptables según la Pr-EN 13424. No obstante, estos valores son mayores que los áridos naturales (no sobrepasan el 5%), lo cual podría comprometer la aplicación de las EIRSU, dando problemas de durabilidad, ya que la muestra se vuelve susceptible a la presencia del agua.

- 4) Las muestras de EIRSU estudiadas tienen valores de índice de lajas semejantes o menores a 35, por lo que cumplen con las recomendaciones del PG-3/2002. Desde luego, también se podría modificar la composición de las EIRSU bajando los índices de lajas con la aplicación de las 3R (capítulo 2) o disminuir el índice de lajas de las muestras, al mezclarlo con áridos de origen natural cuyos valores sean menores a las determinadas en las EIRSU. Los resultados del índice de lajas permiten observar las diferencias morfológicas de las muestras, lo que se justifica a partir de la procedencia de las EIRSU y su correspondiente homogeneidad entre las EIRSU de una misma planta (Izquierdo M., 2005).
- 5) El coeficiente Los Ángeles para las EM y ET fluctúa entre 37 y 40, éste es un valor un tanto más alto que el límite de 35 según el PG-3/2002 (artículo 513 para tráfico pesado o medio y valor de referencia para árido natural), esto se debe al elevado contenido de vidrio en las fracciones gruesas. Sin embargo, el añadir árido natural, haría que baje este valor, pudiendo llegar a ser aceptable para la utilización en firmes, consideración que se debe tomar en cuenta para la fabricación de hormigones. Por otro lado, el valor del coeficiente Los Ángeles coincide también con el determinado para EIRSU todo uno del Informe V (2001), lo que indica que en general las EIRSU tienen este inconveniente común, el cual debe ser controlado en cada muestra.
- 6) El PG-3/2002 no exige ningún límite en cuanto al coeficiente de forma de los áridos para HC y G-C, por lo que se ha tomado como referencia la normativa EHE (1990), que señala que el coeficiente de forma del árido grueso determinado por la norma UNE 7-238 no debe ser menor a 0,15. En el caso de las muestras de EIRSU estudiadas, satisfacen este requerimiento al tener valores entre 0,2 para la gravilla y 0,3 para la grava, presentando entonces trabajabilidad y cierta garantía a la buena compactación.

- 7) Comparando los resultados de las EIRSU con los elementos mayoritarios y minoritarios encontrados en la bibliografía para las EIRSU todo uno, vemos que son semejantes. No obstante, los metales pesados más abundantes se encuentran en la fracción fina (misma que no ha sido considerada en este estudio) detectados en las EIRSU todo uno.

En cuanto a la comparación entre las fracciones estudiadas, se puede observar que conservan una cierta uniformidad en cuanto a la concentración de los elementos. Así por ejemplo, el elemento más abundante es el silicio -SiO₂-, con valores son muy cercanos en ambas muestras. Esto se debe a que las proporciones de vidrio doméstico están directamente relacionadas con la gestión de recogida y selección de este material, que al parecer es bastante similar en ambas plantas (en EM posiblemente hay una pequeña proporción mayor en contenido de vidrio que en ET). Lo mismo sucede con la cal CaO (9,35% - 10,14%), que es el segundo elemento con mayor presencia en las EIRSU.

El contenido de CaO para ambos residuos (EM y de ET) es similar, el calcio se encuentra más asociado a la matriz sílico-aluminosa (análisis de Difracción de rayos X – DRX-) y por tanto mucho menos disponible a la lixiviación, aunque influirá sobre la actividad del cemento. La presencia de altos contenidos de Ca modificaría la reactividad de las EIRSU, haciéndolas más reactivas tanto puzolánica como hidráulicamente (Mehta, 1983). El problema surge cuando las EIRSU con un elevado contenido de Ca y Al presentan cantidades significativas de C₃A, lo que puede ser altamente nocivo para un hormigón en caso de ataque por sulfatos (Mehta, 1983). Los siguientes elementos presentes en las EIRSU son el Al, Na, Fe, Mg y K que están en porcentajes semejantes a los materiales geológicos.

La cantidad de Fe indica un dato interesante de la valorización de las EIRSU. Los valores medios a nivel mundial están entre 1,3 y 25,8%. Las EIRSU bordean entre 2,94 y 3,98%. Estos valores reflejan que las EIRSU de ambas incineradoras fueron llevadas a plantas de tratamiento, donde existe una instalación de recuperación de hierro por magnetismo e incluso el uso de corrientes de Fucol. Así, existe menor presencia de aluminio. Otro factor que justifica estos valores, es la efectividad del reciclaje realizado en las zonas de Mataró y Tarragona.

Haciendo una evaluación de los resultados entre muestras y fracciones se puede apreciar que solo el Si, está presente en mayor porcentaje en la fracción 12-20 mm. Esto se debe a que esta fracción está compuestas mayoritariamente por vidrios de origen doméstico y alguna fracción de material cerámico, en tanto que en las fracciones de la

franja media predominan tanto los materiales cerámicos como también el vidrio. Esto se puede apreciar en la presencia predominante de Ca, en tanto que el resto de elementos presentan concentraciones más elevadas en la fracción 5-12 mm. Además, la misma tabla de resultados indica que el contenido de elementos en las muestras de EIRSU de Tarragona es sensiblemente mayor que las de Mataró.

De los resultados obtenidos se desprende que las EIRSU de las muestras de Mataró y Tarragona tienen una composición de elementos mayoritarios semejante a los materiales geológicos. En términos de óxidos el SiO_2 y el CaO suponen las fases principales de las muestras, seguidas por Na_2O , Al_2O_3 y Fe_2O_3 (naturalmente también interviene el O, formando parte de los óxidos de los elementos citados, otras formas de presentarse es en forma de silicatos, aluminatos, etc.). En cuanto a los elementos minoritarios como son los metales pesados Cr, Pb, Cu, Mg, Zn, y Cr son claramente superiores a los minerales de áridos naturales en especial el cobre y el Zinc que se presentan algo más altos en las muestras de EIRSU de ambas escorias.

Además, como se muestra en la tabla 3.18 y en el gráfico 3.4 los valores de los elementos de las EM y ET de ambas fracciones son menores a las otras plantas (excepto Goppingein), podría deberse a que las EIRSU de otras plantas incluyen los finos (con mayores contenidos de metales pesados) o que las plantas no tengan tratamientos de separación de metales. Los valores de Cr son semejantes, sin embargo en el plomo son más altos en ET, mientras que las de EM son bastante parecidas, caso contrario sucede con el Zn, estos cambios confirman una vez más que las EIRSU son materiales heterogéneos de compleja composición.

- 8) En cuanto a los sulfatos solubles en ácido, sulfatos solubles en agua y cantidades de azufre, todas las muestras de EIRSU estudiadas están dentro de los límites señalados. Sin embargo, los sulfatos solubles en ácido de las fracciones 5-12 de ambas EIRSU, están relativamente cerca del límite recomendado por el PG-3/2002, por lo que a la hora de seleccionar el tipo de cemento, para la fabricación de hormigones, se utilizará esta información para evitar las posibles expansiones del hormigón por ataque del SO_4^{2-} a la pasta y la formación de ettringita. En cuanto a los contenidos de sulfatos solubles en agua, cloruros y azufre de las EIRSU, se han comparado con los límites establecidos por la EHE (1990), ya que el PG-3/2002 no hace ninguna especificación en este sentido para áridos en HC y G-C, por lo que se creyó conveniente tener un valor referencial. Así, se determinó que si bien todos cumplen con los límites mencionados, el contenido de cloruros de las EIRSU es alto, lo que podría ser peligroso si se utilizarán las escorias en hormigón

armado. En lo referente al contenido de materia orgánica, las EIRSU estudiadas presentan valores inferiores a los límites de la Orden del Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña (del 15 de Febrero de 1996), en el que estipula como valor máximo el 5%, lo que indica que las EIRSU son aptas para su valorización. Además, este valor es un indicativo de la alta calidad de incineración de las dos plantas.

De los resultados obtenidos del análisis químico de las EIRSU, es necesario saber si estos compuestos están fijos o pueden causar problemas de solubilidad en el hormigón, por lo que posteriormente se hace un estudio de lixiviación.

- 9) En las difracciones de EM y ET se observa que la fase vítrea aumenta con la medida del grano, y que la presencia elevada de algunos materiales como el cuarzo influyen en los espectros, presentando picos muy altos que dificultan la identificación de los minerales que están en pequeñas proporciones e incluso llegan a disfrazarlos.

En ambas fracciones de las dos EIRSU, se puede distinguir albita, periclasa, hausmanita y magnetita, estos guardan correlación con los investigados en las EIRSU de la bibliografía. En todas las escorias se puede ver la presencia de calcita y cuarzo, esto coincide con las EIRSU de otras incineradoras, donde la fracción fina contiene más calcita (Vázquez, 2001), y a medida que aumenta el diámetro de las partículas, la calcita disminuye y el cuarzo aumenta, hasta convertirse en el mineral más importante. Siendo este el caso de las fracciones 12-20 mm, este mismo comportamiento también se puede apreciar en el análisis de FRX, donde la cantidad de sílice es mayor en la fracción más gruesa y disminuye en la fracción 5-12 mm. Caso contrario sucede con el contenido de Ca, ya que el calcio está relacionado con los áridos y el material cerámico y en las fracciones intermedias.

En cuanto al contenido de halita se manifiesta en las dos EIRSU, aunque no es debido al agua de apagado, puesto que se hace con agua dulce, sino más bien por la proximidad a la costa, lo que supone un aporte de NaCl mediante el aerosol marino (material particulado atmosférico), de ahí que en la FRX también se evidencia el Na, que en la DRX se encuentra asociado con el Cl. Por otro lado se evidencia la presencia de gehlenita en las EIRSU formando una matriz silicoaluminosa. Además, la gehlenita es un mineral que se ha encontrado en todas las muestras estudiadas de la bibliografía y pertenece al grupo de la melitita y akermanita.

El contenido de sulfatos como la basanita, no se evidencian en los difractogramas, sin embargo se cree que están presentes en las EIRSU, y son bastante bajos, puesto que las muestras fueron llevadas a secar en estufa, lo que pudo ocasionar que se descompusiesen.

El Fe se presenta en forma de magnetita, lo que constituye un resto de material magnético que ha quedado, posterior a la planta de tratamiento de EIRSU. No obstante, aunque los resultados de la FRX coincide con el análisis por DRX (contenido de elementos mayoritarios), este último indica que la cantidad de magnetita de EM es sensiblemente menor que en las de ET. Es importante tener en cuenta que el aluminio en forma elemental y en pequeñas acumulaciones en lugar de estar diseminado puede originar alteración por efectos de pH elevados y en presencia de agua.

Existen minerales que no han sido detectados en las EIRSU de ambas fracciones, a diferencia de las EIRSU todo uno analizadas en la bibliografía, lo que puede ser efecto del contenido de finos de estas, cuyos minerales son además: microcline y hematite.

En comparación con las EIRSU frescas de otros estudios, las EIRSU envejecidas tienen nuevas fases como por ejemplo yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). En muchos casos se cree que el yeso es la fase sulfatada característica de las escorias maduras y la anhidrita es el único sulfato de las EIRSU frescas. No obstante la anhidrita puede estar presente en algunas fases.

Es notable la ausencia de portlandita. Esto se debe a que todas las EIRSU han tenido un proceso de maduración, tiempo en el cual la portlandita reaccionó con el CO_2 atmosférico o con los sulfatos para dar lugar a otros compuestos como la calcita y ettringita respectivamente (Stampfli, 1992). Además, las reacciones de la portlandita están implicadas en los procesos de carbonatación formando yeso y larnita (Izquierdo, M., 2005).

Las gráficas de DRX muestran también cantidades considerables de calcita, esta es otra de las características de las EIRSU envejecidas. Por otro lado hay ciertas fases que con el envejecimiento tienden a desaparecer, pero las variaciones de la mineralogía no son substanciales porque se trata de fases secundarias en los residuos. Algunas de ellas son: la cromita (FeCr_2O_4) y el diópsido ($\text{Ca}(\text{NgFe})\text{Si}_2\text{O}_6$).

- 10) En cuanto a los materiales que forman las EIRSU, se puede apreciar que el vidrio es el material predominante en todas las muestras, especialmente en las fracciones gruesas.

Después del vidrio está el material de neoformación que se encuentra especialmente entre las fracciones medias. Luego están los metales, que por lo general conservan sus formas originales tales como llaves, monedas, papel de aluminio y otros elementos más pequeños que se han fundido. Cabe recordar que en las dos plantas de incineración, se han instalado magnetizadores para captar el material férrico, por esta razón los metales de mayor tamaño son escasos en ambas muestras. Por último está casi imperceptible el material orgánico y el papel, que es muy escaso en todas las fracciones, sin embargo, se pudo encontrar pequeños residuos de cartón y telas especialmente en las fracciones del tamaño de las gravillas.

Las EM mantienen un sensible incremento en la cantidad de vidrio comparado con las ET. No obstante, en ambas muestras habrá que tomar en cuenta la fracción de sílice que podría reaccionar con los álcalis del cemento para una aplicación en hormigones. En cualquier caso los resultados mantiene una coherencia con los obtenidos en el análisis de la composición química, donde el Si es un tanto mayor en EM que en ET y el contenido de Fe es mayor en ET que en EM (la presencia de Fe en forma metalizada podría causar problemas de durabilidad al hormigón). En cuanto a la cantidad de cerámica, material de neoformación y cantidad de materia orgánica (incluido el papel), las dos EIRSU tiene porcentajes bastante similares.

A la hora de comparar las EIRSU del Informe V (2001) con las EIRSU de esta caracterización, se observa un pequeño cambio en los porcentajes. Sin embargo, no son muy importantes, teniendo en cuenta que las EIRSU son materiales heterogéneos y variables.

- 11) Los límites establecidos por la EHE-98 (a falta de límites establecidos por el PG-3/2002 para áridos en HC y G-C) para el ensayo de sulfato de magnesio en áridos gruesos, estipulan que el máximo porcentaje de pérdida de peso por efecto de la disolución, es del 18%, en tanto que los resultados obtenidos en las EIRSU son significativamente menores, por lo que se concluye que la utilización de las muestras de EM y ET en hormigones, no provocaría cambios volumétricos por efecto de los ciclos de hielo-deshielo que afecten irreversiblemente al hormigón.
- 12) Al comparar los resultados de los ensayos de caracterización realizados por duplicado, se encontraron diferencias considerables, lo que obligó a repetir los ensayos en varias ocasiones, hasta obtener resultados coherentes entre sí. Esto se debe a la gran heterogeneidad que hace de las EIRSU un residuo tan peculiar y que requiere un análisis

exhaustivo cada muestra a utilizar. En general los resultados de caracterización de las muestras de EM5-12, EM12-20, ET5-12 y ET12-20, son semejantes a los áridos de origen natural, excepto en el coeficiente Los Ángeles y el índice de lajas, así como algunas características que si bien cumplen con los límites establecidos, están muy cerca de sobrepasarlos, por lo que se considera necesario tomar en cuenta todas las conclusiones mencionadas, para aprovechar las EIRSU en mezclas con áridos naturales, para la fabricación de hormigón compactado y grava-cemento.

- 13) Tanto las EM como las ET provienen de instalaciones dotadas de plantas de tratamiento, las cuales transformando las EIRSU en ESCOGRAVA, para ampliar lo máximo posible las aplicaciones potenciales de las EIRSU, mediante la mejora sus propiedades al bajar los niveles de contaminación frente a los lixiviados, cuyo control está fijado mediante la orden del 15 de Febrero de 1996 sobre valorización (Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Catalunya). Lo que coincide de manera general en la similitud de los resultados finales de la caracterización de las muestras de EM y ET, garantizando que ambas presenten condiciones favorables para la aplicación en un tramo experimental de carretera. Sin embargo, se seleccionó solamente a las EM para el estudio de HC y G-C y posteriormente para la aplicación a escala real (tramo experimental de carretera). Para la selección de las EM se tuvo en consideración dos factores relevantes:

a) La ubicación del tramo experimental de carretera con respecto a cada una de las plantas de tratamiento: El tramo experimental de carretera se ubica en Torretes del Fòllo, situado en el municipio de Tagamanent, en el Vallès Oriental, cuya distancia a Mataró es algo más corta que a Tarragona.

b) La disposición de maquinaria de cribado el momento del estudio: Cuando se realizó el estudio de las EIRSU para hormigones, la planta de tratamiento de Tarragona estaba en proceso de instalación, en tanto que la de Mataró venía funcionando con anterioridad, lo cual garantizaba el almacenamiento y acopio suficiente de ESCOGRAVA de Mataró (con 3 meses de envejecimiento). Por otro lado, se evaluó la reducción de costes al utilizar la maquinaria de cribado de la misma planta de tratamiento de Mataró que cuenta con criba móvil, necesaria para obtener los tamaños necesarios de áridos para el tramo experimental de carretera.

En consecuencia se decidió realizar un estudio de hormigones fabricados con las EM en capítulo 4 (EM5-12 y EM12-20) y la aplicación en un tramo experimental de carretera en el capítulo 5.

CAPÍTULO 4

4.- ESTUDIO DE LAS EIRSU EN HORMIGÓN COMPACTADO Y GRAVA-CEMENTO.

4.1.-INTRODUCCIÓN.

En el capítulo 3 se realizó la caracterización de las EIRSU como áridos para hormigón compactado y grava-cemento, y se escogió a las EIRSU de la planta de Mataró (fracción 5-12; 12-20) como el árido artificial con mejores características para la fabricación y aplicación real en capas de firmes rígidos. En el presente capítulo se realiza el estudio de los hormigones compactados y la grava-cemento, fabricados con diferentes porcentajes de áridos de EIRSU y áridos finos de origen natural, con el objetivo de conocer las posibles aplicaciones de las EIRSU de la fracción 5-20 mm (más arena natural) en capas de firmes rígidos.

Por esta razón se inició el estudio identificando los diferentes áridos que participan en la fabricación de las matrices mencionadas y el tipo de cemento empleado, los mismos que fueron mezclados hasta encontrar las dosificaciones más apropiadas en términos de resistencia y durabilidad. A continuación se compararon las recomendaciones del Pliego de Prescripciones técnicas generales (PG-3/2002) y del Instituto del Cemento y sus Aplicaciones (IECA, 1996 y 2003) referente a áridos para G-C y HC, con las características de los áridos utilizados en el presente capítulo.

Para realizar la dosificación se escogió el método más apropiado, haciendo un estudio teórico que concluyó en diagramas de dosificación y una etapa experimental para determinar la humedad óptima y densidad máxima de cada una de las mezclas. A continuación se

seleccionaron las proporciones de materiales que más se ajustaron a las recomendaciones del PG-3/2002, artículo 513 de G-C y 516 de HC y se procedió a la fabricación de las probetas, que posteriormente se ensayaron a compresión simple y tracción indirecta. Los resultados observados fueron en su mayoría semejantes a los recomendados por el PG-3/2002. A continuación se realizó el estudio de durabilidad ante el posible ataque de los álcalis del cemento con los áridos de las EIRSU, utilizando el método acelerado.

Paralelamente a las investigaciones llevadas a cabo en el presente capítulo, se ha realizado estudios de impacto ambiental, que se indican en el capítulo 6. Estos estudios se basan en el análisis de lixiviados de las EIRSU sueltas (sin cemento) y EIRSU en mezclas con árido fino en matrices compactas de HC y G-C.

4.2.- ESPECIFICACIONES SOBRE EL CEMENTO Y LOS ÁRIDOS UTILIZADOS EN G-C y HC.

4.2.1 Especificaciones del cemento utilizado.

El PG-3/2002 recomienda la utilización de cementos Pórtland con adiciones (tipo II), de alto horno tipo (III), puzolánicos (tipo IV) o mixtos (tipo V) para diferentes aplicaciones de firmes. El IECA (1996) para HC, recomienda utilizar cementos con un alto contenido de adiciones activas. En la presente tesis, para la fabricación de G-C y HC se ha utilizado cemento tipo I, resistente a sulfatos (SR), ya que como se concluyó en el capítulo 3, este tipo de cemento podría limitar la acción expansiva de los sulfatos que poseen las EIRSU. En la tabla 4.1 se indica las características del cemento.

Tabla 4.1: Características del tipo de cemento utilizado en la fabricación del HC y G-C.

Cemento I - 52,5 SR (marca Súper Dragón)	
C ₃ S = 52,76%	Agua de masado = 143 g
C ₂ S = 18,52%	Penetración aguja = 28 mm
C ₃ A = 12,55%	Expansión agujas = 0 mm
C ₄ AF = 13,84%	Fraguado : Inicio = 45 min
Pérdida por calcinación = 1,54%	Fin = 120 min
Na ₂ O equiv. = 0,61%	Res. Flexotracción: $f_{c7} = 6,5 - 7,5$ MPa
SO ₃ = 3,34%	$F_{c28} = 7,3 - 8,3$ MPa
Densidad = 3,189kg/m ³	Res. Compresión: $f_{c7} = 44 - 22$ MPa
Blaine = 3.200 cm ² /g	$F_{c28} = 48 - 60$ MPa

El Cemento SUPER-DRAGÓN, fabricado por Cementos Molins Industrial, S.A., es un cemento Pórtland tipo I, de categoría resistente alta 52,5 S, diseñado especialmente para cubrir las necesidades de los sectores del hormigón y para la industria de prefabricados en las gamas de resistencias altas y resistente a sulfatos (Cementos Molins Industrial S.A., 2000).

4.2.2 Especificaciones sobre los áridos utilizados.

Para la fabricación de G-C y HC, se utilizaron mezclas de árido fino de origen natural y áridos gruesos artificiales de las EIRSU de la planta de incineración de RSU de Mataró (EM), y la fracción de EIRSU escogida es la 5-20 mm, dividida en dos fracciones: 5-12 mm y 12-20 mm; estas fracciones de EIRSU fueron seleccionadas en base a las conclusiones del capítulo 3 y caracterizadas en el mismo capítulo. A continuación se indica la nomenclatura de los áridos mencionados.

Arena: Se utilizó arena de río, en la fracción 0-5 mm, ya que la fracción fina de EIRSU fue descartada desde el inicio de esta tesis, basándonos en el análisis realizado por el Informe V (2001). La nomenclatura utilizada es:

AN1-0/5

Gravilla y grava: Se utilizaron como áridos artificiales las muestras de EM, que por medio de las cribas se obtuvieron en dos fracciones (5-12 mm y 12-20 mm), con tamaño máximo de 20 mm y mínimo de 5 mm, se conserva la misma nomenclatura adoptada en el capítulo 3:

EM5-12

EM12-20

4.3.- RECOMENDACIONES SOBRE G-C Y HC DEL PG-3/2002 Y DEL IECA.

4.3.1 Grava-cemento (G-C).

Se denomina G-C a la mezcla homogénea de áridos, cemento, agua y eventualmente adiciones que convenientemente compactadas se utilizan en la construcción de firmes de carretera (PG-3/2002). La G-C permite conformar bases más resistentes que las capas granuladas y por lo tanto, puede ser diseñada para ciertos tipos de tráfico.

Los materiales a utilizar para G-C según el PG-3/2002, han de ser áridos naturales (procedentes de la trituración de piedra cantera o grava natural), limpios, sólidos, exentos de

polvo, arcilla o de otros materiales extraños. En este sentido, las EM no cumplen el primer requerimiento mencionado, al ser áridos artificiales. No obstante, obedecen los requisitos de limpieza y ausencia de arcilla, ya que se han producido a partir de un ciclo de altas temperaturas y la posterior separación de finos.

Las granulometrías de los áridos combinados han de estar dentro de los husos recomendados en el PG-3/2002, donde el huso GC2 sólo se empleará en la construcción de capas de subbase o arcenes y capas base para tráfico ligero. En el caso de las EM (como se verá más adelante), la curva que más se ajustó a los límites recomendados por el pliego fue la GC1 aplicable en el resto de casos.

Según el PG-3/2002, para tráfico pesado o medio, los áridos han de tener por lo menos el 50% en peso de la fracción retenida por el tamiz 5 UNE de elementos machacados que presenten dos o más caras de fractura. En el caso de las EIRSU, no se evaluaron las caras de fractura bajo la misma metodología que para áridos naturales. No obstante, en el capítulo 3 se determinó la posible carencia de caras de fractura en la fracción EM12-20, mostrando una mejoría de la geometría de los áridos en la EM5-12. Con lo cual se concluyó que la fracción 12-20 no cumple con lo exigido en el pliego, en tanto que la fracción 5-12 mm sí está dentro de este rango.

El coeficiente de desgaste Los Ángeles según el PG-3/2002 debe ser menor a 30 para bases de tráfico pesado o medio y menores a 35 para los restantes casos, en tanto que el IECA (2003) acepta valores de 40 para capas de tráfico ligero. Las EM analizadas en el capítulo 3 tienen coeficientes de desgaste Los Ángeles de 39 y 40, con lo cual, si bien no cumplen con lo exigido por el pliego, si están dentro de las recomendaciones del IECA (2003).

Según el PG-3/2002 los áridos para capas de base con tráfico pesado o medio han de ser no plásticos, en el resto de casos, el límite líquido será inferior a 25. Además, el equivalente de arena será superior a 30. En este sentido, las muestras de EM estudiadas son de la fracción 5-20 mm, no plásticas, y el equivalente de arena se determinó sobre la arena de origen natural de la fracción 0-5 mm (AN1-0/5) que se utilizaron en este capítulo, cuyo equivalente de arena cumple con lo estipulado en el PG-3/2002. En la tabla 4.2 muestra el grado de adecuación de los áridos a las recomendaciones del pliego para la fabricación de G-C.

Tabla 4.2: RECOMENDACIONES DEL PG-3/2002, Artículo 513 y IECA (2003), PARA ÁRIDOS EN G-C. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS EM Y ARENA NATURAL (AN1-0/5).

Ensayo	Recomendaciones del PG-3/2002 para áridos en G-C	Resultados	Cumplen
Contenido de materiales perjudiciales.	- No se usarán materiales con proporción de materia orgánica, expresada en ácido tánico, superior al 0,05%.	Las EM provienen de incineración a 850 °C, lo que garantiza mayor ausencia de materia orgánica y arcillas.	SÍ
	- La proporción de sulfatos, expresada en SO ₃ , será inferior al 0,5%.	EM 5-12 EM12-20	NO SÍ
Granulometría.	- Las curvas granulométricas de los áridos combinados han de encajar dentro de los husos GC1 o GC2 (GC2 sólo se empelará en capas de subbases o arcenes y capas base para tráfico ligero).	Curva granulométrica cercana al huso GC1. (apartado 4.4.1)	No
Caras de fractura. (CFr)	- CFr: Se acepta áridos más del 50% en peso del retenido por el tamiz 5 UNE con 2 o más caras de fractura.	CFr en E5-12 CFr en E12-20	SÍ NO
*Índice de lajas. (IL)	- El IL para áridos a utilizar en grava - cemento para una base de tráfico pesado o mediano habrá de ser inferior a 30 y 35 en calzada y 40 para arcenes.	EM5-12: 32 EM12-20: 36	SÍ Semejante
**Coeficiente Los Ángeles.	- El coeficiente de desgaste Los Ángeles será inferior a 30 para bases de tráfico pesado o medio e inferior a 35 en el resto de casos.	EM: 39 – 40	NO
Plasticidad.	- Los áridos para capas de base con tráfico pesado o medio han de ser no plásticos. - En los otros casos la fracción que pasa el tamiz de luz 0,4 mm tendrá límite líquido inferior a 25 e índice de plasticidad inferior a 6.	EM: No plástica. AN1-0/5: No plástica.	SÍ SÍ
Equivalente de arena.	- El equivalente en arena (EA) deberá ser superior a 30.	AN1-0/5: EA=75	SÍ

*El Índice de lajas según el IECA (2003) recomienda 30-40 para evitar la rotura del árido durante la compactación. En el caso de las EIRSU con IL de 32 y 36 están dentro de esta recomendación.

** Según el IECA (2003) el coeficiente Los Ángeles puede ser hasta de 40 para bases de tráfico ligero, para evitar degradación y mejora del engranaje en juntas y grietas.

En el caso de las EIRSU con coeficiente Los Ángeles de 39 y 40 están dentro de esta recomendación.

4.3.2 Hormigón compactado.

Definición de HC.

El hormigón compactado resulta de la mezcla de áridos más cemento, adiciones (si es el caso), y agua, cuya relación agua-cemento es baja, semejante a la de una G-C, aunque el contenido de cemento que posee y las resistencias que alcanza el HC se asemeja más a un hormigón vibrado.

Características principales de los áridos para un HC.

Los áridos para HC deben cumplir con las recomendaciones del PG-3/2002, artículo 513 para grava-cemento para tráfico pasado, cuyo análisis para el caso de los áridos de EM se realizó en el apartado anterior y se añade en la tabla 4.3 de recomendaciones de los áridos para HC. Además se indica una serie de recomendaciones adicionales del PG-3/2002 y del IECA (2003).

El PG-3/2002 recomienda que la curva granulométrica de la mezcla ha de estar dentro de los husos incluidos en el artículo 516 de HC, y extrapolable a vías de baja intensidad de tráfico. Además, señala que se han de limitar el total de finos, que son los que podrían crear problemas de compactación. En el caso de las EM (como se verá más adelante), la curva que más se ajustó a los límites recomendados por el pliego fue la HC(20) (capa de 20 cm).

Para una mejor trabajabilidad de la mezcla el IECA (2002) recomienda el uso de áridos menores a 20 mm, utilizándose dos o tres tamaños de árido (0-5 mm, y 12-20 mm), en el caso de las EM las fracciones cumplen este particular por ser fracciones menores a 20 mm, divididas en 5-12 mm y 12-20 mm además la fracción fina 0-5 mm es de origen natural.

El índice CBR debería ser superior a 65 para lograr una capacidad portante inmediata. Para lograr esta característica el IECA (2003) recomienda que los áridos sean de origen generalmente silíceos y calizos, mayormente de machaqueo y con un mínimo de dos caras de fractura (normalmente 1/3 de machaqueo y 2/3 de cantos rodados). Esto permite que el esqueleto mineral tenga alta capacidad portante, capaz de soportar el tráfico una vez terminado el curado y protección. La determinación del índice CBR, fue realizado para EIRSU todo uno de Mataró cuyos resultados satisfacen las recomendaciones del pliego. Los resultados se presentan en las tablas 4.2 y 4.3.

Tabla 4.3: RECOMENDACIONES DEL PG-3/2002, Artículo 516 y IECA (2003), PARA ÁRIDOS EN HC Y RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS EM y AN1/0-5

Ensayo	Recomendaciones del PG-3/2002 para áridos en HC	Resultados	Cumplen
Contenido de materiales perjudiciales	- No se usarán materiales con proporción de materia orgánica, expresada en ácido tánico, superior al 0,05%.	Las EM provienen de incineración a 850 °C, lo que garantiza mayor ausencia de materia orgánica	SÍ
	- La proporción de sulfatos, expresada en SO ₃ , será inferior al 0,5%.	EM 5-12 EM12-20	NO SÍ
Granulometría	- La granulometría de los áridos combinados deberá ser continua junto con la del conglomerante y en la proporción establecida, debiendo quedar incluida dentro de uno de los husos HC(16) y HC (20), artículo 516 para HC del PG-3/2002.	Curva granulométrica: cercana al huso HC(20) (apartado 4.4.4)	NO
	- El árido deberá ser suministrado en al menos dos tamaños, separados aproximadamente, por el tamiz 5 UNE	EM5-12 mm EM12-20 mm AN1-0/5	SÍ
Caras de fractura (CFr)	- CFr: Se acepta áridos con más del 50% en peso del retenido por el tamiz 5 UNE con 2 o más caras de fractura.	CFr en E5-12 CFr en E12-20	SÍ NO
*Índice de lajas (IL)	- El IL para áridos a utilizar en HC para una base de tráfico pesado o mediano habrá de ser inferior a 30 y 35 en calzada y 40 para arcenes.	E5-12: 32 E12-20: 36	SÍ Semejante
** Coeficiente Los Ángeles	- El coeficiente de desgaste Los Ángeles será inferior a 30 para bases de tráfico pesado o medio.	EM: 39 – 40	NO
Plasticidad	- Los áridos para capas de base con tráfico pesado o medio han de ser no plásticos.	EM: No plástica AN1-0/5: No plástica	SÍ SÍ
Equivalente de arena	- El equivalente en arena (EA) deberá ser superior a 30.	AN1-0/5: EA=75	SÍ

*El Índice de lajas según el IECA (2003) recomienda 30-40 para evitar la rotura del árido durante la compactación. En el caso de las EIRSU con IL de 32 y 36 están dentro de esta recomendación.

** Según el IECA (2003) el coeficiente Los Ángeles puede ser hasta de 40 para bases de tráfico ligero, para evitar degradación y mejora del engranaje en juntas y grietas. En el caso de las EIRSU con coeficiente Los Ángeles de 39 y 40 están dentro de esta recomendación.

4.4 DOSIFICACIONES PARA G-C Y HC SEGÚN PG-3/2002 Y EL IECA (2003).

4.4.1 Método de dosificación.

Se denomina dosificación al proceso mediante el cual se llega a determinar las proporciones óptimas de los componentes, para que el HC y la G-C cumplan con las características deseadas, tanto en estado fresco como en estado endurecido. Cualquiera que sea el método de dosificación elegido, hay que tener muy presente que la cantidad de agua de amasado, influye directamente sobre las resistencias mecánicas, la consistencia, trabajabilidad, estabilidad de volumen y durabilidad (Kraemer, 1999).

No obstante, la característica más importante de la G-C y HC es su bajo contenido de agua en la mezcla (de 4,5 a 6% de humedad), cercano al obtenido con el ensayo proctor modificado, lo suficientemente bajo como para conseguir resistencias elevadas que permitan perfectamente soportar cargas de los equipos de consolidación, pero no tan bajas como para impedir que la pasta se distribuya entre los áridos durante el proceso de amasado y compactación. Según el IECA (2003) los contenidos de humedad varían entre el 4,5% y el 6,3% siendo el más utilizado el 5,5%, en todos los casos la G-C y HC poseen baja retracción hidráulica, ya que su relación agua-cemento ha de estar entre 0,35 y 0,45. En el caso de la G-C y HC con EM se realizó previa dosificación, la determinación de la relación entre humedad y densidad, según la normativa NLT 108/91 del ensayo proctor modificado (cuyos resultados se indican en el apartado 4.4.5). En este sentido el PG-3/2002 recomienda elegir las dosificaciones de mayor compacidad y menor sensibilidad a las variaciones de humedad.

El PG-3/2002 recomienda utilizar áridos en dos o tres tamaños (0-5 mm y 5-20 mm), generalmente con granulometría continua y conjuntamente con el conglomerante, en porcentajes tales que la curva granulométrica encaje dentro de los husos recomendados por el mismo pliego. Existen casos en que ciertas granulometrías no suelen estar dentro del huso, pero es posible utilizarla en la obra (IECA, 2003). Para el caso la G-C y HC con EM los husos se incluyen en las tablas 4.5 y 4.6 respectivamente. En la tabla 4.4 se hace referencia a las recomendaciones del IECA (2003) para con los porcentajes de participación de los áridos en HC.

Tabla 4.4: Dosificaciones de los áridos para HC. Fuente: IECA (2003).

Tamaño máximo (mm)	Dosificación (% en peso)
0/5	35%
5/20	52%

4.4.2 Recomendaciones del PG-3/2002, artículo 313 para G-C y del IECA (2003).

El cemento:

- El contenido máximo de cemento en peso con respecto al total de los áridos según el PG-3/2002, será del 4,5% para capas base de tráfico pesado o medio y del 4% en los restantes casos.

Según IECA (2003) el porcentaje de cemento (C) debe estar entre el 3,5% y 5%.

La resistencia:

- Según el PG-3/2002, la resistencia a compresión simple (en probetas proctor modificado) a 7 días debe ser mayor a 3,5 MPa, para capas base de tráfico pesado o medio y de 3,0 MPa para el resto de casos. Además, el IECA (2003) recomienda lo siguiente:

- La resistencia a compresión simple a 7 días (R_{comp7d}) debe ser mayor a 4,5 MPa y no mayor a 8 MPa. En el caso de determinar la compresión a 28 y 90 días se debe tener en cuenta que la resistencia guarda una relación lineal con el logaritmo del tiempo. Así pues, para mezclas con porcentajes de cemento semejantes a 80 kg/m^3 , la resistencia a compresión simple a 28 días debe ser del orden de 5 a 6 MPa y a 90 días de 6,5 a 8,5 MPa.

La granulometría:

- El PG-3/2002 recomienda utilizar una curva que encaje dentro de los husos especificados en la tabla 4.5 para G-C.

Tabla 4.5: Husos granulométricos para la G-C según las especificaciones del PG-3/2002.

Tamices UNE (mm)	Cernido ponderal acumulado (%)	
	GC1 (tráfico pesado o medio)	GC2
40		100
25	100	75 - 100
20	75 - 100	65 - 90
10	50 - 80	40 - 70
5	35 - 60	30 - 55
2	25 - 45	22 - 42
0,40	10 - 24	10 - 22
0,080	1 - 8	1 - 8

4.4.3 Recomendaciones PG-3/2002, artículo 316 y del IECA (2003) para HC.

El cemento:

- El PG-3/2002 recomienda un porcentaje de cemento (C) no menor al 10% del peso total de los áridos secos, según el IECA (2003) la dosificación del cemento ha de estar entre el 10-14% (normalmente del orden de 230 a 320 kg/m³).

La resistencia:

- La Resistencia a tracción indirecta a los 28 días ($R_{TI\ 28d}$) Sobre probetas compactadas con humedad óptima correspondiente al ensayo proctor modificado debe ser mayor a 3,3 MPa.

$$(R_{TI\ 28d} > 3,3\ \text{MPa}).$$

- En caso de vías de baja intensidad de tráfico la resistencia característica a tracción indirecta exigida se puede reducir a 2,8 MPa (IECA, 2003) y la resistencia a compresión debe ser superior a 35 MPa a 28 días (IECA, 2003).

$$(R_{TI\ 28d} > 2,8\ \text{MPa}).$$

$$(R_{Comp28d} > 35\ \text{MPa}).$$

La granulometría:

- La granulometría deberá ser continua y junto con el conglomerante en la proporción establecida, debiendo quedar incluida dentro de uno de los husos para hormigón compactado HC (16) y HC (20) del PG-3/2002, que se indican en la tabla 4.6.

Tabla 4.6: Husos granulométricos especificados para el HC del PG-3/2002 extrapolables en vías de baja intensidad de tráfico.

Tamices UNE (mm)	Cernido ponderal acumulado (%)	
	HC(16)	HC(20)
25	-	100
20	100	85 – 100
16	88 – 100	75 – 100
10	70 – 87	60 – 83
5	50 – 70	42 – 63
2	35 – 70	30 – 47
400 µm	18 – 30	16 – 27
80 µm	10 – 20	9 – 19

4.4.4 Estudio teórico.

Se realizaron varias tentativas (8 ajustes) de curvas granulométricas para HC con EM, (que desde este momento se llamará HCEM) y para G-C con EM (que de aquí en adelante se denominará G-CEM), hasta determinar el porcentaje de cemento más adecuado y que además cumpliera con las recomendaciones del PG-3/2002, llegando a determinar el 14% para HCEM y el 4% para G-CEM. Una vez determinados estos porcentajes de cemento, se variaron los porcentajes de áridos de forma que las curvas del conjunto sean las más próximas a los husos recomendados por el PG-3/2002. Dicho procedimiento se realizó de forma separada para el HCEM (tabla 4.7) y la G-CEM (tabla 4.8).

Tabla 4.7: Dosificación del HCEM con 14% de cemento (HCEM14).

Tanteo N° 8: (CEMENTO =14%; EM12-20 = 38%; EM5-12 = 16%; AN1-0/5 = 32%)

Tamiz (mm)	AN1-0/5	EM	EM	Cemento C	PG-3/2002: HC		Cemento 14%	EM12-20 38%	EM5-12 16%	AN1-0/5 32%	HCEM14
	0-5	5-12	12-20		Lim. Sup.	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	85	14	38	16	32	100
16	100	100	95	100	100	75	14	36	16	32	98
12,5	100	100	64	100	89	65	14	24	16	32	86
10	100	92	28	100	83	60	14	10	15	32	71
5	98	29	6	100	63	42	14	2	5	31	52
2	65	15	4	100	47	30	14	2	2	21	39
0,5	26	11	3	100	27	16	14	1	2	8	25
0,06	3	7	1	100	19	9	14	0	1	1	17

Tabla 4.8: Dosificación de la G-CEM con el 4% de cemento (G-CEM4).

Tanteo N°8: (CEMENTO = 4%; EM12-20 = 40%; EM5-12 = 15%; AN1-0/5 = 41%)

Tamiz (mm)	AN1-0/5	EM	EM	Cemento C	PG-3/2002: G-C		Cemento 4%	EM12-20 40%	EM5-12 15%	AN1-0/5 41%	G-CEM4
	0-5	5-12	12-20		Lim.Sup.	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	40	15	41	100
16	100	100	95	100	92	65	4	38	15	41	98
12,5	100	100	64	100	86	55	4	25	15	41	85
10	100	92	28	100	80	50	4	11	14	41	70
5	98	29	6	100	60	35	4	2	4	40	51
2	65	15	4	100	45	25	4	2	2	27	35
0,5	26	11	3	100	24	10	4	1	2	11	18
0,06	3	7	1	100	8	1	4	0	1	1	7

En las tablas 4.7 y 4.8 se indica en la primera columna la abertura de los tamices utilizados, en las siguientes cuatro columnas están los porcentajes de áridos que pasan por dichos tamices, incluido el cemento. En las columnas PG-3/2002 se encuentran los límites recomendados por el pliego tanto para HC como para G-C. Con estos datos se realizaron una serie de tanteos (8 ajustes), variando el porcentaje de participación de los áridos, hasta llegar a

los porcentajes indicados en cada sistema, de tal manera que se creó una dosificación en la columna final de cada tabla. En los gráficos 4.1 y 4.2, se indican las curvas granulométricas del HCEM y la G-CEM respectivamente. A continuación se adopta la siguiente nomenclatura: HCEM14 se trata de un hormigón con un contenido de cemento del 14%, de igual forma en la G-CEM, G-CEM4 se refiere a la participación del cemento en el porcentaje indicado en el número que acompaña al G-CEM, en este caso es 4%.

Gráfico 4.1: Granulometría para la dosificación del HCEM14.

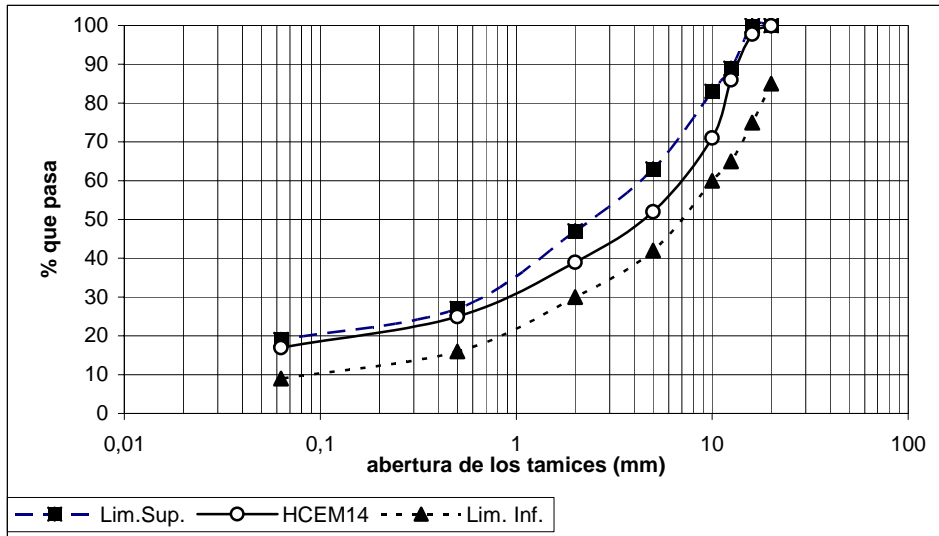
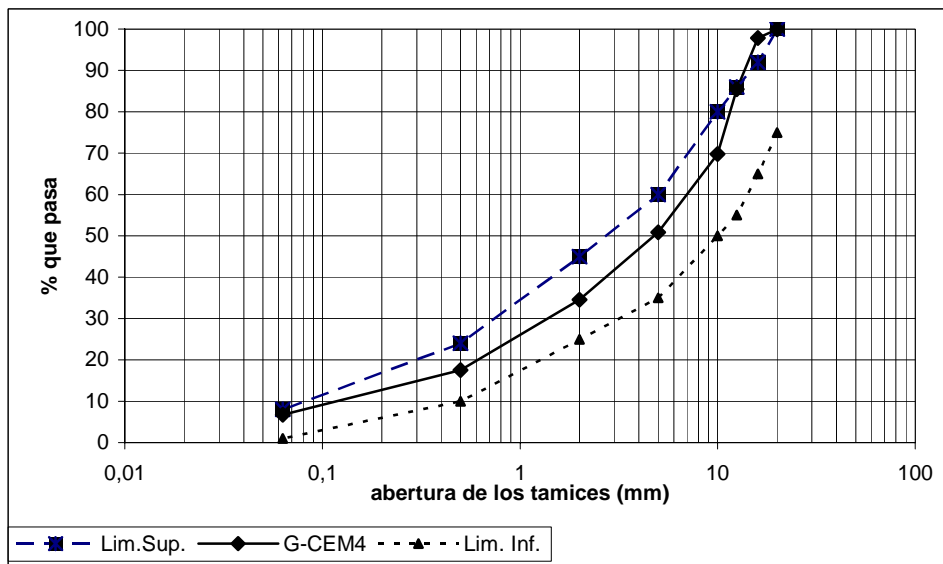


Gráfico 4.2: Granulometría para la dosificación de la G-CEM4.



En el anexo A.2.1 se añaden los diferentes ajustes y sus correspondientes curvas de dosificación para el HCEM y en el anexo A.2.2 los diferentes tanteos y sus correspondientes curvas de dosificación para la G-CEM, que se realizaron antes de llegar a las curvas de dosificaciones que se indican en los gráficos 4.1 y 4.2. No obstante, se observa que tanto en el

HCEM14 y la G-CEM4 hay carencia de la fracción 16-20, ya que la granulometría de partida de los áridos evidencia una falta de granos pertenecientes a esta franja.

A continuación se indican las dosificaciones determinadas mediante los ajustes de las curvas granulométricas indicadas en los gráficos 4.1 y 4.2 para el HC y la G-C con EIRSU y arena natural AN1-0/5.

Para el HCEM14.

Cemento (C): 14%

AN1-0/5: 32%

EM5-12: 16%

EM12-20: 38%

Para la G-CEM4.

Cemento (C): 4%

AN1-0/5: 41%

EM5-12: 15%

EM12-20: 40%

La cantidad de agua que interviene en este tipo de hormigones, se determinó mediante el ensayo proctor modificado, que se hace referencia en el apartado del estudio experimental.

4.4.5 Estudio experimental.

Con el objetivo de encontrar la cantidad de agua necesaria para el HCEM14 y G-CEM4, se realizó para cada caso el ensayo proctor modificado, siguiendo la norma NLT-108/91 que determina la densidad seca de varias probetas, compactadas en idénticas condiciones, pero con contenidos de humedad diferentes. Para cada contenido de humedad se alcanzó una determinada densidad, de manera que estos pares de valores, representados en unos ejes cartesianos, definen un máximo, que es la relación buscada de densidad seca máxima y su correspondiente humedad, llamada humedad óptima. En la foto 4.1 se muestra la máquina proctor modificada utilizada en este ensayo.

Foto 4.1: Máquina proctor modificado

De esta forma, se fabrican cinco probetas de HCEM14 con la dosificación seleccionada (porcentajes de material seco en estufa a 105 grados centígrados) y con porcentajes de agua de 5, 8, 9, 9,5 y 10% de la dosificación. Estos porcentajes de agua se establecieron en base a unas primeras mezclas con diferentes porcentajes de humedad, cuyos productos se mostraban muy fluidos en algunos casos o excesivamente secos en otros, llegando a determinar valores medios, los que ayudaron a dar los puntos del gráfico 4.3.

Para el caso de la G-CEM4 se procedió de la misma forma, pero con 6 probetas, cada una con la siguiente inclusión de agua: 4; 5,5; 7; 8; 8,5% de la dosificación llegando a determinar valores medios, los que ayudaron a dar los puntos de la gráfica 4.3. La normativa utilizada fue la NLT 108/91.

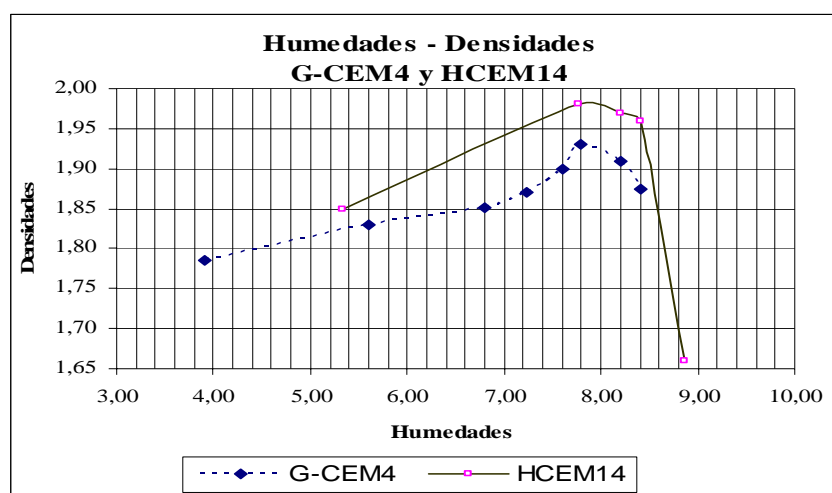
El ensayo proctor modificado se inició con la toma de datos referentes a la masa de las probetas (proctor modificado), a continuación se compactó la mezcla en las probetas. El proceso se realizó en tres capas, cada capa con 25 golpes distribuidos uniformemente por una masa normalizada de 4,543 kg que cae desde una altura de 457 mm. Una vez terminada la compactación de la última capa, se procedió a enrasar sin compactación, inmediatamente se pesó todo el conjunto, se desmoldó y se extrajo uno o varios trozos representativos de la probeta y se dejó a secar a 105 °C hasta masa constante; a las 24 horas de secado se pesaron los trozos secos y se realizaron los cálculos respectivos, hasta determinar la humedad y la densidad seca de cada probeta.

Finalmente se representaron estos valores en una curva densidades – humedades, definiendo el valor más alto de las densidades como la densidad seca máxima y su correspondiente humedad como la humedad óptima. Los resultados se muestran en la tabla 4.9 y gráfico 4.3.

Tabla 4.9: Resultados del ensayo proctor modificado.

Materiales componentes	- EIRSU de Mataró del mes de Marzo del 2001 Fracción 5-12 y 12-20 mm: (EM5-12, EM12-20) - Arena de río fracción 0-5 mm (AN1-0/5)	
	hormigón compactado (HCEM14)	grava- cemento (G-CEM4)
Humedad óptima (%)	7,9	7,8
Densidad seca máxima (g/cm ³)	1,98	1,93

Gráfico 4.3: Proctor modificado de la G-CEM4 y HCEM14.



4.4.6 Corrección de la dosificación.

La dosificación utilizada para la fabricación del HCEM14 y la G-CEM4, son válidas cuando sus componentes son sólo de origen natural. En el caso del HC y G-C fabricadas con árido natural y EIRSU, las densidades de los áridos son sensiblemente distintas, por lo tanto se realizó una corrección de las dosificaciones en volumen. Las correcciones de la dosificación del HCEM14 se indican en el anexo A.2.3 y A.2.4 para la G-CEM4, quedando las nuevas dosificaciones que se muestra en las tablas 4.10 y 4.11 respectivamente.

Tabla 4.10: Dosificación para el H-CEM14 con la corrección por densidades.

Cemento (C)	14,79 %	290 kg/m ³
AN1-0/5	33,81 %	673 kg/m ³
EM5-12	15,40 %	310 kg/m ³
EM12-20	35,99 %	700 kg/m ³
Agua	7,90 %	156 lt/m ³

Tabla 4.11: Dosificación para la G-CEM4 con las corrección por densidades.

Cemento (C)	4,23 %	83 kg/m ³
AN1-0/5	43,38 %	853 kg/m ³
EM5-12	14,46 %	265 kg/m ³
EM12-20	37,93 %	728 kg/m ³
Agua	7,80 %	150 lt/m ³

4.4.7 Fabricación y nomenclatura de los HCEM y G-CEM.

Con la intención de determinar la dosificación más económica y cuyo comportamiento cumpla con las recomendaciones del PG-3/2002 para HC y G-C, se probó para ambos casos la fabricación de nuevas probetas con diferentes dosificaciones, variando la cantidad de cemento.

Los porcentajes de cemento para el hormigón compactado fueron de 12% y 15%. Y para la grava-cemento fueron de 3,5% y 5,5%; en ambos casos se procedió nuevamente a determinar las nuevas dosificaciones (en el anexo A.2.5 se indica las dosificaciones del HC y en A.2.6 las de la G-C), la determinación de la humedad óptima con el ensayo (proctor modificado) y la corrección de las dosificaciones por densidades. Una vez realizado este proceso, se realizó la fabricación de 18 probetas de HC, para cada dosificación, para romperlas; 3 a compresión los 28 días, 3 a compresión a 90 días de edad y 3 a 365 días (sólo para HCEM4) y 3 para determinar el módulo de elasticidad. Asimismo, se fabricaron 3 probetas para romperlas a tracción indirecta a 28 días y 3 a tracción indirecta a 90 días.

Para la G-C se fabricación 15 probetas para cada dosificación, para romperlas; 3 a compresión a los 7 días y 3 a compresión a 28 días, 3 a compresión a 90 días, 3 a compresión a 365 días y 3 para determinar el módulo de elasticidad.

Una vez fabricadas las probetas, se almacenaron en cámara húmeda, hasta que cumplir la edad estipulada de los ensayos. Finalmente, se compararon los resultados de cada porcentaje de cemento y se determinaron las mejores alternativas de dosificación.

Tabla 4.12: Nomenclatura de los HCEM y porcentajes de cemento corregidos.

Porcentaje de cemento	Nomenclatura del HCEM	Porcentaje de cemento corregido
14 %	HCEM14	14,79%
12 %	HCEM12	12,68%
15%	HCEM15	15,85%

Tabla 4.13: Nomenclatura de las G-CEM y porcentajes de cemento corregidos.

Porcentaje de cemento	Nomenclatura de las G-C	Porcentaje de cemento corregido
4 %	G-CEM4	4,23%
3.5 %	G-CEM3,5	3,70%
5.5%	G-CEM5,5	5,82%

La tabla 4.12 indica que un HCEM12 se trata de un HCEM con un contenido de cemento del 12,68% y HCEM15 con un contenido de cemento del 15,85%, en tanto que el HCEM14 corresponde a un porcentaje de cemento corregido de 14,79% (porcentajes corregidos).

De igual forma, en la tabla 4.13 de G-CEM, la G-CEM3.5 y G-CEM5.5 son G-CEM con participación del cemento en los porcentajes indicados en el número que acompaña al G-CEM, y en el caso de la G-CEM4, el porcentaje de cemento corregido es del 4,23% (porcentajes corregidos).

4.5.-CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL HC Y G-C ENDURECIDOS.

Las características físicas del hormigón endurecido, vienen determinadas por las propiedades mecánicas, básicamente ensayos de resistencias a tracción indirecta a 28 días (para HC) y resistencias a compresión simple a 7 días (para G-C), porque a estas edades el PG-3/2002, exige unas ciertas resistencias mecánicas en este tipo de materiales.

4.5.1 Resistencia a compresión.

Para la realización de estos ensayos se ha seguido la norma NLT-202/91. De esta manera, se procedió a romper 3 probetas de cada una de las dosificaciones del HC y G-C. Para hallar el valor de la resistencia a compresión simple se empleó la prensa mecánica *Universal Multitester* con una célula de carga de 25 toneladas como máximo. Se colocó cada probeta centrada entre los cabezales de la prensa, accionando a continuación el dispositivo de avance, lo estrictamente necesario para que entre en contacto con el extremo superior de la probeta y el cabezal. Una vez conseguido este acoplamiento, se inicia el proceso de carga de la probeta a una velocidad de 1,27 mm/min. El valor que se obtiene de la prensa, es la carga en kg que soporta la probeta, para calcular la resistencia a compresión basta dividir este valor por la superficie sobre la cual se ha aplicado la carga en la probeta, que es fija para todas al ser fabricadas con el molde proctor, cuyo diámetro es de 10 cm. La resistencia a compresión simple final es el resultado de realizar la media aritmética a los valores de las tres probetas. En la foto 4.2 se puede apreciar una de las probetas ensayadas a compresión simple.

Foto 4.2: Probeta de G-CEM ensayada a compresión.

4.5.2 Resistencia a Tracción indirecta.

Para la realización de estos ensayos se ha seguido la norma UNE 83-306 (AENOR) “Ensayo de tracción indirecta”, sobre 3 probetas de cada una de las series dosificadas de HC. Para hallar el valor de la resistencia a tracción indirecta se empleó la misma prensa que se utilizó para determinar la resistencia a compresión, es decir la prensa mecánica *Universal Multitester*. Antes de la colocación de las probetas en la prensa, se marcó con una línea el diámetro de cada una de las caras, asegurándose que estos diámetros pertenezcan a un mismo plano axial. También se señaló las generatrices que unen los extremos de los diámetros anteriores. Mediante estas marcas, quedó definido el plano de carga del ensayo. En tanto que entre los platos de la prensa y la probeta se dispuso de bandas de apoyo de cartón, de 25 mm de ancho, con el objetivo de distribuir la carga durante la ejecución del ensayo.

La colocación de la probeta empezó por la disposición de las bandas de apoyo de cartón mencionadas, que fueron colocadas sobre el plato inferior, cuidando de que quede centrada. Seguidamente se colocó la probeta, apoyada sobre una de las generatrices que antes habíamos marcado sobre la banda de apoyo. Una vez hecho esto, se situó la otra banda sobre la generatriz opuesta a la anterior y se bajó el plato superior, sin dar carga, para fijar el conjunto. Así, las bandas de apoyo quedaron centradas según los platos de la prensa y según las generatrices marcadas en la probeta, de tal forma que el plano de carga quedó perfectamente vertical.

A continuación se aplicó la carga sin choques bruscos. La carga se suministró con control de desplazamiento a una velocidad de aproximación de los platos de la prensa de 0,3 mm por minuto y se tomó como carga de rotura la máxima alcanzada antes de la rotura de cada una las probetas.

Los resultados del ensayo se calcularon con la ecuación (4.1):

$$f_{ii} = \frac{2 * P}{\pi * l * d} \text{ (MPa)} \quad (4.1)$$

donde:

f_{ii} : es la tensión de rotura por tracción indirecta, en MPa.

P: es la carga de rotura, en Newtons

l: es la longitud de probeta, en milímetros

d: es el diámetro de probeta, en milímetros.

La resistencia a tracción indirecta final es el resultado de realizar la media aritmética a los valores de resistencia de las tres probetas de cada mezcla. En la foto 4.3 se puede apreciar la prensa utilizada así como dos de las probetas de HC rotas a compresión y tracción indirecta.

Foto 4.3: Ensayo a tracción indirecta a una probeta de HCEM14 (izquierda) y probetas de HCEM14 rotas a compresión y tracción indirecta (derecha).



4.5.3 Módulo de elasticidad.

El módulo de deformación estático está directamente relacionado con la resistencia a compresión, ambos son afectados por la porosidad de las fases constituyentes en la mezcla, como son el árido, la pasta y la zona de transición. El comportamiento tensión-deformación de cada una de estas fases viene caracterizado por sus propias resistencias y la resistencia de todo el conjunto tomando en cuenta el porcentaje de los constituyentes. En el cálculo de estructuras de hormigón, el valor del módulo de elasticidad se calcula a partir de relaciones empíricas que suponen el módulo de deformación, la resistencia a compresión y la densidad.

La rigidez de un árido viene determinada por su porosidad, lo que restringe la deformación al árido dentro de la matriz cementada. Los Áridos densos tienen módulos de deformación altos, así que a mayor proporción de áridos gruesos con alto módulo de elasticidad, mayor es el módulo de elasticidad del hormigón. En los hormigones con baja o media resistencia no es muy evidente la influencia de la porosidad, puesto que al ser tan baja la resistencia, puede que no sea la porosidad su origen, sino la naturaleza del mismo hormigón.

El módulo de elasticidad del HC es del rango de 28.000 a 32.000 MPa y de la G-C de 18.000 a 22.000. En tanto que el módulos de elasticidad del hormigón reciclado de 29.500 MPa. El Módulo de elasticidad del presente estudio, se ha determinado sobre tres probetas proctor modificado de cada una de las dosificaciones, tanto para HC como para G-C. Estas probetas fueron mantenidas en cámara húmeda durante 28 días. Las caras de las probetas han sido regularizadas, y se procedió en base a la resistencia a la compresión a aplicar el 10, 20 y 30% de la carga a la rotura, registrando las deformaciones correspondientes. Las medidas de deformación fueron realizadas con LVDTs (Linear Variable Diferencial Transformer) transformador diferencial de variación lineal, con el sistema de adquisición de datos controlado por ordenador.

La mecánica del ensayo consiste en aplicar tres ciclos de carga y descarga, en cada ciclo se registran las deformaciones correspondientes al 10, 20 y 30% de la carga de rotura. Estas lecturas se toman en las fases ascendentes de los ciclos, seguidamente se eleva la carga al 75% de la carga de rotura y nuevamente se registra la deformación.

El cálculo del módulo de elasticidad se realiza con los datos obtenidos del diagrama de tensión-deformación, en el segundo y tercer ciclo de la rama de carga y en el proceso de carga hasta el 75% de la carga a la rotura.

El módulo de deformación E_{ci} , se define como la media de los valores determinados por las ecuaciones (4.2) y (4.3):

$$E_{10,20} = \frac{(\sigma_{20} - \sigma_{10})}{\epsilon_{20} - \epsilon_{10}} \tag{4.2}$$

$$E_{20,30} = \frac{(\sigma_{30} - \sigma_{20})}{\epsilon_{30} - \epsilon_{20}} \tag{4.3}$$

Donde σ_i : es la tensión correspondiente al porcentaje de carga de rotura aplicada.

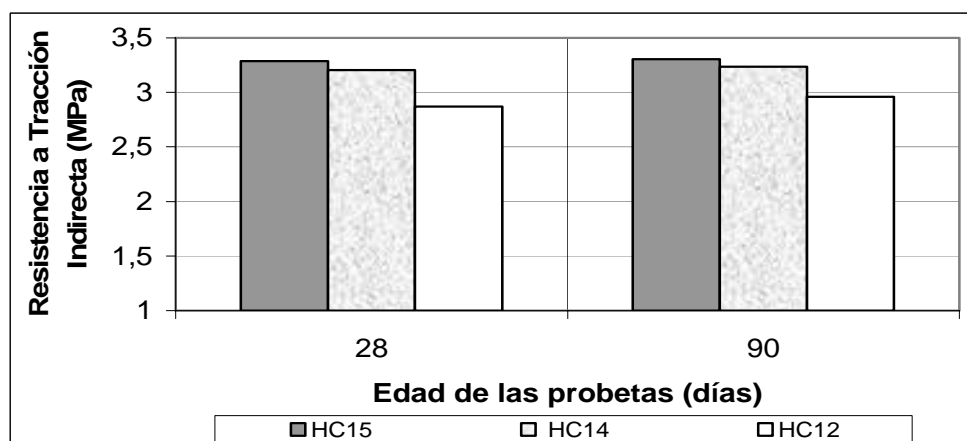
ϵ_i : es la deformación unitaria longitudinal correspondiente a la tensión σ_i .

4.5.4 Análisis de los resultados obtenidos para HCEM y G-CEM.

Tabla 4.14: Resultados obtenidos para HCEM.

Resultados mecánicos para las probetas HCEM según las diferentes alternativas de dosificación			
Dosificaciones en porcentaje de masa total			
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
	HCEM14	HCEM12	HCEM15
Cemento	14,79%	12,68%	15,854%
AN1-0/2	34,04%	35,93%	32,76%
EM5-12	15,66%	15,66%	15,66%
EM12-20	35,40%	35,40%	35,40%
Densidad seca máxima (g/cm³)	1,98	1,96	1,98
Compresión 28 días (MPa)	31,12	27,5	31,8
Compresión a 90 días (MPa)	32,08	28,5	32,1
Compresión a 365 días (MPa)	33,42	--	--
Tracción indirecta 28 días (MPa)	3,205	2,87	3,286
Tracción indirecta 90 días (MPa)	3,236	2,96	3,304
Módulo de elasticidad (MPa)	27.500	25.000	26.900

Gráfico 4.4: Tracción indirecta del HCEM con diferentes porcentajes de cemento.

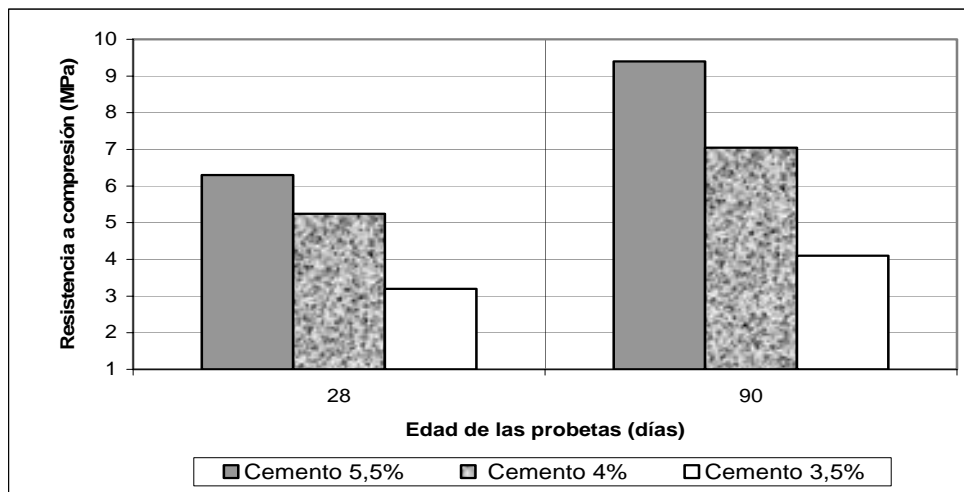


De la tabla 4.14 y gráfico 4.4, se observa que el si bien el HCEM15 cumple con los valores exigidos de 3,3 MPa para HC a los 28 días, no mejora considerablemente sus resistencias con respecto a la HCEM14, en tanto que su porcentaje de cemento es semejante al 16%, valor excesivamente alto que encarecería la obra. El HCEM12 da valores de resistencia a tracción indirecta muy bajas con respecto a lo exigido en el PG-3/2002. De tal forma que la alternativa uno de HCEM14 (con una inclusión de 14,79% de cemento) con resistencia a tracción indirecta de 3,205 MPa es la más favorable, ya que si bien no cumple con el valor de 3,5 MPa exigido por el PG-3/2002, sí satisface el valor de 2,8 MPa recomendado por el IECA para vías de baja intensidad de tráfico.

Tabla 4.15: Resultados obtenidos para G-CEM.

Resultados mecánicos para las probetas de G-CEM según las diferentes alternativas de dosificación			
Dosificaciones en porcentaje de masa total			
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
	G-CEM4	G-CEM3,5	G-CEM5,5
Cemento	4,23%	3,70 %	5,82%
AN1-0/5	43,38 %	43,91%	41,79%
EM5-12	14,46%	13,72%	13,72%
EM12-20	37,93 %	37,76%	37,76%
Densidad seca máxima (g/cm³)	1,93	1,91	1,93
Compresión 7 días (MPa)	3,81	2,8	3,46
Compresión 28 días (MPa)	5,24	3,2	6,3
Compresión 90 días (MPa)	7,05	4,1	9,4
Compresión 360 días (MPa)	8,402	--	--
Módulo de elasticidad (MPa)	18.460	14.070	18.780

Gráfico 4.5: Compresión de la G-CEM con diferentes porcentajes de cemento.



De la tabla 4.15 y gráfico 4.5, se observa que la G-CEM5.5 y la GCEM4 cumplen con los 3,5 MPa exigidos por el PG-3/2002 para G-C a 7 días. No obstante, la G-CEM5.5 requiere de un porcentaje de cemento mayor que la G-CEM4, lo que encarecería la obra. En cambio la G-CEM3.5 da valores de resistencias a compresión simple mucho más bajos de los que exige el pliego. De tal forma que la alternativa uno, es decir con una inclusión de 4,23% de cemento es la más favorable mecánicamente, dando valores de 3,8 MPa y cuya resistencia se ve claramente incrementada a los 90 y 365 días.

Por lo expuesto anteriormente se propone definitivamente las dosificaciones de HCEM14 y G-CEM4. Sin embargo, se debe hacer un estudio de durabilidad de estas matrices ante los ataques de los álcalis del cemento con los áridos, que se verá detallado en el próximo apartado.

4.6.- DETERMINACIÓN DE LA REACTIVIDAD POTENCIAL DEL ÁLCALI – SÍLICE.

La reactividad de los álcalis del cemento y de ciertos áridos, fue descubierto en 1938 por Stanton en EEUU, donde la presencia de rocas silíceas reactivas (opalinas, tridimitas, cristobalinas, calcedonias), así como también rocas magmáticas (riolitas, andesitas, obsdianas), dieron origen a expansiones.

La expansión puede verse reflejada de forma visible en las fisuras, que son generalmente paralelas a la dirección de la sollicitación, en forma de pata de gallo o espuela de gaucho. También es síntoma de esta reacción, la exudación de un fluido viscoso y puntos con forma de erupción. Sin embargo la reacción álcali-árido es lenta, necesitándose años para detectar las primeras señales. Las estructuras afectadas son generalmente puentes, carreteras, muelles, presas, localizadas especialmente en zonas húmedas.

La reacción de los álcalis, dependen de su capacidad de liberar K_2O y Na_2O , también depende de la dosificación y finura del cemento, granulometría y reactividad de los áridos, temperatura, humedad y en especial de la reacción en la hidratación. Sin embargo, deben reunirse tres condiciones para que la reacción se desarrolle en un hormigón: la presencia de un árido reactivo, una concentración elevada de álcalis en la solución intersticial y humedad suficientemente elevada (Baron y Ollivier, 1992).

La reacción se produce entre los minerales silíceos del árido y los hidróxidos alcalinos derivados del Na_2O y el K_2O , produciendo un gel de álcali-sílice, el cual absorbe el agua hasta producir entumecimiento, dando lugar a fuertes presiones sobre la pasta de cemento, llegando en algunas ocasiones a producir rotura.

No obstante, y después de muchas investigaciones, se ha visto que existe un contenido de sílice reactiva que produce la máxima expansión, siendo menor ésta, si el contenido está por encima o por debajo de aquél. Para cementos empleados con áridos de origen dudoso, el contenido de álcalis está limitado por $0,658 \text{ K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} < 0,6\%$, aunque se han registrado casos en los que con un contenido menor al expuesto, se han producido expansiones (Baron y Ollivier, 1992).

Dentro de los límites indicados, la reacción es tanto más enérgica cuanto más finamente molido sea el cemento, y para que la reacción progrese debe existir agua en la pasta o absorbida del exterior por el hormigón. La reacción de expansión se incrementa con los ciclos de humedad-sequedad y con las altas temperaturas dentro del margen de $40\text{ }^\circ\text{C}$ (Cánovas, 1996).

Se utilizan varios métodos que se complementan para cuantificar la potencial reacción álcali-sílice de los áridos, como son el análisis petrográfico, métodos químicos y los métodos que se fundamentan en el cambio volumétrico de las probetas de mortero tanto en ensayos acelerados, como a 90 días, 1 año o más.

Del análisis petrográfico se obtiene la composición mineralógica del árido, mientras que los métodos químicos permiten evaluar la reactividad potencial del árido, en función de la sílice disuelta y de la reducción de la alcalinidad; los resultados obtenidos son relativamente rápidos, pero no son determinantes. El método de las probetas de mortero especificado en la norma ASTM C 227, tiene la desventaja del largo período de inmersión requerido (entre 90 días y 1 año). En el método acelerado (sudafricano) de la norma UNE 146508 EX (1997), se obtienen en 16 días resultados comparables a aquellos obtenidos por el método de las probetas de mortero, después de 1 año (Oberholster y Davies, 1986).

En este apartado se ha utilizado el método acelerado, para evaluar la potencial reactividad de las EIRSU con los álcalis del cemento.

Método acelerado.

La normativa utilizada fue la UNE 146508 EX (1997) o ASTM C 1260 (1994), mediante este ensayo se consigue evaluar la reactividad potencial, a través de la determinación de la expansión de probetas de mortero sumergidas en una disolución de NaOH a elevada temperatura.

El procedimiento realizado sobre las EIRSU, consistió en elaborar un mortero con una parte de cemento por cada 2,25 partes de árido (con granulometría especificada), y con una relación agua/cemento de 0,47. A continuación se amasó, compactó y depositó en moldes según la norma UNE 1961 (1987). Al cabo de 24 horas se desmoldó las probetas y se midió su longitud inicial (L_0). Seguidamente, se colocaron las probetas en contenedores llenos de agua con NaOH 1 Molar, que fueron selladas y se depositó el conjunto en la estufa a 80 °C durante 24 horas. Posteriormente, se midió la longitud de cada probeta (L_n). Esta operación se repitió periódicamente durante 16 días, realizando las lecturas de la longitud de cada probeta (L_n).

Las muestras utilizadas en la fabricación de los morteros fueron las EM de las fracciones 5-12 mm y 12-20 mm por separado y para comprobar los resultados de las EIRSU de Mataró, se realizó este ensayo también con las EIRSU de la planta de Tarragona (ET) para obtener un referente de la EIRSU de otra planta de incineración de RSU.

La expansión lineal de cada probeta a cada edad se obtiene mediante la ecuación (4.9) donde G es 10 si las lecturas fueran tomadas en pulgadas o 254 si las medidas fueran tomadas en mm:

$$\text{Expansión}(\%) = \frac{L_n - L_0}{G} * 100 \quad (4.4)$$

Resultados del ensayo.

Los resultados son la media de las expansiones de las tres probetas confeccionadas con EIRSU, tal como indica la normativa de este ensayo. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.16 y en el gráfico 4.6. Además se han incluido en las fotos 4.4 y 4.5 las probetas de mortero con EM y ET utilizadas para determinar la reacción álcali-sílice.

Foto 4.4: Morteros de EM5-12 y EM12-20.

Foto 4.5: Detalle de dos probetas con EM y ET

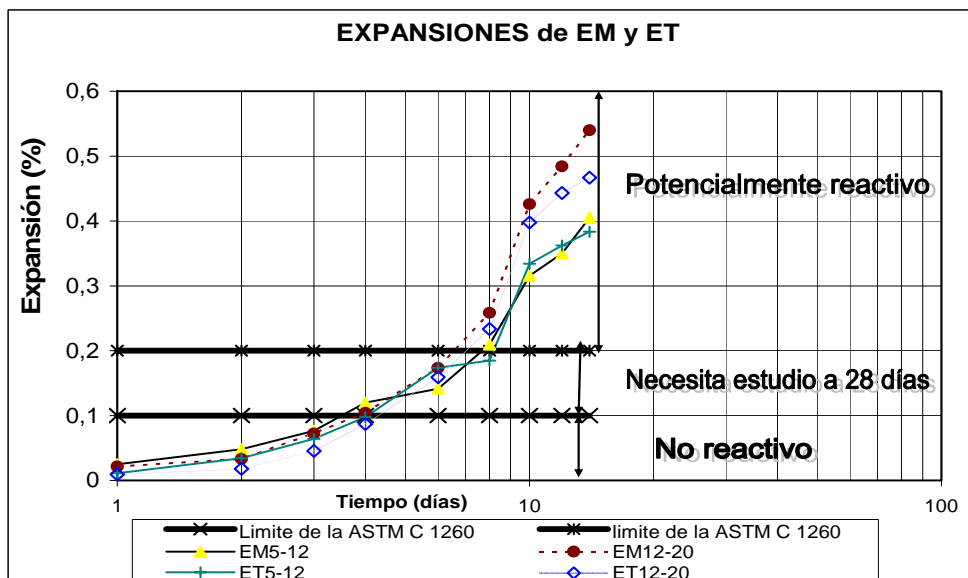


Tabla 4.16: Resultados del ensayo álcali-sílice de las EM y ET.

Mataró		Tarragona		Límites EHE (1998)
EM5-12	EM12-20	ET5-12	ET12-20	
0,41%	0,54%	0,38%	0,47%	Menor a 0,10%: no reactivos
				Entre 0,10 y 0,20%: reactivos
				Mayor a 0,20%: potencialmente reactivos

Según la EHE (1998) (a falta especificaciones en el PG-33/2002), si las expansiones son menores al 0,10% a los 16 días, entonces los áridos no son reactivos, si las expansiones están comprendidas entre el 0,10% y 0,20% a los 16 días, se califica a los áridos como reactivos y deben efectuarse medidas de la expansión a los 28 días y si las expansiones son mayores al 0,20%, los áridos puede considerarse como potencialmente reactivos.

Grafico 4.6: Expansiones de las muestras de EM y ET por la reacción álcali-sílice



En el caso de las EIRSU tanto de la fracción 5-12 como 12-20 mm, de ambas plantas de incineración, sus expansiones son superiores al 0,20%, considerándolas, como áridos potencialmente reactivos, tal como se indica en el gráfico 4.6 para EM y ET.

Además, en el gráfico 4.6 se observa que las EIRSU de las fracciones 5-12 son menos reactivas que las 12-20, se supone que la presencia de sílice reactiva es mayor en fracción 12-20 mm, ya que en ambas EIRSU se presenta esta reacción en las fracciones más gruesas.

4.7.- CONCLUSIONES RELATIVAS AL ESTUDIO DE LAS EIRSU EN HORMIGONES COMPACTADOS Y GRAVA-CEMENTO.

- 1) En lo referente a la adecuación de las EIRSU a las recomendaciones de PG-3/2002, las EIRSU cumplen con las características exigidas para áridos en HC y G-C, excepto en cuanto al índice de lajas y el coeficiente de desgaste Los Ángeles. Sin embargo, las EIRSU sí cumplen lo recomendado por el IECA (2003) para capas de base para tráfico ligero.
- 2) Las curvas de dosificación presentaron un vacío en la fracción gruesa, tal como se mencionó en el capítulo 3, donde las granulometrías de las fracciones reales no corresponden a las nominaciones de 5-12, y 12-20, sino a fracciones más finas. A pesar de esto no se utilizó árido natural para salvar este vacío en la franja gruesa, y se continuó con el cálculo de las dosificaciones del HC y de la G-C, con el objetivo de analizar el comportamiento de las muestras de la fracción nominales 5-20 de las EIRSU estudiadas en el capítulo 3.
- 3) Para determinar la humedad óptima y la densidad seca máxima, mediante el ensayo PM, se tuvo que repetir en varias ocasiones el ensayo correspondiente, ya que los resultados fueron muy dispersos e inconsistentes. Esto se debió a la heterogeneidad de las EIRSU y los materiales que las componen, donde cada uno de estos tiene densidades y humedades distintas (conclusiones del capítulo 3), lo que dificultó determinar estos parámetros. Además de esto, los propios sistemas de matrices tratadas con cemento Portland requieren de una mínima cantidad de agua para tener la plasticidad y trabajabilidad adecuadas. La adición de más agua de la estrictamente necesaria dió lugar al aumento de la porosidad y la consecuente reducción de la resistencia del producto final. Así pues, la formulación óptima ha de realizarse para cada tipo de residuo,

considerando las posibles interacciones entre los constituyentes del residuo y del cemento.

- 4) En cuanto a la potencial reactividad producida por la reacción de los álcalis del cemento con las EIRSU, se debe a que los áridos contienen minerales procedentes de los restos de vidrios domésticos, que aportan sílice reactiva que a su vez reacciona con los álcalis del cemento en el proceso de hidratación. Para disminuir las fisuras causadas por esta reacción, se podría añadir un porcentaje de la fracción 12-20 mm de origen natural, que disminuyan esta reacción en las matrices de HC y G-C, además, se recomienda utilizar estos materiales bajo capas permeables que detengan o frenen la entrada de humedad a las matrices compactas. Sin embargo, la reacción obtenida bajo el método acelerado, somete a los áridos a un cribado y pulverizado para obtener finos, y posteriormente realizar la fabricación de mortero, esta pulverización de los vidrios que componen las EIRSU son los principales responsables de esta reacción. No obstante, los vidrios de las fracciones de las EIRSU, tienen granulometrías gruesas, con lo cual se evita esta reacción.
- 5) Con el objetivo de encontrar una dosificación más económica y cuyo comportamiento cumpla con las recomendaciones del PG-3/2002, para la fabricación de HC y G-C, se probó otras dosificaciones cambiando el porcentaje de participación del cemento y de arena natural, concluyendo que en general el HC14 y la G-C4 dan buenos resultados ante las sollicitaciones aplicadas dando los siguientes resultados:
 - El HCEM con una inclusión de 14,79% de cemento, dio una resistencia a tracción indirecta a los 28 días de 3,205 PMA, con lo cual, si bien no cumple con el valor de 3,3 MPa exigido por el PG-3/2002 y satisface el de 2,8 MPa recomendado por el IECA (2003) para vías de baja intensidad de tráfico, por lo que se cree que las EIRSU darán buenos resultados mecánicos en la aplicación de un tramo experimental de carretera.
 - En cuanto a la G-CEM es decir con una inclusión de 4,23% de cemento dio una resistencia a compresión simple a 7 días de 3,8 MPa, con lo cual cumple con los 3,5 MPa exigidos por el PG-3/2002 para capas base de tráfico pesado o medio.

CAPITULO 5

5.- APLICACIÓN DE LAS EIRSU COMO ÁRIDOS EN LA FABRICACIÓN DE GRAVA-CEMENTO Y HORMIGÓN COMPACTADO, EN UN TRAMO EXPERIMENTAL DE CARRETERA.

5.1.-INTRODUCCIÓN.

Dado que en el capítulo 4 se determinó que la G-C y el HC fabricados con áridos finos de origen natural y áridos gruesos de la fracción 12-20 mm de EIRSU, dieron buenos resultados mecánicos, en el presente capítulo se describe el proceso de aplicación de estos materiales en un tramo experimental de carretera, en la construcción de las siguientes aplicaciones: capa de rodadura en hormigón compactado, subbase de grava-cemento y como una alternativa de bacheo. Previamente se hizo un estudio del proyecto, validando en la práctica los aspectos especificados en la metodología, en base a los estudios previos definidos en los capítulos anteriores de la presente tesis. A continuación se realizó un tramo experimental de carretera en el municipio de Tagamanent, llevando a escala real las soluciones técnicas (materiales con residuos tratados con ligantes hidráulicos y puestos en la obra mediante compactación) y la metodología de ensayos mecánicos. No obstante, en el capítulo 6 se indican los estudios medioambientales desarrollados a partir del análisis de lixiviados, sobre las muestras de EIRSU y testigos extraídos del tramo experimental de carretera.

En el tramo experimental de carretera, participaron los siguientes equipos: La Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), en la parte de metodología, ensayos de caracterización de los residuos como áridos para pavimentos de hormigón, estudio de hormigones compactados y grava-

cemento, tanto desde el punto de vista mecánico y de durabilidad, como desde el punto de vista medioambiental. Y por otra parte el Departamento de Política Territorial y Obras Públicas de la Generalitat de Cataluña y el Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC), en la redacción del proyecto (justificación del proyecto) así como en la construcción del tramo experimental de carretera.

En primera instancia se expone la justificación del proyecto, donde se pone de relieve la importancia de mantener en condiciones la red de caminos rurales, y en consecuencia el alto coste económico que esto demanda. Por lo tanto, se plantea la necesidad de disponer de métodos/sistemas idóneos de pavimentación y mantenimiento de la red de caminos rurales en Cataluña, apropiadamente integrados en el entorno y a ser posible, con aportaciones medioambientales. Esta necesidad justifica el presente estudio sobre grava-cemento y hormigón compactado con rodillo para la pavimentación y reparación económica y ecológica de vías de baja intensidad de tráfico que se menciona en este capítulo.

A continuación se define la metodología para la aplicación en un área concreta, dando lugar al planteamiento experimental del estudio, el mismo que aporta una serie de directrices a seguir como son: la integración del pavimento en el entorno, así como la incorporación de residuos locales en los materiales (al cemento y al hormigón). Evidentemente esta utilización hace necesario asegurar un comportamiento adecuado desde el punto de vista ambiental (básicamente ausencia de lixiviación de contaminantes).

Seguidamente se describe el desarrollo de la obra, iniciando con el emplazamiento de la obra, estableciendo la ubicación, las cotas y la longitud exacta de la carretera a ejecutar. A continuación se indican los materiales a utilizar, luego se describen las especificaciones técnicas que se han previsto en el proyecto, que corresponden a dos tipologías diferentes de construcción de la carretera. Por un lado se considera la reparación local de baches y por otro lado se considera la pavimentación de toda la superficie de la carretera. Para cada una de estas soluciones se ha previsto diferentes opciones constructivas, en las cuales se planifica la recogida de agua para controlar la eventual existencia de lixiviación en las zonas con reparación local de baches, así como la extracción de testigos del tramo, para posteriormente determinar sus resistencias mecánicas e impacto ambiental. Definidos estos puntos, se prosigue a describir el orden de construcción de los diferentes subtramos, mostrando el tipo de obra, las dimensiones, etc.

Una vez determinados todos los pormenores del proyecto, se indica el proceso constructivo, mostrando el estado inicial de la carretera, los trabajos previos, la recogida de

escorias (EIRSU), transporte, puesta en obra y compactación del material, así como el acabado superficial del firme. Además, se muestra la construcción de cubetas destinadas a la simulación de baches, la instrumentación de los baches, la construcción de los baches no instrumentados, la recogida de lixiviados, el acabado superficial en la zona de baches y finalmente se realiza el esquema constructivo de las zonas: de pavimento continuo, de reparación de baches, y de instrumentación de los baches.

A continuación se hace referencia a la etapa de caracterización de los materiales utilizados, y el estudio de durabilidad. Seguidamente, se indican las dosificaciones empleadas y sus respectivas correcciones motivadas por la utilización de las EIRSU, cuyas densidades son diferentes de los áridos naturales. En cada una de estas etapas se compara con los resultados obtenidos sobre las EIRSU de los capítulos 3 y 4 con el objetivo de determinar el grado de fiabilidad de los diferentes acopios estudiados. Por último, se muestra el comportamiento del tramo frente a los deterioros superficiales (control de posibles fisuras, desperfectos, aparición de manchas en el pavimento, etc). Y en el capítulo 6 se realiza el estudio de impacto ambiental del tramo experimental de carretera.

5.2.- JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.

Como es sabido, la conexión entre núcleos de población y actividades (como la industria, la agricultura y los servicios, entre otras), tiene un papel esencial en el desarrollo económico ya que logra la circulación humana y de bienes, por lo que en el presente estudio se ha tenido en cuenta la comunicación entre zonas especialmente alejadas de los centros de alta población en la red de caminos rurales.

La importancia de esta red de caminos rurales hace necesario llevar a cabo una conservación apropiada, con el consecuente coste tanto de pavimentación como de mantenimiento. Además, cuando la regularidad superficial no es aceptable para la circulación, se ha de añadir a los costes derivados del mantenimiento, la reparación de los vehículos como consecuencia del mal estado de la vía, entre otros.

Incorporado al mantenimiento y conservación de la red de carreteras rurales, se debe conseguir la máxima integración de la red vial con el medio. Si, además, le sumamos el número de kilómetros que la componen, la diversidad y la cantidad de administraciones que son responsables y que aplican criterios y procedimientos diferentes (ayuntamientos, consejos comarcales, diputaciones provinciales, Generalitat, etc.); la heterogeneidad de las características

específicas de cada carretera (velocidades de circulación, dimensiones, características de la carretera, etc., que dependen de cada administración) y el deterioro al cual están sometidas las redes viales (por el uso o por factores atmosféricos), la conservación y mantenimiento de la red se hace cada vez más difícil llevar a cabo.

Como consecuencia de lo expuesto, se deduce la necesidad de disponer de métodos/sistemas idóneos de pavimentación y mantenimiento de la red de carreteras rurales, apropiadamente integrados en el entorno, si es posible, con aportaciones medioambientales. En este contexto se sitúa el presente estudio, sobre grava-cemento y hormigón compactado con rodillo para capas de firme y reparación económica y ecológica de vías de baja intensidad de tráfico.

5.3.- OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL.

El objetivo del presente capítulo es analizar las posibilidades de pavimentación económica y ecológica de las vías de baja intensidad de tráfico y definir una metodología para su aplicación en áreas concretas.

En la actualidad existen diferentes estrategias de pavimentación. Se pueden escoger inicialmente las que requieren un inversión inicial más baja pero que tienen una vida útil más corta (básicamente capas granulares o asfálticas) o las que exigen una inversión inicial más alta pero tiene una vida útil más larga (básicamente pavimentos de hormigón, que como es sabido son la solución más durable y con menos necesidad de mantenimiento, siempre y cuando se ejecuten correctamente). No se puede decir a priori cuál de estas estrategias es la más económica y al mismo tiempo durable. En el caso de las redes de larga longitud, como sucede con las carreteras rurales, se debería utilizar soluciones técnicas durables y con bajo mantenimiento, que no requieran actuaciones en períodos de tiempo cortos y que generalmente necesitan inversiones iniciales más altas.

De entre estas soluciones se ha escogido inicialmente las que utilizan materiales tratados con ligantes hidráulicos con diferentes resistencias, puestas en obra mediante compactación (hormigón compactado con rodillo o grava-cemento), por ser las más económicas. Este bajo coste se debe a la utilización de maquinaria convencional (motoniveladora y rodillo vibrante, en contraposición con los pavimentos construidos con equipo de encofrados deslizantes), y alto rendimiento de la puesta en obra (en contraposición a los construidos con encofrados fijos y regla vibrante).

Se ha tenido en cuenta las posibles contribuciones medioambientales (aparte de la integración del pavimento en el entorno), que aportaría la incorporación de residuos locales en los materiales que integran el pavimento de hormigón. Evidentemente esta utilización hace necesario asegurar un comportamiento adecuado desde el punto de vista ambiental (básicamente ausencia de lixiviación de contaminantes).

Por lo tanto, se han planteado soluciones de compromiso coste-durabilidad, desde la reparación local de zonas aisladas (bacheo), hasta la pavimentación de hormigón compactado con rodillo. Con el objetivo de llevar a cabo este proyecto se ha avanzado en líneas de actuación diversas, entre las cuales se puede destacar las siguientes:

- Definición de los estudios previos a seguir, principalmente para la caracterización de los materiales a emplear. Básicamente se trata de ensayos de laboratorio para determinar la dosificación y las características del material resultante. Estos ensayos se refieren tanto a aspectos mecánicos, (resistencia a compresión, tracción indirecta, etc.) como medioambientales (por ejemplo lixiviación).
- Realización de tramos de prueba a escala real, cuyo objetivo es lógicamente validar en la práctica los aspectos especificados de la metodología, en cuanto a las soluciones técnicas o a los estudios previos definidos en el punto anterior, en el tramo construido in situ en el municipio de Tagamanent.

5.4.- OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO DEL TRAMO EXPERIMENTAL DE TAGAMANENT.

Hasta el momento las entidades implicadas en este proyecto han ido avanzando en diferentes aspectos de las líneas de actuación indicadas en el apartado anterior. Por una parte la UPC y el IECA se han dedicado a trabajar sobre la metodología a utilizar y en la definición y realización de ensayos de caracterización de residuos y de hormigones con residuos para pavimentos, tanto desde el punto de vista mecánico y de durabilidad como desde el punto de impacto ambiental (dentro del cual se ubica la realización del presente capítulo).

Por otra parte el Departamento de Política Territorial y Obras Públicas de la Generalitat y el ITeC han avanzado en la posible construcción de tramos experimentales. En este sentido,

estas dos últimas entidades han previsto una determinada asignación presupuestaria que ha servido para la construcción del tramo experimental de carretera en Tagamanent, al cual se refiere el presente capítulo.

El objetivo de este tramo de carretera ha sido llevar a escala real la selección de soluciones técnicas (materiales con residuos tratados con ligantes hidráulicos y puestos en obra mediante compactación) y la metodología de ensayos mecánicos y medioambientales desarrollados en la UPC y el IECA.

5.5.- PROYECTO.

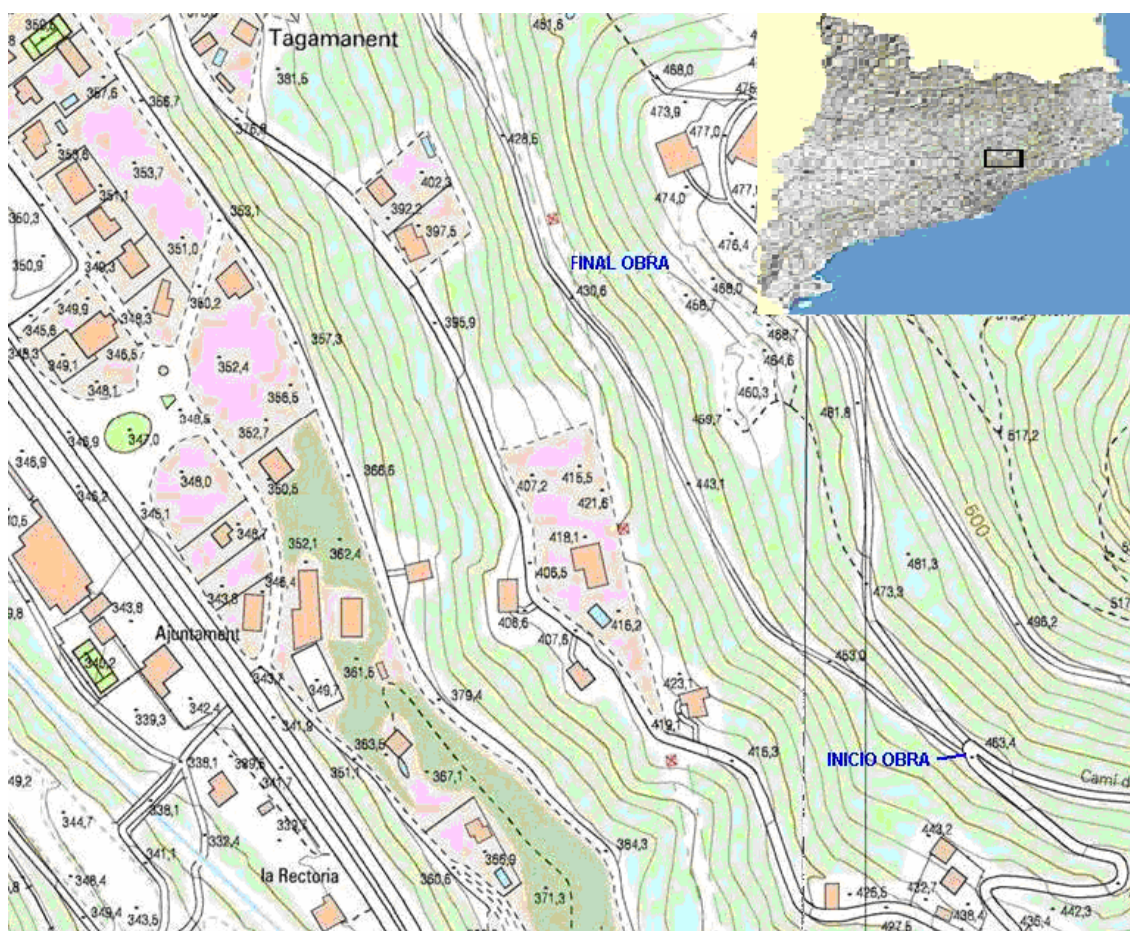
5.5.1 Emplazamiento de la obra.

El tramo de carretera rural se ha construido en “Torretes del Fóllo”, situado en el municipio de Tagamanent, en el Vallès Oriental, como se indica en el mapa 5.1. Para poder utilizar dicha área, se llegó a un acuerdo con el ayuntamiento, ya que esta carretera estaba en desuso hasta que recientemente se abrió a la circulación. Un detalle particular de la carretera es su trazado, ya que sigue el mismo que la tubería de suministro de agua de la “Font de la Cubeta”, que abastece al municipio de Tagamanent.

La longitud de la carretera es de 560 m con una pendiente media de 6%, desde la cota 463,4 hasta 430,6. La obra ha sido ejecutada por la empresa Leiro S.A., dado que es una de las empresas con mayor experiencia en Cataluña en el campo de los pavimentos de hormigón compactado con rodillo y que estuvo dispuesta a hacer el tramo experimental, de acuerdo con las especificaciones que se establecen más adelante en este capítulo.

Las instalaciones de la empresa Leiro S.A., se encuentran tan solo a 1 km de distancia del tramo de carretera, lo cual facilitó el transporte del hormigón y de la maquinaria, al mismo tiempo que redujo los costes de ejecución.

Mapa 5.1: Ubicación del tramo experimental de carretera (dentro de la comunidad autónoma de Cataluña).



Fuente: <http://www.icc.es>

Institut Cartogràfic de Catalunya, 2003.

5.5.2 Materiales componentes.

Las soluciones inicialmente propuestas para la obra han sido establecidas para gravamento y hormigón compactado con rodillo, cuyos áridos gruesos (fracción 5-12 y 12-20 mm) son escorias de la incineradora de Mataró recogidas en el mes de Noviembre de 2001 que desde este momento se denominan Ec, que son los residuos seleccionados para utilizarlos en este tramo experimental. La selección de la planta de RSU se ha llevado a cabo de acuerdo con las experiencias en cuanto a la composición del residuo y su disponibilidad, y cuyos resultados de caracterización fueron favorables en la planta de Mataró (capítulos 3). La nomenclatura usada para cada fracción de las Ec es la siguiente:

Ec de la fracción 5-12 mm: Ec5-12

Ec de la fracción 12-20 mm: Ec12-20

En cuanto a los áridos finos (fracción 0-5 mm) se utilizaron áridos de origen natural, ya que los procedentes de EIRSU, por su composición pueden no ser completamente aceptables para la fabricación de hormigón, según los resultados del Informe V (2001). La nomenclatura de la arena es la siguiente:

Arena utilizada en la carretera (para HC y G-C con Ec): AN2-0/5

Las Ec suministradas fueron tratadas por Pedreres Rusc S.A., y cribadas por Áridos Pérez S.A., y las características principales de estas Ec, ensayadas en la UPC, se encuentran detalladas en los apartados correspondientes a caracterización de áridos de este capítulo.

En cuanto al cemento, y sabiendo que las Ec contienen una cantidad importante de sulfatos, se utilizó cemento tipo I (52,5 SR). De acuerdo con los cementos actualmente disponibles en Cataluña, este cemento fue suministrado por Uniland Cementera S.A.

Dentro de las soluciones propuestas para la obra, se planteó la construcción de un subtramo de HC y otro de G-C, con áridos fino y grueso de origen natural, con el propósito de obtener un referente del comportamiento frente a los subtramos con Ec mencionados anteriormente. La nomenclatura de estos áridos es la siguiente:

Arena natural de la fracción 0-3 mm: AN3/0-3

Arena natural de la fracción 3-5 mm: AN4/3-5

Árido natural grueso de la fracción 5-10 mm: G1-5/10

Árido natural grueso de la fracción 10-20 mm: G2-10/20

5.5.3 Especificaciones del proyecto.

Las especificaciones técnicas que se han previsto en el proyecto corresponden a dos tipologías diferentes de tratamiento de la superficie de carretera, por un lado la reparación local de baches y por otro la pavimentación completa de la superficie de la carretera.

La reparación local de baches se considera conveniente cuando la superficie a tratar es máximo del 30% del total, ya que en caso contrario la construcción de pavimento completo es

posiblemente más económico por la repercusión que tiene el coste de mano de obra (aunque no se llevó a cabo un estudio específico). A modo de prueba, se consideró esta tipología de tratamiento como una interesante alternativa constructiva, por lo que se previó el área necesaria para simular un bache, con una extensión suficiente para el saneo del área seleccionada. La reparación local de baches se realizó con G-C, con grosor de capa de 15 cm y su superficie se dejó preparada para el paso de vehículos.

En el subtramo de bacheo, cuya permeabilidad se pensó que permitiría la recogida de agua de lixiviación (subtramo de G-C), se realizó una “instrumentación” que consistió en la instalación de dispositivos de seguimiento del comportamiento del tramo específicamente en aspectos medioambientales (tubos de recogida de agua para controlar la eventual existencia de lixiviación de contaminantes, en las zonas con reparación local de baches).

La otra tipología considerada fue la pavimentación de la superficie de la carretera. Esta alternativa constructiva se planteó de forma ambiental y económicamente favorable, poniendo en obra las EIRSU (Ec) en matrices cementadas y debidamente compactadas. El primer subtramo de esta tipología fue realizado con pavimento de hormigón compactado de referencia (hormigón compactado fabricado con áridos naturales -HCN-), con espesor de 15 cm, para comparar su comportamiento con las siguientes alternativas de pavimentación, tales como pavimento de HC compuestos con árido fino de origen natural y árido grueso de Ec, con espesores de pavimentación de 15, 12 y 10 cm. Y por último un subtramo de G-C con árido fino de origen natural y árido grueso de Ec, con espesor de capa de 15 cm. A continuación se indica la descripción de la obra ejecutada y el esquema del tramo, iniciando desde la cota más alta del mismo.

5.5.4 Descripción de la obra ejecutada.

La anchura de la carretera en todo el tramo es de 4 m, y los espesores de pavimentación van cambiando a lo largo de la misma. La dosificación del HC y G-C es constante en todos los subtramos (excepto en el subtramo de HC con áridos naturales -HCN-), y cumplen con las recomendaciones del PG-3/2002. En el caso del HCN también se tomó en cuenta las sugerencias del IECA para vías de baja intensidad de tráfico, en particular, lo referente a la dosificación del cemento, resistencias requeridas y humedad (humedad óptima del ensayo proctor modificado). Además se ha tenido cuidado con la textura de la superficie para hacer posible el tráfico de vehículos.

La obra se inició desde el subtramo de mayor cota (463,4 m) hasta el de cota más baja (430,6 m), desde donde partió la construcción de la tipología de pavimentación continua en capas compactadas, con los subtramos que se indican a continuación:

Subtramo 1: HCN (HC que cumple con los requisitos anteriormente indicados para áridos para HC con rodillo). Este subtramo de referencia, sirvió para comparar con el comportamiento de los otros cuatro subtramos realizados con EIRSU empleada en la carretera (Ec).

Longitud: 25 m

Espesor: 15 cm

Subtramo 2: HC compuesto de Ec y arena natural.

Longitud: 25 m

Espesor: 15 cm

Subtramo 3: HC compuesto de Ec y arena natural.

Longitud: 25 m

Espesor: 12 cm

Subtramo 4: HC compuesto de Ec y arena natural.

Longitud: 25 m

Espesor: 10 cm

Subtramo 5: G-C compuesta de Ec y arena natural.

Longitud: 25 m

Espesor: 15 cm

A continuación se describe la segunda tipología, que tal como se ha venido indicando, se trata de la opción de reparación local de baches, donde se ha simulado cada bache en una zona de 5 m de longitud y comprendido en toda la anchura de la carretera. Entre cada uno de estos baches se ha dejado pequeños subtramos de suelo mejorado, a los que también se les ha asignado una numeración, para una mejor identificación de los mismos. A continuación se describen los subtramos en cuestión:

Subtramo 6: Separación entre los baches (suelo mejorado).

Longitud: 10 m

Espesor: 15 cm de suelo mejorado.

Subtramo 7: G-C con Ec y arena natural.

Longitud 5 m

Espesor: 15 cm de G-C con Ec en la capa superior.

Espesor: 15 cm de grava natural 12-20 mm en la capa inferior.

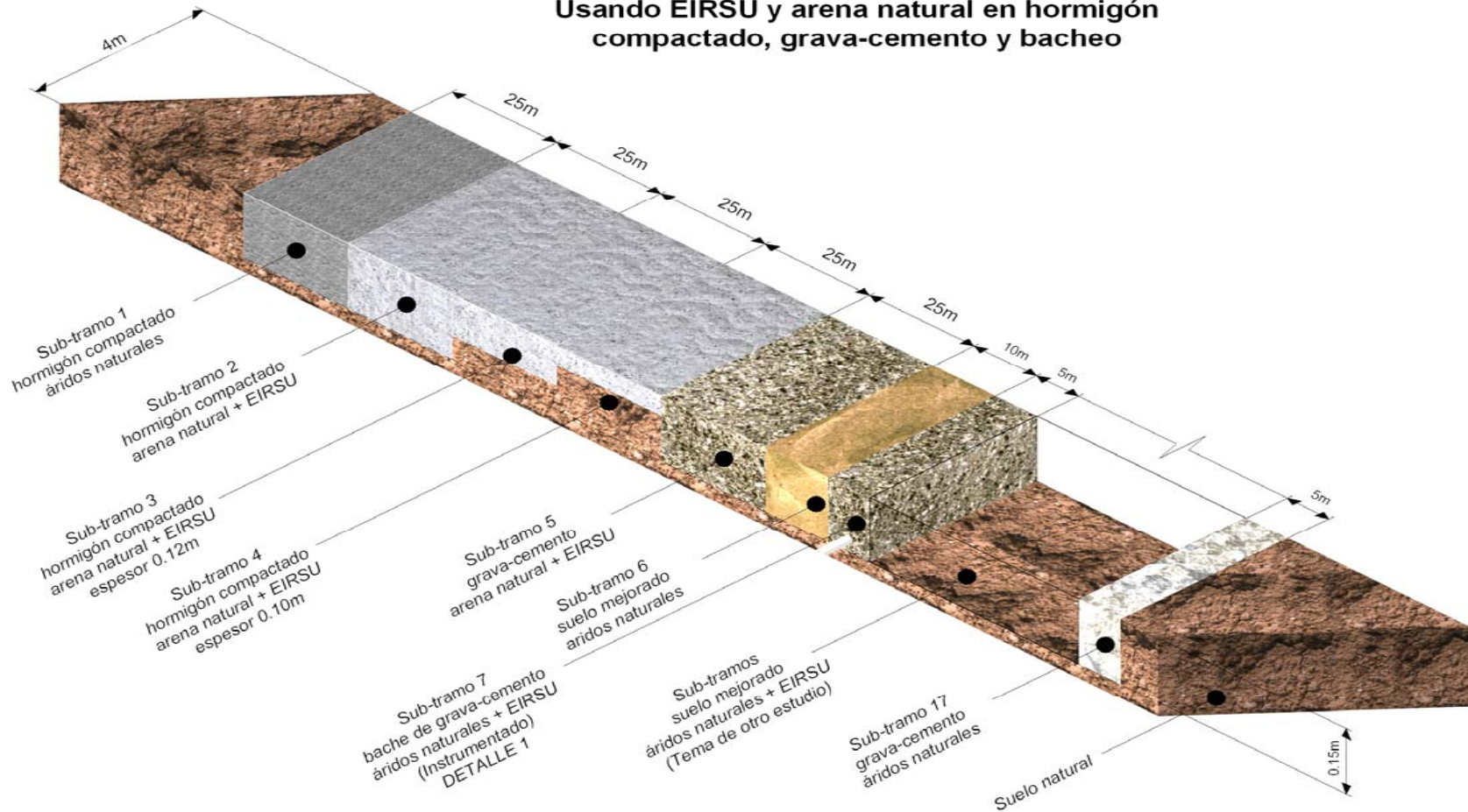
Instrumentado (provisto de un sistema de recogida de lixiviados)

Los siguientes tres subtramos (9, 11 y 13) son de Ec todo uno y luego un subtramo de zahorra natural (15). Estos subtramos sólo se van a citar en este punto, porque pertenecen a otra tesis doctoral llamada “Valorització d’Escòries d’Incineració de Residus Sòlids Urbans en Capes Granulars del Ferm”, tesis destinado al estudio de las EIRSU todo uno, en capas granulares (Izquierdo, 2005). Dos de estos subtramos son instrumentados, el primero de ellos se trata del compuesto por Ec todo uno y el otro es de zahorra natural, la instrumentación de éstos se realizó con el objetivo de realizar el control de las lixiviaciones de las capas granulares con Ec, como parte de la tesis doctoral mencionada. Estos cuatro subtramos están separados por suelo de origen natural de 3 metros de longitud cada uno (subtramo 8, 10, 12 y 14 y 16) y cubiertos en superficie por 15 cm de suelo mejorado, cuya longitud de cada uno de estos cuatro subtramos es de 5 m, con espesor 15 cm.

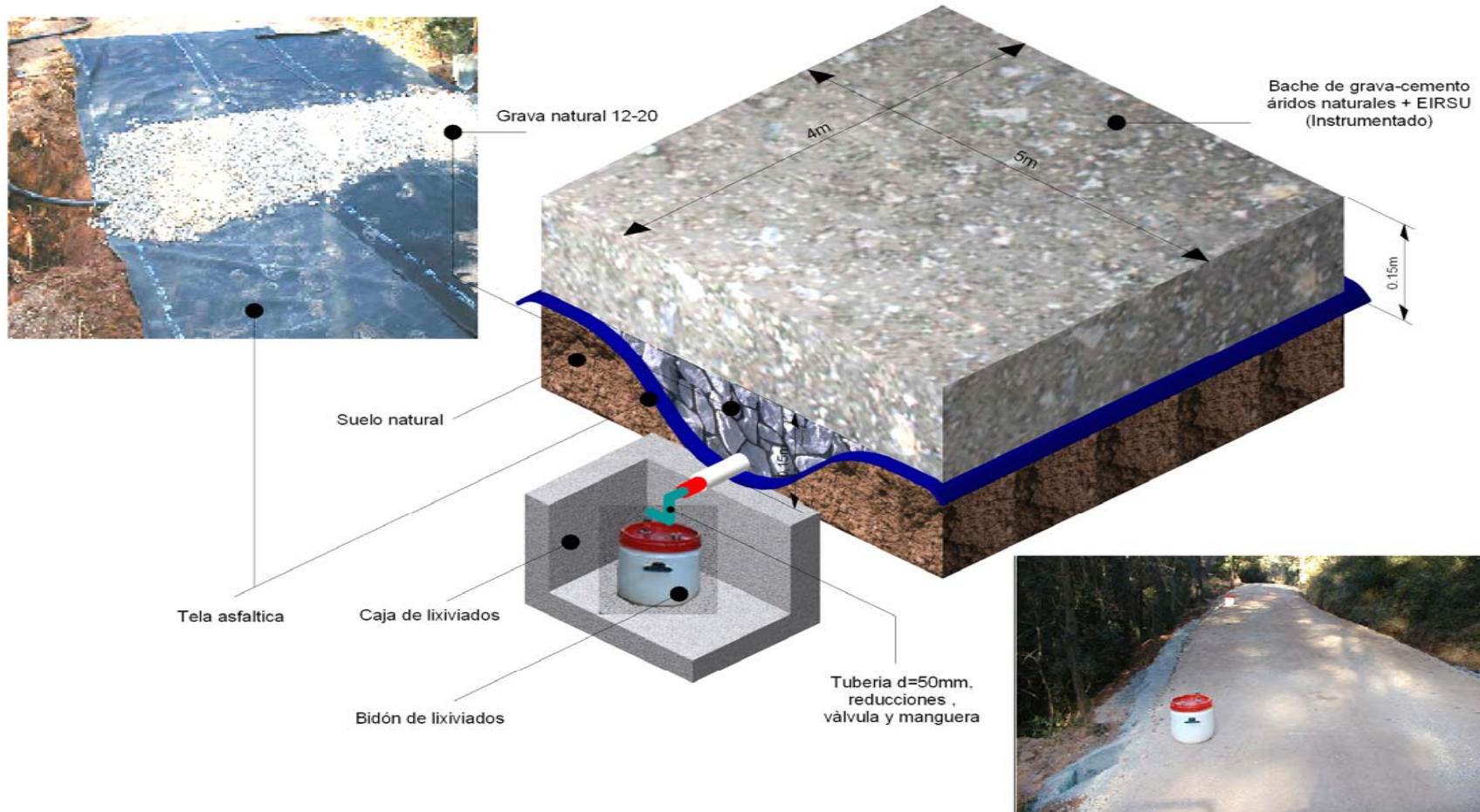
Por último está el subtramo 17 de G-C compuesto en su totalidad con áridos naturales, cuyo objetivo fue el de servir de referencia para los subtramos de G-C con Ec y arena natural. No obstante, las dosificaciones fueron distintas (no se llegó a un acuerdo con el constructor) y por lo tanto no se pudo relacionar con ninguno de los subtramos de G-C con Ec. Su longitud es de 5 m y con espesor en la capa superior de 15 cm de grava-cemento con áridos naturales (con la dosificación adoptada en este caso por Leiro S.A., para G-C). Además se puso en la capa inferior 15 cm de áridos naturales de fracción 12-20 mm.

En el siguiente esquema se indica la distribución en obra de cada uno de los subtramos mencionados en este apartado, así como el de la instrumentación del subtramo de G-C con Ec que se indica en el detalle 1.

ESQUEMA CONSTRUCTIVO DEL TRAMO EXPERIMENTAL DE CARRETERA Usando EIRSU y arena natural en hormigón compactado, grava-cemento y bacheo



DETALLE 1: TRAMO INSTRUMENTADO DE GRAVA CEMENTO Usando EIRSU y arena natural en un bache de grava-cemento, para recoger lixiviados



5.6.- PROCESO DE CONSTRUCCIÓN.

5.6.1 Estado inicial.

La foto 5.1 muestra el aspecto del estado inicial de la carretera. Como puede observarse se trata de una carretera con explanada en estado defectuoso, lo cual justifica que los vecinos del lugar no la hayan utilizado y que prefieran una carretera cercana más larga aunque en mejor estado.

La carretera está en una ladera contigua a ambos lados con bosque de robles, en tanto que la recogida del agua de escorrentía se canaliza siguiendo el borde de la carretera.

Foto 5.1: Carretera ubicada en un corte de montaña.



5.6.2 Trabajos previos.

Con el objetivo de conseguir una buena plataforma de trabajo, se hizo una preparación inicial de la carretera, hasta obtener los 4 m de ancho establecidos en el diseño, para posteriormente extender una capa de 10 cm de espesor de todo uno natural, de forma que quedase una superficie resistente, nivelada y uniforme. En la foto 5.2 se puede apreciar la extensión del todo uno natural, que se realizó con motoniveladora cubriendo la totalidad de la carretera y la subsiguiente compactación con rodillo vibrante. Esta preparación del suelo constituiría posteriormente la explanada común de los subtramos experimentales anteriormente mencionados.

Foto 5.2: Preparación de la explanada

5.6.3 Recogida de las Ec.

En los capítulos 3 y 4 se han estudiado las EIRSU de Mataró extraídas en el mes de Marzo del 2001, lo cual sirvió como un buen referente para el estudio previo del presente capítulo, ya que para el caso del tramo experimental de carretera, se utilizaron las EIRSU procedentes de la misma planta de RSU pero recogidas el mes de Noviembre del 2001. Estas fueron tratadas por Pedreres Rusc S.A., y cribadas más tarde por Áridos Pérez S.A., para separar los áridos finos que no se utilizaron en la carretera (foto 5.3). Estos áridos junto con los de origen natural fueron caracterizados, siguiendo el mismo procedimiento indicado en el capítulo 3, cuyos resultados se indicaran más adelante.

Foto 5.3: Proceso de cribado de las Ec.

5.6.4 Transporte, colocación y compactación del material.

El transporte de las mezclas de G-C y HC desde la planta a la obra, se efectuó mediante camiones volquete (bañeras) de 12 m³ de capacidad, en tanto que en la colocación en obra se tuvo cuidado en reducir la altura de caída del material desde la mezcladora al camión para evitar segregaciones. No fue necesario utilizar una lona para cubrir el camión transportado, ya que la distancia entre la planta y la obra fue muy corta y la temperatura fue de 10 y 15 °C, por lo que puede considerarse que no hubo pérdida de humedad del material.

Para el extendido del material se utilizó una motoniveladora. El empleo de este tipo de maquinaria fue muy práctico, ya que la empresa LEIRO S.A. disponía de la maquinaria apropiada para estos casos. La motoniveladora se adaptó perfectamente a esta obra rural, pese a algunas dificultades de carácter geométrico, como la estrechez y el mal estado inicial de la carretera.

Uno de los inconvenientes en la compactación, fue la desigualdad de los bordes de la carretera, más aún cuando uno de sus lados toca a la vertiente. Por ello se decidió confinar el material de los subtramos evitando a la vez sus posibles pérdidas pendiente abajo en caso de lluvias. De esta forma se aseguró una compactación adecuada y uniforme en todos los puntos sobre la anchura de la carretera. El confinamiento del material se logró con la construcción de pequeños muros de contención lateral a ambos lados de la obra, tal como se indica en la foto 5.4, cuya imagen muestra en la parte izquierda un pequeño muro de hormigón que limita a uno de los subtramos (subtramo de G-C instrumentado, que se detallará más adelante).

Foto 5.4: Pequeños muros de contención lateral.



De la compactación del material depende en gran medida la calidad del pavimento, de modo que para esta operación se tuvieron en cuenta las especificaciones PG-3/2002. Así, la densidad media no fue menor del 97% de la densidad óptima del ensayo proctor modificado y la densidad mínima en superficie no menor al 95%, requisitos que se cumplieron para cada una de las dosificaciones (datos obtenidos por el constructor).

El equipo usado en la compactación fue un rodillo vibrante (foto 5.5), que dio cerca de 9 pasadas hasta alcanzar la densidad especificada, las dos primeras sin vibración a efectos de alisar la capa sin producir desplazamientos (IECA, 2003). Se tuvo cuidado de no exceder este número de pasadas, ya que al tratarse de EIRSU de la fracción 5-20 mm, cuyo principal componente es vidrio y cerámica (al vidrio se le atribuye el bajo coeficiente de desgaste Los Ángeles de las EIRSU, -que se indicará más adelante en el apartado de caracterización de las Ec-), el exceso de pasadas podría triturar algunos materiales componentes de la Ec y dañar la superficie del pavimento.

Foto 5.5: Rodillo vibrante.



5.6.5 Acabado superficial.

Una vez extendido y compactado el hormigón se fratasó para conseguir un buen acabado de la superficie. No obstante, los resultados en la capa de rodadura fueron significativamente distintos, dando una superficie algo más lisa en el HC, en tanto que en la G-C se pudo apreciar una superficie sensiblemente rugosa (poco cierre superficial), en ambos casos, la capa de rodadura, presentó condiciones adecuadas para tráfico ligero.

En la foto 5.6, se puede apreciar las diferentes rugosidades superficiales del HC y la G-C con Ec (aunque resulta un tanto complicado definir los detalles en la imagen fotográfica).

Foto 5.6: Fratasado del subtramo de HC (izquierda) y G-C (derecha)



Como se ha venido mencionando en el capítulo 2, una de las desventajas de esta tecnología constructiva, fue la irregularidad superficial. Sin embargo, en esta carretera de baja intensidad de tráfico, no es un factor importante, dada la baja velocidad a la cual circulan los vehículos. En este caso, la regularidad obtenida se consiguió gracias a la experiencia del operador y se refinó posteriormente con fratasador mecánico (helicóptero) para lograr un buen acabado, evitándose las aportaciones de capa delgada que suelen levantarse. Previo al extendido del material se humedeció la explanada para que no absorbiera la humedad del hormigón, para posteriormente realizar el refinado, extendiendo sobre la capa superficial un pequeño espesor de lechada.

Con el objetivo de que la carretera arroje información real de su uso (extracción y posterior ensayo de testigos, así como el seguimiento de la carretera), se terminó la construcción del tramo con el extendido y compactado del árido natural todo uno, como se observa en la foto 5.7. De esta forma, se dejó la carretera totalmente preparada para el tránsito de vehículos.

Foto 5.7: Extensión del árido natural todo uno.

5.6.6 Losas de HC y G-C.

La longitud total de las cuatro losas de HC y la losa de G-C compactada es de 125 m (25 m para cada subtramo) cuya superficie se dejó a la vista (foto 5.8), ya que se planificó hacer un estudio detallado de la evolución de los subtramos con el tiempo y la respuesta a las cargas de tráfico, así como el control de posibles fisuras, manchas, etc.

En ningún subtramo de losas de HC (subtramos 1 al 4), ni en el subtramo de losa de G-C (subtramo 5), se realizó instrumentación alguna para recoger agua de lixiviado. En el caso del HC se descartó esta posibilidad ya que el material compactado es muy impermeable, y en el caso de la G-C, si bien no se instrumentó la losa, si se hizo en el subtramo de reparación local de baches. Por lo tanto no se obtuvieron datos de lixiviación in situ para los subtramos de losas compactadas, aunque las losas sí fueron de utilidad para determinar los test de lixiviación de laboratorio y evaluar el comportamiento mecánico (test de laboratorio sobre los testigos), y su posterior comparación con respecto a la losa de hormigón compactado construida con áridos convencionales.

Foto 5.8: Losas de HC y G-C.

La construcción de las losas, al no ser instrumentadas fue más sencilla; únicamente se realizó la extensión del material sobre la capa de áridos naturales que se habían extendido sobre el camino, posteriormente se compactó y finalmente se realizó el acabado superficial como se indicó en la foto 5.6.

5.6.7 Construcción de las cubetas destinadas a la simulación de baches.

Simultáneamente a la construcción de las losas de HC y G-C, se realizó la segunda tipología constructiva, que es la reparación local de baches, para lo cual se dejó una separación inicial de 10 m (subtramo 6 de suelo mejorado) entre las losas y el bache. En el bache correspondiente al subtramo 7 de G-C (con Ec y arena natural), se realizó la instrumentación para la recogida de lixiviados de la carretera, como parte de estudio ambiental que se verá más adelante en el capítulo 6.

5.6.7.1 Instrumentación de los baches.

Para simular la zona de bacheo, se excavó una cubeta de 5 m de longitud por 4 m de ancho de la carretera, seguidamente se aplanó la base de la cubeta, luego se cubrió con tela asfáltica GISCOLENE 120 (UNE 53586-86) para impermeabilizarlas (foto 5.9). Las pendientes interiores a los lados de la cubeta fueron semejantes a 3^0 y 4^0 . La instrumentación se realizó una vez excavados los huecos de las arquetas destinadas a alojar los recipientes de recogida de lixiviados (los detalles se verán más adelante).

Foto 5.9: Tela asfáltica para impermeabilizar la zona de bacheo.



A continuación en el fondo de las cubetas y sobre la tela asfáltica, se colocó un tubo de drenaje (con perforaciones circulares de medio centímetro en la parte media superior), perpendicular al trazado de la carretera y colocado con una pequeña pendiente, de tal manera que el tubo atravesase el bache de lado a lado recogiendo de esta forma los lixiviados filtrados del subtramo, y desembocaran en un bidón de recogida de lixiviados ubicado en uno de los extremos de la carretera, en tanto que el otro extremo de la tubería se selló para evitar pérdidas de agua filtrada.

Sobre el tubo se extendió una capa de árido grueso de origen natural, cuya función fue la de actuar como material de filtro (ya que no se comprobó previamente las condiciones de filtro de la G-C), para retener el paso de los finos que podrían colmatar las perforaciones del tubo e impedir el paso de las aguas de infiltración, asegurando un buen funcionamiento del sistema de drenaje y captación de las aguas. El conjunto se puede ver en la foto 5.10 y detalle 1 indicado anteriormente en la página 5.13.

Foto 5.10: Extendido de la tela asfáltica, tubería de captación de lixiviados y extensión de una capa de áridos gruesos de origen natural



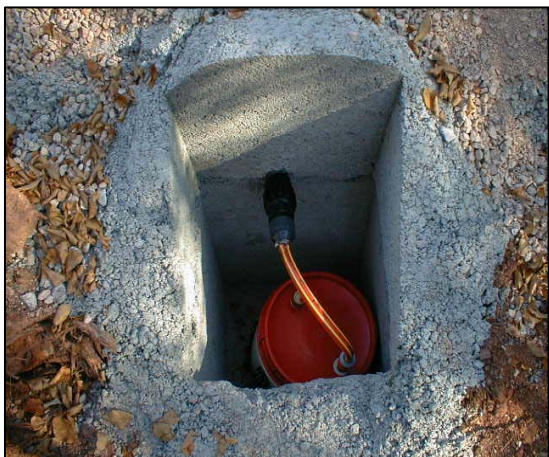
Sobre esta capa de árido grueso natural se puso la mezcla de grava-cemento con Ec y arena natural y una vez extendido todo el material, se inició el proceso de compactación con rodillo, y posteriormente se realizó el acabado superficial que se puede apreciar en la foto 5.6. El extendido de la G-C se puede apreciar en la foto 5.11.

Foto 5.11: Subtramo de G-C instrumentado.

5.6.7.2 Recogida de lixiviados.

Para recoger los lixiviados de la carretera se cavaron unos huecos para las arquetas destinadas a alojar los recipientes de recogida de lixiviados, bidones de 60 litros conectados al tubo de drenaje. Aunque tanto la G-C convencional como la G-C con EIRSU son sistemas poco permeables, se instrumentaron estos subtramos porque en principio se podría recoger mayor cantidad de lixiviados que en el HC y así poder determinar la evolución en su composición química.

En caso de no poder obtener lixiviados con una cierta frecuencia por ausencia de precipitaciones, se previó regar cada subtramo para obtener una cantidad de datos suficientemente representativos a corto plazo. En las fotos 5.12 y 5.13 y detalle 1 (indicado anteriormente en la página 5.13), se puede apreciar la arqueta y el bidón de recogida de lixiviados.

Foto 5.12: Arqueta de lixiviados.**Foto 5.13:** Bidón de recogida de lixiviados.

5.7.- CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS.

Como se ha venido mencionando a lo largo de este capítulo, en el tramo experimental de carretera, se utilizó las EIRSU procedentes de la incineradora de RSU de Mataró del mes de Noviembre del 2001, llamadas Ec o EIRSU de carretera, que fueron envejecidas más de tres meses y cribadas posteriormente, separando y seleccionando la fracción 5-12 mm, llamada Ec5-12 y 12-20 mm denominada Ec12-20.

Además se utilizó arena natural (fracción 0-5 mm) denominada AN2/0-5, ya que la fracción fina de las EIRSU no era adecuada para la fabricación del hormigón (capítulo 3) y finalmente el conglomerante usado fue el cemento tipo I resistente a sulfatos, ya que como se concluyó en el capítulo 3, la presencia de sulfatos en las EIRSU está relativamente cerca del límite recomendado en las normativas usadas, por lo que a la hora de determinar el tipo de cemento para la fabricación de hormigones, se utilizó esta información con tal de prever un posible exceso de sulfatos solubles. En el capítulo 4, tabla 4.1 se indican las características de este tipo de cemento.

En cuanto a la caracterización de las Ec, primero se realizó la etapa de muestreo, de donde se extrajo una cantidad de Ec lo suficientemente representativa para realizar los diferentes ensayos, siguiendo el mismo procedimiento que en las EM y ET del mes de Marzo del 2001, estudiadas en el capítulo 3. De esta forma se llegó a determinar el grado de homogeneidad entre las EIRSU de Mataró recogidas en diferentes fechas, y se comparó con las muestras de otra planta de incineración de RSU de Cataluña como es el caso de las ET. El principal objetivo de caracterizar las Ec fue el de establecer aquellas particularidades que podrían afectar a las matrices de HC y G-C fabricadas con este material y arena natural en el tramo experimental de carretera.

A continuación se indican los diferentes ensayos realizados sobre las Ec y en los mismos cuadros se muestran los resultados de EM y ET. El análisis se inicia con la caracterización física, seguido por la determinación de las curvas granulométricas, a continuación se indican los resultados del análisis químico, mineralógico y los resultados del estudio de durabilidad (mediante dos de los ensayos de durabilidad -ensayo de sulfato de magnesio y reacción álcali-sílice-).

El análisis de resultados de cada caracterización muestra los aspectos más relevantes con respecto a las tres EIRSU (EM, ET y Ec) y a sus fracciones (5-12 y 12-20 mm), así como la comparación con aspectos normativos que pueden ser de utilidad en la fabricación del HC y G-C. Se han omitido particularidades de procedimiento de cada ensayo, puesto que ya fueron mencionadas en el capítulo 3.

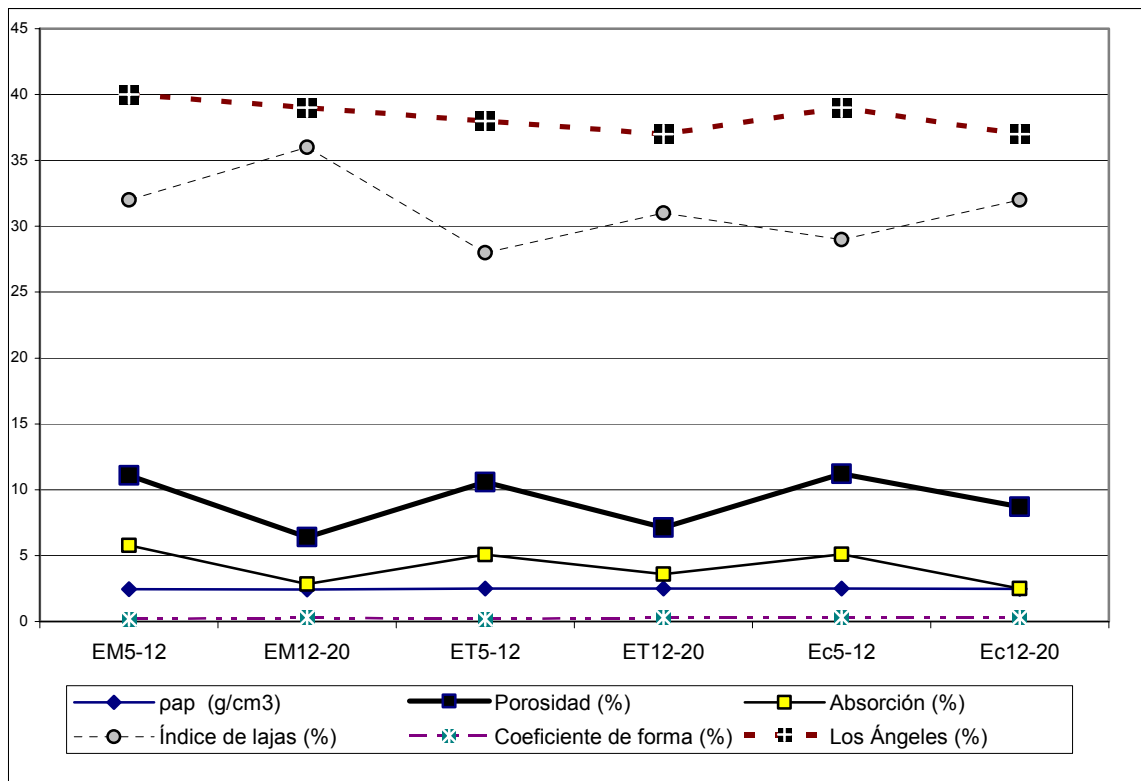
5.7.1 Características físicas.

Se creyó conveniente agrupar en un una sola tabla aquellas características que están relacionadas con el comportamiento físico y de meteorización de las EIRSU, tales como la densidad, porosidad, absorción, índice de lajas, coeficiente de forma, Los Ángeles y caras de fractura. Los resultados se indican en la tabla 5.1 y en el gráfico comparativo 5.1.

Tabla 5.1: Características Físicas de las EIRSU.

Características Físicas	EIRSU de Mataró		EIRSU de Tarragona		EIRSU carretera	
	EM5-12	EM12-20	ET5-12	ET12-20	Ec5-12	Ec12-20
ρ_{ap} (g/cm ³)	2,46	2,42	2,5	2,51	2,5	2,48
Porosidad (%)	11,09	6,41	10,58	7,14	11,2	8,7
Absorción (%)	5,77	2,84	5,07	3,58	5,1	2,5
Índice de lajas (%)	32	36	28	31	29	32
Coeficiente de forma (%)	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3
Los Ángeles (%)	40	39	38	37	39	37

Gráfico 5.1: Características Físicas de las EIRSU.



Las densidades de Ec son muy semejantes a EM y ET, siendo estas características inherentes a las EIRSU, cuyos valores de densidad siguen siendo algo más bajos que los áridos naturales, por lo que a la hora de realizar las dosificaciones, habrá que realizar las respectivas correcciones de densidad, de la misma forma que se realizó en el capítulo 4.

Las porosidades de las fracciones más gruesas son sensiblemente menores que las finas, no sólo por la menor superficie específica de sus partículas, sino porque las fracciones 5-12 mm contienen materiales más porosos (materiales de neofomación, ver capítulo 3), mientras que las fracciones gruesas contienen materiales poco porosos como el vidrio. Por lo tanto, las absorciones de las fracciones finas son también más elevadas que las de las gruesas. Comparando Ec con EM, las Ec tienen porosidades un tanto más altas en Ec12-20 que EM12-20 hecho que es un efecto directo de los materiales constituyentes de Ec, ya que como se verá en el apartado 5.7.5 de materiales componentes, las Ec tienen porcentajes de materiales de neofomación un tanto más elevados que los de las EM. Por otro lado, estas diferencias son propias de la heterogeneidad de las muestras de EIRSU. A mayor porosidad en las Ec mayor absorción de agua, lo que influye negativamente en el comportamiento del HC y G-C. No obstante, las absorciones y porosidades son bastante cercanas a las EM las cuales resultaron no perjudiciales en las matrices de HC y G-C (capítulo 4).

El índice de lajas de las Ec es sensiblemente menor que en las EM y semejante a las ET, se cree que esta característica es señal de mayor cantidad de materiales de neofomación y menor de vidrio en ambas EIRSU. En todo caso el PG-3/2002 limita el índice de lajas a valores menores o iguales a 35 (para calzadas con tráfico T3 y T4), en el caso de las Ec los valores son de 29 y 32, por lo que se considera que las muestras de Ec son aceptables para los límites establecidos por el pliego para HC y G-C.

En cuanto al coeficiente de forma, los resultados indican que las Ec son bastante similares a EM y ET, aunque con formas sensiblemente más redondeadas, que mejoran la trabajabilidad dentro de mezclas de HC y G-C dando cierta garantía a la buena compactación.

El coeficiente Los Ángeles es bastante semejante en todas las muestras de EIRSU estudiadas. No obstante, las Ec tienen coeficientes sensiblemente más bajos, lo que puede significar un menor contenido de vidrio en ambas franjas y seguramente mayor porcentaje de material más resistente a la fragmentación. Estos valores siguen siendo ligeramente superiores al límite de 35 recomendado en el PG-3/2002 (artículo 513 para tráfico pesado -T1-, tráfico medio -T2- y valor de referencia para árido natural). Sin embargo, en el capítulo 4 se demostró que estos coeficientes Los Ángeles, no afectaron considerablemente las propiedades mecánicas del HC y G-C con EIRSU y arena natural. Por lo tanto se espera que este particular no incida negativamente en el comportamiento del tramo experimental de carretera.

Pese a que en la tabla 5.1 no se incluyó el análisis de caras de fractura, sí se realizó esta caracterización. Se evaluó de la misma forma que se hizo en el capítulo 3 y los resultados obtenidos son similares a los de EM y ET, destacando que las fracciones 12-20 mm tienen menos caras de fractura que 5-12.

En cuanto a la comparación de los resultados de caracterización analizados hasta el momento, entre fracciones y muestras de EIRSU, se observó cierta coincidencia con los determinados para EIRSU todo uno del Informe V (2001). No obstante, estos valores pierden vigencia a la hora de comparar con los áridos naturales, cuyos resultados son sensiblemente diferentes en algunas de las características valoradas. Desde luego, estas características de las EIRSU podrían ser mejoradas, al disminuir el porcentaje de vidrio doméstico o a su vez añadir áridos gruesos de origen natural, que corregirían algunas deficiencias del árido, al mismo tiempo que cubrirían ciertas carencias granulométricas de las EIRSU.

5.7.2 Granulometría de las EIRSU.

En la tabla 5.2 se muestran los porcentajes que pasan por los tamices UNE. No obstante, para visualizar mejor la distribución de los granos de la EIRSU estudiadas, se agrupó las granulometrías en fracciones (5-12 y 12-20 mm) como se muestran en los gráficos 5.3 y 5.4.

Tabla 5.2: Granulometría de las EIRSU.

Granulometría	EIRSU de Mataró		EIRSU de Tarragona		EIRSU carretera	
	EM5-12	EM12-20	ET5-12	ET12-20	Ec5-12	Ec12-20
Abertura del tamiz UNE (mm)	Porcentaje de EIRSU que pasa los tamices UNE					
20	100%	100%	100%	100%	100%	100%
16	100%	94%	100%	92%	100%	98%
12,5	100%	64%	100%	58%	100%	74%
10	92%	28%	94%	24%	94%	35%
8	71%	13%	75%	11%	66%	14%
6,3	46%	8%	50%	6%	26%	6%
5	29%	6%	28%	5%	8%	4%
4	24%	5%	22%	4%	7%	3%
2	15%	4%	15%	3%	7%	3%
1	13%	3%	12%	2%	7%	3%
0,5	11%	3%	12%	2%	6%	3%
0,25	10%	2%	10%	2%	5%	2%
0,125	8%	2%	8%	1%	4%	2%
0,063	7%	1%	5%	1%	3%	1%

Gráfico 5.2: Granulometría de las EM5-12, ET5-12 y Ec5-12.

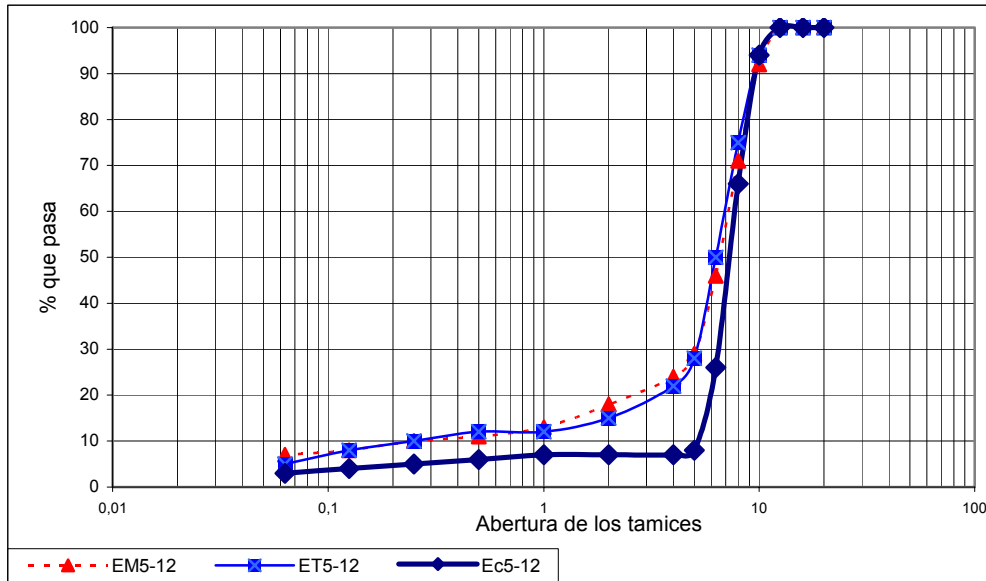
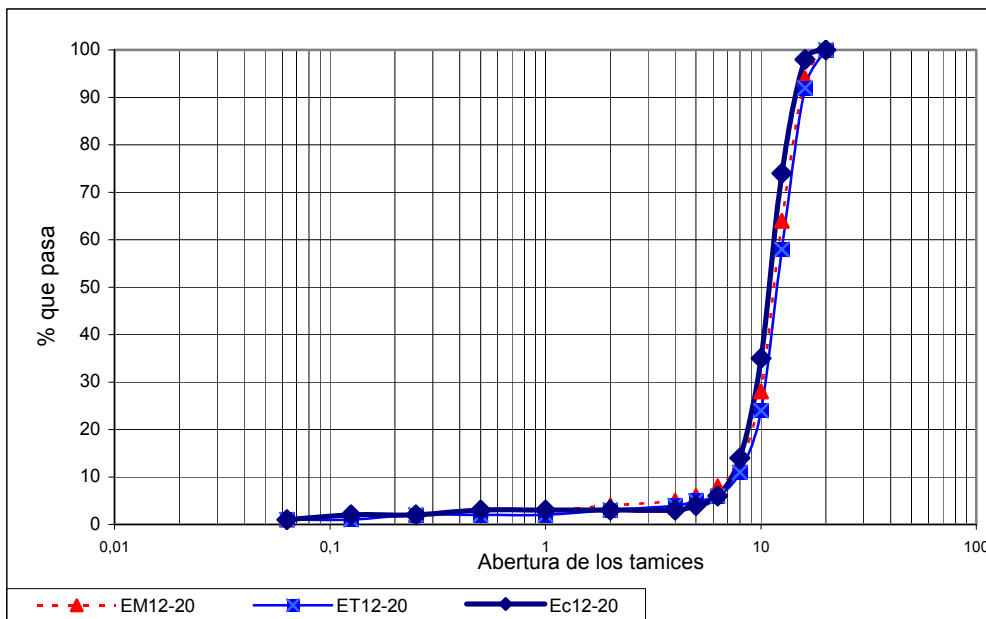


Gráfico 5.3: Granulometría de las EM12-20, ET12-20 y Ec12-20.



Como se puede ver, en la fracción 5-12 las Ec tienen menos finos (0-5 mm) que EM y ET. Esta fracción 5-12 tiene una buena distribución granulométrica, más acorde con la denominación 5-10 mm, que EM y ET, aunque mantiene la carencia de la fracción retenida en el tamiz 12,5 mm. La menor presencia de finos de 0-5 mm y la buena distribución de los gruesos, garantiza un mejor comportamiento en comparación con EM y ET, para mezclas con cemento en HC y G-C. En cuanto a la curva granulométrica de la fracción 12-20 mm de Ec, se puede afirmar que es bastante semejante a EM y ET, y conserva cierta característica común como es la carencia de la fracción 16-20 mm, dotando a las muestras de EIRSU unas medidas de granos algo menores que sus

denominaciones en ambas fracciones, característica que es también habitual en las EIRSU (Izquierdo, 2005).

Las curvas granulométricas de las Ec, junto con la arena natural AN2/0-5 (que se indicará más adelante, en el apartado de dosificación), y el cemento, sirven para realizar diferentes dosificaciones tanto para HC como para G-C, ya que como el PG-3/2002 indica, las dosificaciones se deben realizar mediante el ajuste granulométrico del los áridos junto con el conglomerante, de la misma forma que se realizó en el capítulo 4 y que se indicará en el presente capítulo para Ec.

5.7.3 Composición química.

La composición química se obtuvo determinando la composición elemental de las Ec, donde se muestra el contenido de elementos mayoritarios y elementos minoritarios. Además se incluyen los resultados de contenido de sulfatos totales, sulfatos solubles en agua, azufre y cloruros solubles en agua, así como el contenido de materia orgánica determinado por pérdida de peso por calcinación, como indica la tabla 5.3, donde también se incluyen los resultados obtenidos en las EM y ET. Con el objetivo de visualizar los resultados de las EIRSU estudiadas, se presentaron los gráficos comparativos 5.4, 5.5 y 5.6.

Tabla 5.3: Resultados de la composición química

Composición Química.	EIRSU de Mataró		EIRSU de Tarragona		EIRSU carretera	
	EM5-12	EM12-20	ET5-12	ET12-20	Ec5-12	Ec12-20
Composición elemental.	Porcentaje de elementos mayoritarios en forma de óxidos					
Mg	1,12	1,05	1,35	2,09	2,02	1,69
Ca	14,73	12,87	12,64	10,14	18,59	13,40
Fe	3,98	2,94	5,16	4,85	4,46	3,82
Si	53,76	60,63	43,96	52,12	51,13	57,78
Al	2,41	2,03	3,97	2,33	8,12	2,18
K	1,38	1,34	1,39	1,34	2,05	1,54
Mn	0,101	--	0,18	--	0,11	--
Composición elemental.	Minoritarios en mg/kg					
P	3.900	2.100	5.500	2.300	3.750	2.070
Na	61.500	70.800	59.000	67.900	51.700	69.100
Pb	3.500	1200	5.700	2.380	3.850	2.600
Cu	6.700	1.900	10.500	2.000	6.200	4.000
Zn	2.900	1.950	4.800	2.400	3.110	2700
Cr	700	700	710	670	900	700
Sulfatos totales, sulfatos solubles en agua, azufre y cloruros solubles en agua (%).						
Sulfatos solubles en acido	0,67	0,48	0,76	0,41	0,502	0,461
Sulfatos solubles al agua	0,014	0,04	0,07	0,08	0,06	0,03
Cloruros	0,42	0,15	0,33	0,21	0,13	0,07
Azufre	0,18	0,14	0,06	0,14	0,14	0,005
Contenido de materia orgánica por calcinación (%).						
Pérdida de peso	2,02	0,96	2,04	0,87	2,67	1,46

Composición elemental de las EIRSU.

Gráfico 5.4: Composición elemental de las EIRSU. Elementos mayoritarios (%).

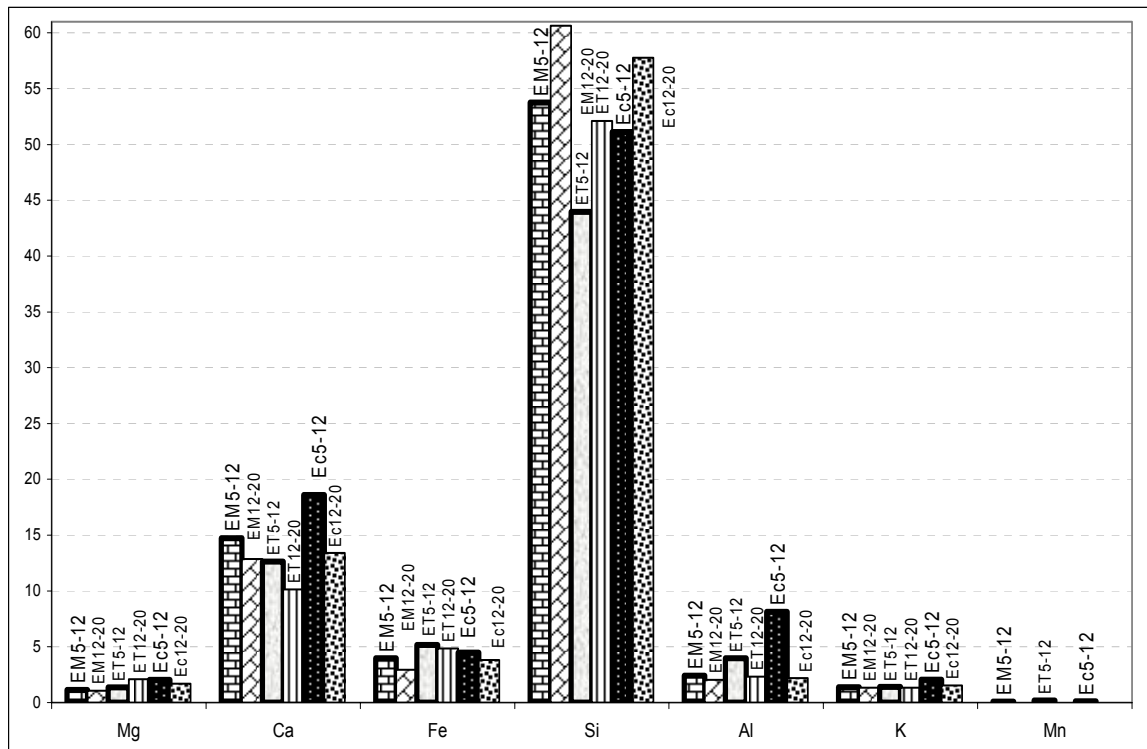
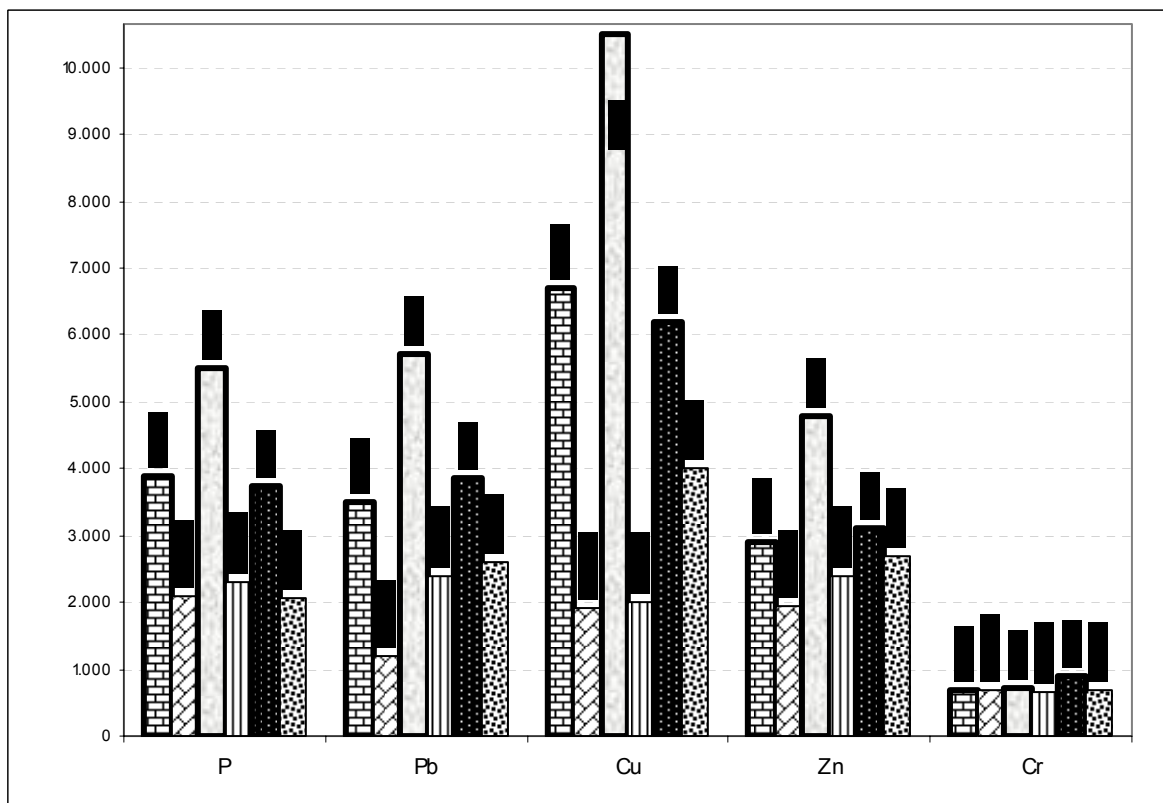


Gráfico 5.5: Composición elemental de las EIRSU estudiadas. Elementos minoritarios (mg/kg).



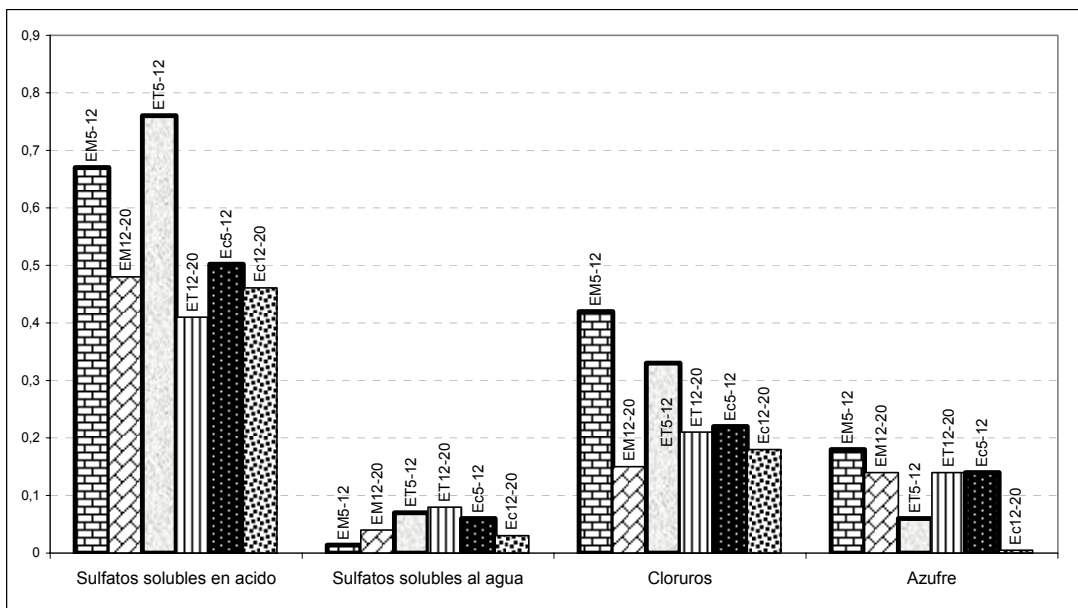
Como se puede ver en el gráfico 5.4, el compuesto más abundante es la sílice -SiO₂- (en forma de óxido), donde la fracción 12-20 sigue siendo la de mayor contenido, especialmente en las EM, seguidas por Ec y finalmente por ET, coincidiendo con el contenido de materiales componentes de las EIRSU que se indican en el apartado 5.7.5. La cal -CaO- es el segundo compuesto con mayor presencia en las EIRSU, y sustancialmente en las Ec, lo que podría ser efecto de algún incremento de materiales de derribo. Los siguientes elementos presentes en este rango son el Fe, Al, Na, K y Mg que están en porcentajes semejantes a los materiales geológicos (Informe V, 2001).

El contenido de Fe en Ec es semejante a ET y por tanto mayor que EM, lo cual indica que hay mayor material de neoformación con altos contenidos de metales fundidos, y materiales metálicos especialmente en las fracciones 5-12 mm. En la franja 12-20 predominan los materiales cerámicos y vidrio. Esto se puede apreciar en la presencia importante de Si y Ca, en tanto que el resto de elementos presentan composiciones más elevados en la fracción 5-12 mm.

De los resultados obtenidos se desprende que las Ec tienen una composición de elementos mayoritarios semejante a los materiales geológicos. En cuanto a los elementos minoritarios (gráfico 5.5) como son los metales pesados Cr, Pb, Cu, Mg, Zn, y Na son claramente superiores a los minerales de áridos naturales, especialmente por lo que se refiere al contenido de Cu y Zn, coincidiendo con el análisis de caracterización de EM y ET (capítulo 3). La composición de EC se puede situar en un valor intermedio entre estas dos EIRSU.

Sulfatos totales, sulfatos solubles en agua, azufre y cloruros solubles en agua.

Gráfico 5.6: Sulfatos totales, sulfatos solubles en agua, azufre y cloruros solubles en agua.



En los resultados de Ec de la tabla 5.3 se observa que los sulfatos solubles en ácido, sulfatos solubles en agua y cantidades de azufre de todas las muestras de EIRSU están dentro de los límites señalados en el capítulo 3. Sin embargo, al ser materiales heterogéneos, se ha decidido continuar con la decisión de optar por cementos resistentes al ataque por sulfatos, para evitar posibles expansiones del hormigón por ataque del SO_4 a la pasta y la formación de ettringita. En cuanto a los cloruros, las Ec continúan teniendo valores altos, lo que podría ser peligroso si se utilizaran en hormigón armado.

De los resultados obtenidos, es necesario saber si estos compuestos están fijados o pueden liberarse al medio, por lo que posteriormente se hace un estudio de lixiviación. Además, es importante determinar el contenido de materia orgánica, como se indica en el siguiente apartado.

Contenido de materia orgánica.

Por lo que se refiere al contenido de materia orgánica por calcinación de Ec, según los resultados de la tabla 5.3, las Ec continúan siendo bastante bajas, en comparación con los límites de la Orden del Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña (del 15 de Febrero de 1996), en el que estipula como valor máximo el 5%, en tanto que Ec (semejante a EM y ET) tiene porcentajes de 1,46 a 2,67 %.

5.7.4 Análisis mineralógico.

Los resultados de la composición mineralógica se indican en la tabla 5.4 y en los gráficos 5.7 y 5.8, que incluyen a modo de referencia las gráficas de difracciones de las EM y ET estudiadas en el capítulo 3.

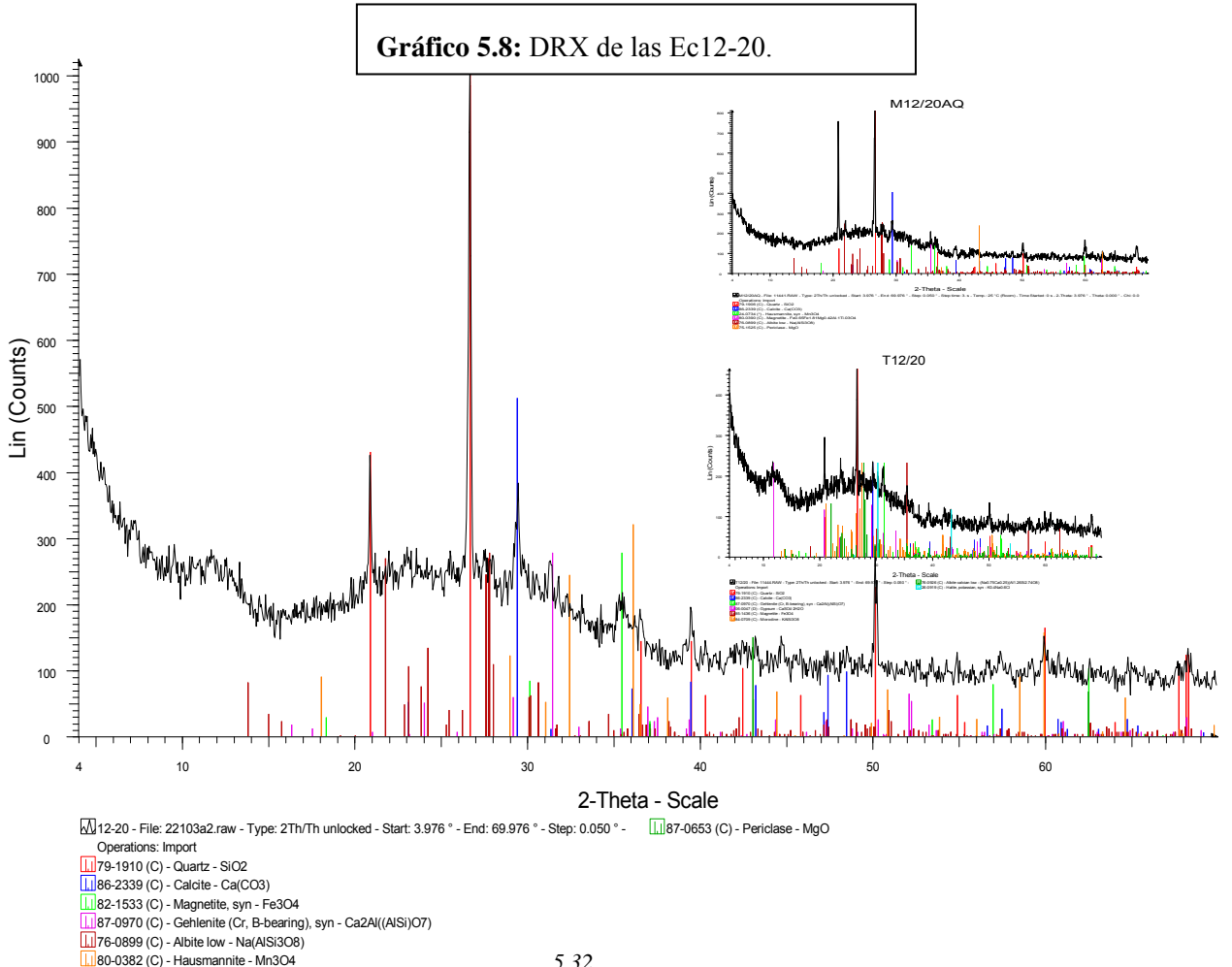
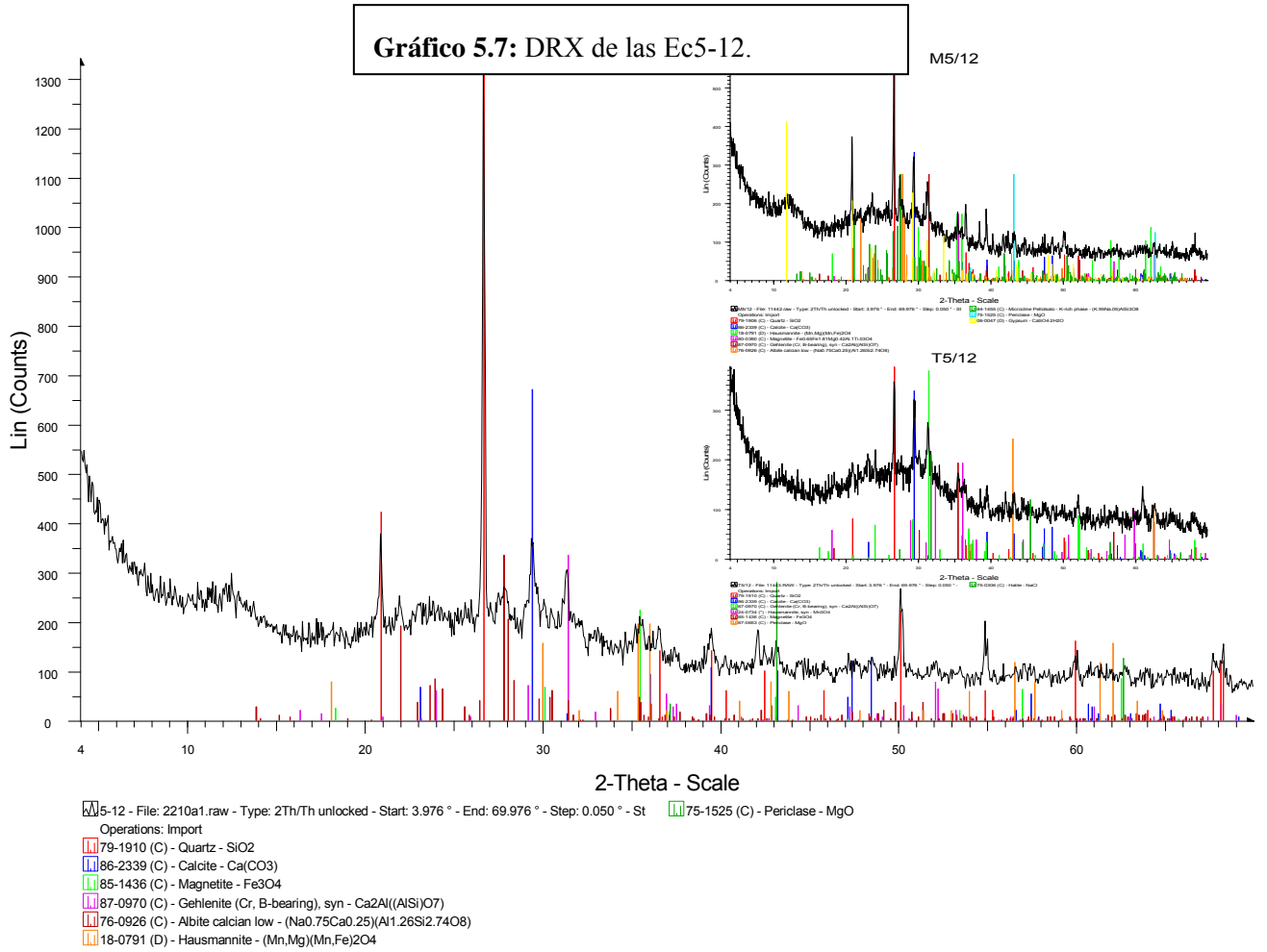
Tabla 5.4: Composición mineralógica.

Composición Mineralógica		EIRSU de Mataró		EIRSU de Tarragona		EIRSU carretera	
Familia de compuestos	Nombre del compuesto	EM5-12	EM12-20	ET5-12	ET12-20	Ec5-12	Ec12-20
Silicatos cálcicos	Gehlenita	P	A	P	P	P	P
Compuestos de Fe	Magnetita	P	P	P	P	P	P
Compuestos de Ca	Calcita	P	P	P	P	P	P
	Yeso	P	A	Pr	P	Pr	A
Compuestos de Mg	Periclasa	P	P	P	S	P	P
Otros Compuestos	Cuarzo	P	P	P	P	P	P
	Halita	Pr	S	P	P	Pr	Pr
	Microcline	P	Pr	Pr	P	Pr	Pr
	Hausmanite	P	P	P	A	P	P
	Albita	P	P	A	P	P	P

Presente (P): Cuando se ha detectado el compuesto en las tres muestras. Ausente (A): No se ha detectado en ninguna muestra.

Probable (Pr): Cuando el compuesto se ha detectado en pequeña cantidad o en una o dos muestras.

Similar (S): Cuando la identificación del compuesto es compleja y puede confundirse con otros compuestos de estructura similar.



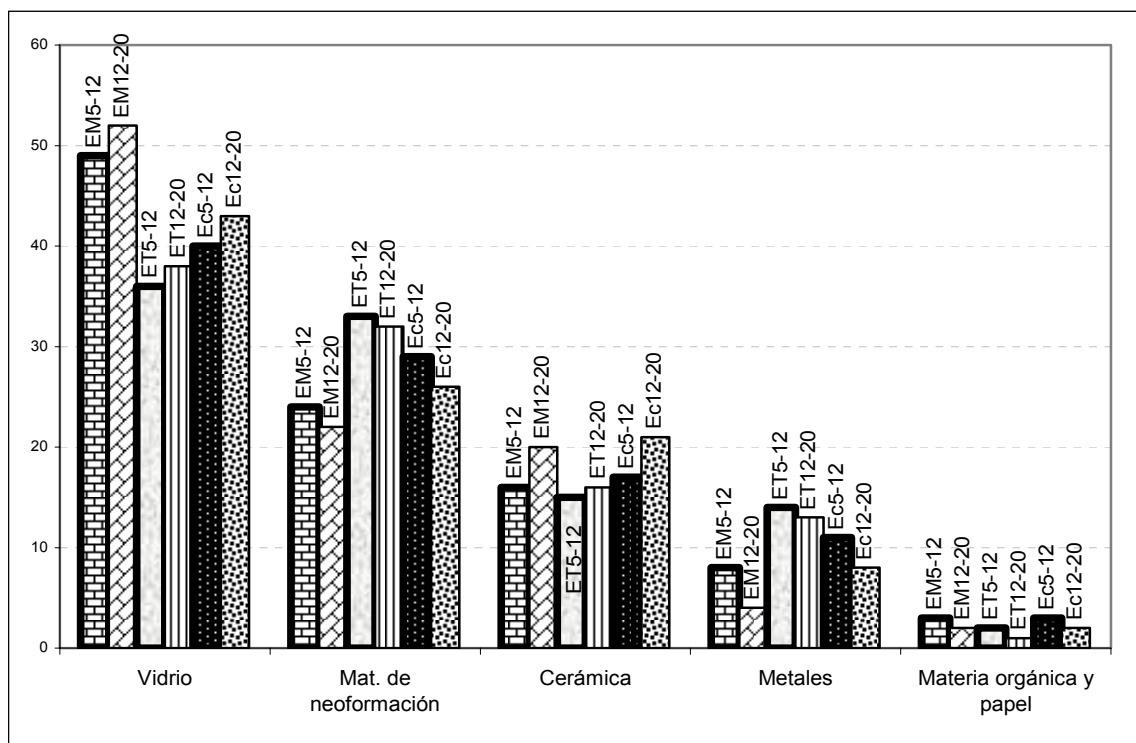
Los difractogramas de Ec de las fracciones 5-12 y 12-20 mm, de los gráficos 5.7 y 5.8 (y a modo de referencia los difractogramas de EM y ET incluidos según la fracción que se puede apreciar a mayor escala en el capítulo 3), indican que la fase vítrea aumenta con la medida del grano, ya que los espectros presentan picos muy altos que dificultan la identificación de los minerales que están en pequeñas proporciones e incluso llegan a disfrazarlos, como sucedió con las EM y ET. No obstante, el análisis de Ec es semejante al de EM, ya que los minerales encontrados son prácticamente los mismos, con importantes presencias de cuarzo, calcita, periclasa, magnetita, así como otros minerales como albita, gehlenita, y hausmanita, etc. Estos resultados reflejan la homogeneidad mineralógica entre las EIRSU de la misma planta, lo cual puede atribuirse al tipo de planta de tratamiento.

5.7.5 Materiales componentes de las Ec.

Tabla 5.5: Materiales componentes de las EIRSU.

Materiales Componentes	EIRSU de Mataró		EIRSU de Tarragona		EIRSU carretera	
	EM5-12	EM12-20	ET5-12	ET12-20	Ec5-12	Ec12-20
Vidrio	49	52	36	38	40	43
Mat. de neoformación	24	22	33	32	29	26
Cerámica	16	20	15	16	17	21
Metales	8	4	14	13	11	8
Materia orgánica y papel	3	2	2	1	3	2

Gráfico 5.9: Materiales componentes de las EIRSU.



En la tabla 5.5 y en el gráfico 5.9 se puede apreciar que las EM mantienen un sensible incremento en la cantidad de vidrio comparado con las ET y Ec. No obstante, en EM y Ec habrá que tomar en cuenta la fracción de sílice que podría reaccionar con los álcalis del cemento en su aplicación en hormigones. En cualquier caso, los resultados mantienen una coherencia con los obtenidos en el análisis de la composición química, donde el Si es un tanto mayor en EM, seguido por Ec y luego ET. El contenido de Fe es mayor en ET, que en Ec y finalmente en EM. Se puede ver en el gráfico 5.9 que el contenido de metales y de material de neoformación sigue la misma distribución. En cuanto a la cantidad de cerámica, y cantidad de materia orgánica (incluido el papel), tanto Ec como EM tienen porcentajes bastante similares, en lo cual hay una influencia directa del sistema de reciclaje en Mataró.

Como se puede apreciar en el gráfico 5.9 el vidrio es el material mayoritario en todas las muestras, especialmente en las fracciones gruesas, lo cual es causa directa del alto coeficiente Los Ángeles de las EIRSU. Después del vidrio el material de neoformación es el que se encuentra en mayor porcentaje, y su franja más fuerte está entre las fracciones 10-14 mm. Se puede afirmar entonces, que Ec tiene mayores porcentajes de este material con lo cual si bien su porosidad aumenta, sus características geométricas mejoran. El tercer material importante cuantitativamente son los restos de cerámica y materiales de demolición, seguido por los materiales metálicos y finalmente la materia orgánica y papel que continúan siendo muy escasos en todas las fracciones.

De manera general se puede decir que Ec tiene un contenido de materiales semejante (aunque sus porcentajes de participación varían) a EM y ET, con pequeños porcentajes más elevados de vidrio en EM, de metales y de neoformación en ET, en tanto que conservan proporciones parecidas de materia orgánica. A partir de estos resultados se puede prever que las Ec podrían dar respuestas parecidas a las EM aplicadas en HC y G-C (capítulo 4).

5.7.6 Estudio de durabilidad de las Ec.

El estudio de durabilidad se realizó mediante los ensayos de reacción álcali-sílice y sulfato de magnesio, de la misma forma que se realizó en el capítulo 3 y 4 de la presente tesis, con las EM y ET. Los resultados se indican en la tabla 5.6 y en el gráfico 5.10.

Tabla 5.6: Resultados del estudio de durabilidad de las EIRSU.

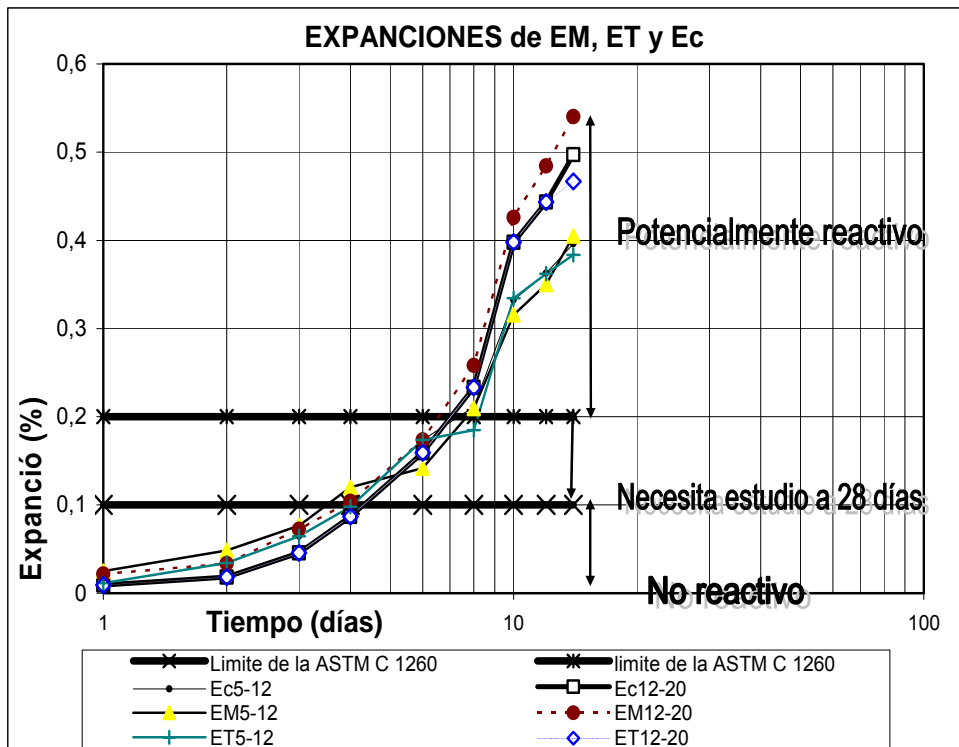
Durabilidad de las EIRSU	EIRSU de Mataró		EIRSU de Tarragona		EIRSU carretera	
	EM5-12	EM12-20	ET5-12	ET12-20	Ec5-12	Ec12-20
Reacción álcali-árido.	0,41	0,54	0,38	0,47	0,40	0,50
Sulfato de Magnesio.	10	8	8	6	9	7

Como se ha venido mencionado a lo largo de esta tesis, la durabilidad del hormigón es la capacidad del material para resistir las acciones del medioambiente, ataques físicos, químicos u otros procesos de deterioro durante el ciclo de vida para el cual fue proyectado, con mínimo mantenimiento.

Resulta evidente según los resultados de la tabla 5.6 y gráfico 5.10, que las Ec tienen un comportamiento semejante a EM y ET en ambas fracciones, por lo tanto se concluye que la utilización de las muestras de Ec como áridos en HC y G-C no provocarán cambios volumétricos por efecto de los ciclos de hielo-deshielo que afecten irreversiblemente al hormigón.

Según los resultados de la tabla 5.6. La sílice (reactiva) de las Ec es potencialmente reactiva a los álcalis del cemento, lo cual podría representar una agresividad a las matrices de HC y G-C con Ec. Este tipo de reacciones podrían comprometer la durabilidad de las matrices a largo plazo. En consecuencia se recomienda realizar un seguimiento de la durabilidad del HC y la G-C a largo plazo.

Gráfico 5.10: Reacción álcali – sílice de las EIRSU.



5.8.- DOSIFICACIÓN DE LA GRAVA-CEMENTO Y DEL HORMIGÓN COMPACTADO.

5.8.1 Generalidades.

Una vez realizada la caracterización de los áridos que se utilizaron en el tramo experimental, se procedió a determinar la dosificación tanto para los subtramos de HC como para los de G-C (matrices compactas con áridos de Ec y AN2/0-5). El procedimiento fue el mismo que se indicó en capítulo 4 de la presente tesis, donde se intentó adaptar las EIRSU a las recomendaciones del PG-3/2002 y del IECA.

Así, se realizó el estudio teórico para encontrar los porcentajes de participación de los áridos, luego se hizo el estudio experimental con el objetivo de determinar la cantidad de agua necesaria de cada una de las matrices compactas y seguidamente se procedió a la corrección de la dosificación por diferencia de densidades (siguiendo el procedimiento del capítulo 4). Con los datos de dosificación, se siguieron dos líneas de control de las matrices, por un lado se realizó la construcción del tramo de carretera, y el posterior seguimiento de su comportamiento frente a las diferentes sollicitaciones in situ, y por otro, el control en el laboratorio, mediante la fabricación de probetas con la misma dosificación y áridos del tramo experimental, con el objetivo de comparar sus respuestas mecánicas en el plazo de realización del presente estudio.

5.8.2 Nomenclatura utilizada.

A modo de referencia se compararon todos los valores encontrados sobre el estudio del tramo experimental de carretera con los determinados en el laboratorio tanto para EM como para Ec. Por lo tanto, se ha creído conveniente iniciar este estudio con un breve resumen de la nomenclatura que se ha venido utilizando en el capítulo 4 para las probetas de HC y G-C con EM, así como en las denominaciones utilizadas en el presente capítulo, tanto para las probetas fabricadas en el laboratorio con Ec, como para los testigos extraídos del tramo experimental de carretera. La nomenclatura mencionada se indica en la tabla 5.7 para probetas con EM, la tabla 5.8 para probetas con Ec y las tablas 5.9, 5.10 para los testigos de la carretera.

Tabla 5.7: Nomenclatura de las probetas proctor modificado -PM- fabricadas en el laboratorio con mezclas de muestras de EM del mes de Marzo de 2001 de las fracciones 5-12 mm y 12-20 mm + AN1/0-5 (capítulo 4).

Probetas	Nomenclatura general	28 días de edad	90 días de edad	365 días de edad
Probetas PM fabricadas en el laboratorio con: EM5-12 + EM12-20 + AN1/0-5 para HC	HCEM	HCEM28d	HCEM90d	HCEM365d
Probetas PM fabricadas en el laboratorio con: EM5-12 + EM12-20 + AN1/0-5 para G-C	G-CEM	G-CEM28d	G-CEM90d	G-CEM365d

Tabla 5.8: Nomenclatura de las probetas proctor modificado -PM- fabricadas en el laboratorio con mezclas de muestras de Ec (EIRSU de Mataró del mes de Noviembre de 2001 utilizadas en la carretera) de las fracciones 5-12 mm y 12-20 mm + AN2/0-5.

Probetas	Nomenclatura general	28 días de edad	90 días de edad	365 días de edad
Probetas PM fabricadas en el laboratorio con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para HC	HCEc	HCEc28d	HCEc90d	HCEc365d
Probetas PM fabricadas en el laboratorio con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para G-C	G-CEc	G-CEc28d	G-CEc90d	G-CEc365d

Tabla 5.9: Nomenclatura de los testigos extraídos del tramo experimental de carretera, fabricados con muestras de Ec de las fracciones 5-12 mm y 12-20 mm + AN2/0-5.

Testigos	Nomenclatura General	28 días de edad	90 días de edad	365 días de edad
Testigos extraídos de la carretera con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para HC	THCEc	THCEc28d	THCEc90d	THCEc365d
Testigos extraídos de la carretera con: Ec5-12 + Ec12-20 + AN2/0-5 para G-C	TG-CEc	TG-CEc28d	TG-CEc90d	TG-CEc365d

Tabla 5.10: Nomenclatura de los testigos extraídos de la carretera experimental, fabricados con muestras de áridos naturales utilizados en la carretera.

Testigos	Nomenclatura General	28 días De edad	90 días de edad	365 días de edad
Testigos extraídos de la carretera en el subtramo de HC realizado con áridos naturales	THCN	THCN28d	THCN90d	THCN365d
Testigos extraídos de la carretera en el subtramo de G-C realizado con áridos naturales	TG-CN	TG-CN28d	TG-CN90d	TG-CN365d

5.8.3 Estudio Teórico.

Como se mencionó anteriormente, para realizar las dosificaciones utilizadas en el tramo experimental de carretera, se hizo un estudio teórico, donde se realizaron varias curvas granulométricas tentativas (8 tanteos en cada caso, los mismos que se indican en el anexo A.3) para HC y G-C con Ec, denominados HCEc y G-CEc respectivamente, hasta determinar el porcentaje de cemento más adecuado y que además cumpliera con las recomendaciones del PG-3/2002. Una vez determinados estos porcentajes de cemento, se variaron los porcentajes de áridos de forma que las curvas del conjunto fueran las más próximas a los husos recomendados en el mismo pliego. En la tabla 5.11 y el gráfico 5.11 se indica la dosificación más conveniente encontrada para el HCEc y en la tabla 5.12 y gráfico 5.12 para la G-CEc. Además en cada una de estas tablas y gráficos se añaden las dosificaciones adoptadas en el estudio con EM del capítulo 4, para comparar los valores obtenidos del estudio de HCEM y G-CEM. En las tablas se indican las dosificaciones en el siguiente orden: en la columna 1 se encuentra la abertura de cada tamiz, en las siguientes 4 columnas están los porcentajes de materiales del tramo que pasan por los mencionados tamices y en las columnas denominadas como “Ajuste” se encuentran las dosificaciones seleccionadas ya sean para el HCEc, G-CEc como para HCEM y G-CEM.

Tabla 5.11: Dosificación del HC con EIRSU.

Tamiz (mm)	Cemento	Ec12-20	Ec5-12	AN2/0-5	Ajuste	Ajuste
	14 %	38 %	16 %	32 %	HCEc	HCEM
20	14	38	16	32	100	100
16	14	37	16	32	99	98
12,5	14	28	16	32	90	86
10	14	13	15	32	74	71
5	14	2	1	31	48	52
2	14	1	1	23	39	39
0,5	14	1	1	11	27	25
0,063	14	0	0	1	16	17

Gráfico 5.11: Dosificación del HCEc (Cemento:14%; Ec12-20:38%; Ec5-12:16%; AN2/0-5:32%).

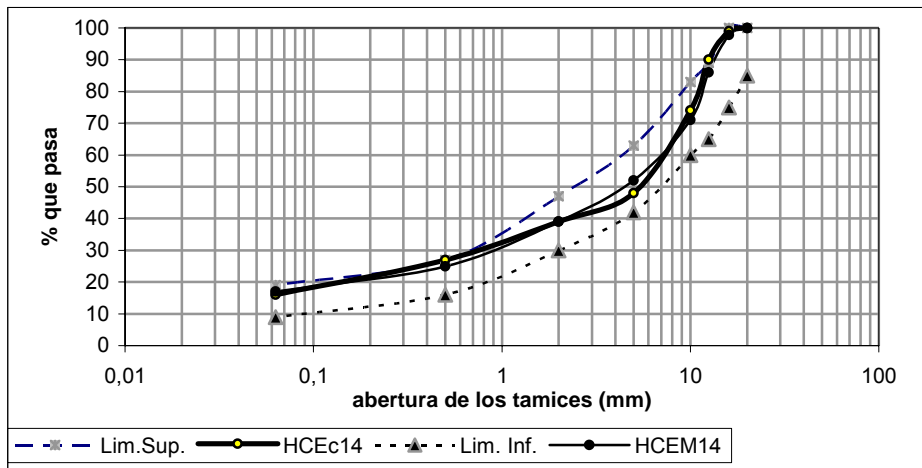
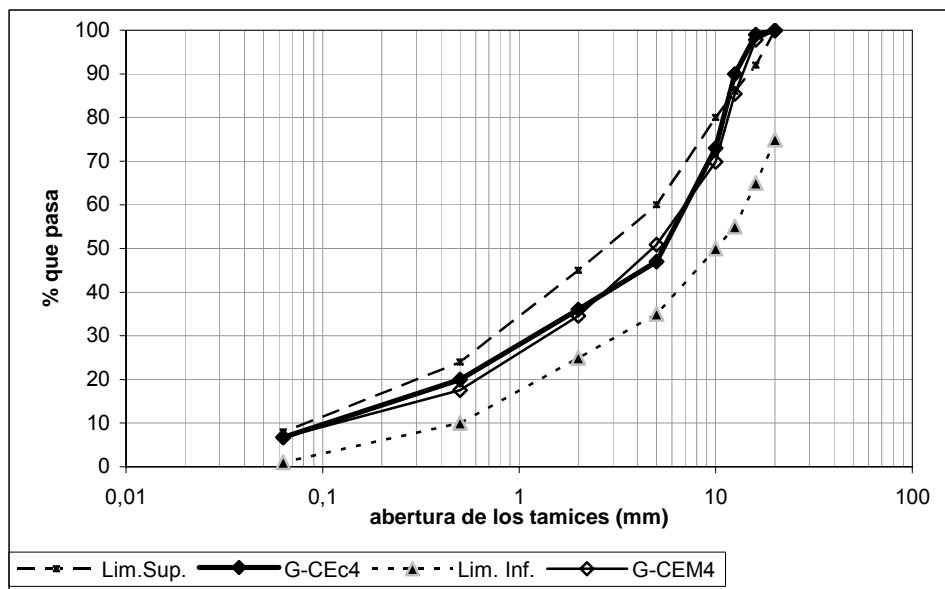


Tabla 5.12: Dosificación de la G-C con EIRSU.

Tamiz (mm)	Cemento	Ec12-20	Ec5-12	AN2/0-5	Ajuste	Ajuste
	4 %	40 %	15 %	41 %	G-CEc	G-CEM
20	4	40	15	41	100	100
16	4	39	15	41	99	98
12,5	4	30	15	41	90	85
10	4	14	14	41	73	70
5	4	2	1	40	47	51
2	4	1	1	30	36	35
0,5	4	1	1	14	20	18
0,063	4	0	0	2	7	7

Gráfico 5.12: Dosificación de la G-CEc (cemento = 4%; Ec12-20 = 40%; Ec5-12 = 15%; AN2/0-5 = 41%).



Las curvas granulométricas de las Ec, junto con la arena natural AN2/0-5 y el cemento, en las dosificaciones seleccionadas para HC y G-C, están dentro de los límites establecidos por el PG-3/2002, hasta el tamiz 12,5 mm, a partir de esta abertura de tamiz (tal como se aprecia en los gráficos 5.11 y 5.12) existe una carencia de la fracción 12,5-16 y una ausencia de áridos de la fracción 16-20 mm, lo cual concuerda con la granulometría de Ec, donde, si bien, Ec tiene una buena distribución granulométrica, mantiene cierta característica común de las EIRSU de la fracción mencionada. Este vacío de la fracción 16-20 mm, podría ser llenado con la adición de árido natural grueso, lo cual también contribuiría a mejorar la calidad de la mezcla.

Las curvas de dosificación de HCEM y G-CEM, son bastante parecidas a las curvas de HCEc y G-CEc, lo que posibilita obtener porcentajes de participación de los áridos en la

dosificación similares y de esta forma se espera que las respuestas mecánicas y de durabilidad sean parecidas a las del estudio realizado en el capítulo 4.

5.8.4 Estudio experimental.

Tanto para el HCEc como para la G-CEc se realizó una serie de ensayos previos, los mismos que sirvieron para determinar parámetros referentes a la dosificación, tales como la relación entre humedad y densidad, según la normativa NLT 108/72 del Proctor modificado, mediante este ensayo se encontró la densidad seca máxima y su correspondiente humedad. De esta forma, se siguió el mismo procedimiento descrito en el capítulo 4. Los resultados se muestran en la tabla 5.13, en el cual se añadió también los resultados de densidad seca máxima y humedad óptima determinados en el HCEM y GCEM.

Tabla 5.13: Resultados del ensayo proctor modificado.

Ensayo :	Proctor modificado			
Materiales componentes	- Ec5-12 - Ec12-20 - AN2-0/5		- EM5-12 - EM12-20 - AN1-0/5	
Tipo de Mezcla	HCEc	G-CEc	HCEM14	G-CEM4
Humedad óptima (%)	7,55	7,47	7,9	7,8
Densidad seca máxima (g/cm ³)	1,99	1,952	1,98	1,93

En la tabla 5.13 se aprecia que los resultados del proctor modificado sobre las probetas con Ec, son similares a las fabricadas con EM, tanto para HC como para G-C, siendo las densidades del HC en ambos casos mayores que las de la G-C. Esto se debe a que la mezcla de los HC tiene más finos (arena y cemento), lo que contribuye a aumentar el cierre de la matriz compacta.

Al igual que en el capítulo 4, las densidades de las EIRSU son sensiblemente menores que las de los áridos naturales, por lo que realizó la corrección para la dosificación del HC y la G-C.

5.8.5 Corrección de la dosificación para la carretera.

La dosificación utilizada para la fabricación del HCEc y la G-CEc, se realizó con el mismo método utilizado en el capítulo 4 (método recomendado en el PG-3/2002), por lo que se tuvo que corregir los resultados de la dosificación, ya que como se mencionó en el capítulo 4, el método es válido cuando los áridos son de origen natural. En el caso del HCEc y G-CEc fabricadas con árido

natural y Ec, las densidades de los áridos son sensiblemente distintas. El procedimiento fue el mismo que se indicó para EM (anexos A.2.3 para el HCEM y A.2.4 para la G-CEM).

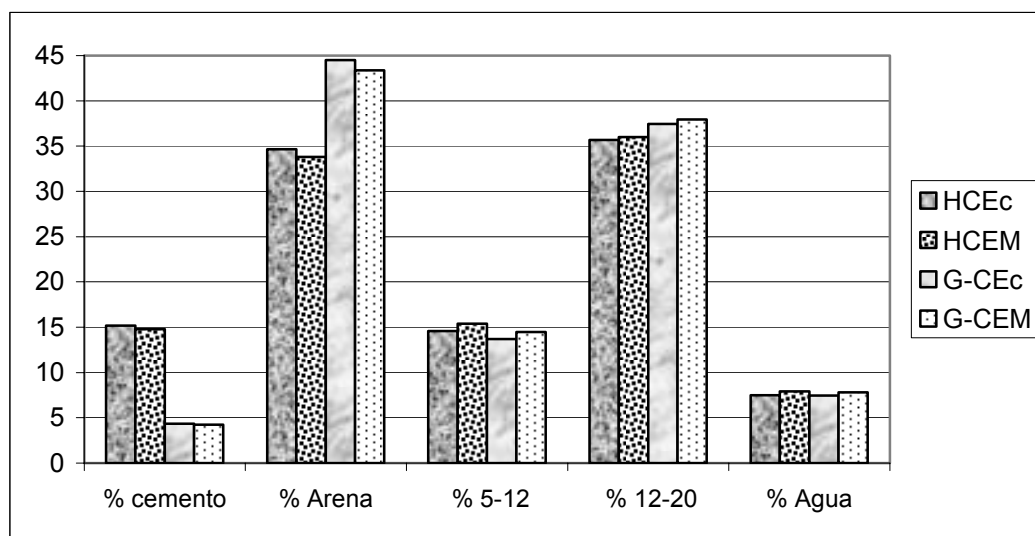
Además de las correcciones realizadas para las dosificaciones del HCEc y G-CEc que se muestran en las tablas 5.14, se añaden los resultados de las dosificaciones de HCEM y G-CEM, para ver el grado de variabilidad de los componentes.

Tabla 5.14: Dosificación (corregidas por densidad) para HC y G-C con EIRSU.

HCEc		HCEM		G-CEc		G-CEM	
%	kg/m ³	%	kg/m ³	%	kg/m ³	%	kg/m ³
Cemento: 15,17	299	Cemento:	290	Cemento: 4,34	85	Cemento:	83
AN2-0/5: 34,67	683	AN1-0/5:	673	AN2-0/5: 44,52	868	AN1-0/5:	853
Ec5-12: 14,58	287	EM5-12:	310	Ec5-12: 13,7	267	EM5-12:	265
Ec12-20: 35,68	703	EM12-20:	700	Ec12-20: 37,43	730	EM12-20:	728
Agua: 7,55	148 lt/m³	Agua:	156 lt/m ³	Agua: 7,46	146 lt/m³	Agua:	150 lt/m ³

Como se puede ver en la tabla 5.14 y el gráfico 5.13, los porcentajes de los constituyentes del HCEc son semejantes al HCEM, lo mismo sucede con G-CEc y G-CEM, por lo que se espera que las respuestas mecánicas del HCEc y G-CEc sean semejantes a las realizadas con EM.

Gráfico 5.13: Dosificación del HC y G-C con EIRSU.



5.9.- COMPORTAMIENTO A CORTO PLAZO DEL TRAMO EXPERIMENTAL.

Se ha seguido cuatro líneas de trabajo:

- 1) Para obtener las características mecánicas, se procedió a la extracción de testigos para los subtramos de hormigón compactado con escorias (THCEc), grava-cemento con escorias (G-CEc), y hormigón compactado con áridos naturales (THCN) a 28, 90 y 365 días de edad de los testigos. En cuanto al tramo de grava-cemento con áridos naturales (TG-C), resultó poco compacto, lo que imposibilitó sacar los testigos, y comparar con los TG-CEc.
- 2) Con el objetivo de hacer un análisis comparativo del comportamiento ambiental, por medio del estudio de los lixiviados de la carretera, se extrajeron testigos de la carretera para los ensayos de lixiviación monolítica y de disponibilidad. Además, se planificó la recogida de agua de riego y posteriormente de lluvia, de los tramos instrumentados de la carretera, con el objetivo de determinar la lixiviación para el periodo de estudio de la presente investigación. Este apartado se muestra detalladamente en el capítulo 6.
- 3) Se puso en marcha un seguimiento del comportamiento del tramo frente a los deterioros superficiales (control de fisuras, desperfectos, aparición de manchas en el pavimento, etc.).

5.9.1.- Ensayos mecánicos.

Los ensayos mecánicos se pusieron en marcha a medida que se fueron extrayendo los testigos de la carretera (28, 90 y 365 días). No obstante, se presentaron algunos inconvenientes, tales como: A los 7 días de edad de la carretera, fue imposible extraer los testigos, puesto que la carretera sufrió una helada (2 cm de hielo y 4 cm de nieve), por lo que al intentar extraer los testigos, la furgoneta del laboratorio se quedó atrapada en el tramo de carretera con los consecuentes problemas para remolcarlo, tal como se observa en la foto 5.14, finalmente a los 35 días se pudo extraer los testigos, como muestra la foto 5.15, los resultados mecánicos de estos testigos fueron sometidos a corrección por efectos de la helada (llegando a concluir que los 35 días de extracción, equivalen a 28 días de endurecimiento de los materiales). A partir de los 90 días de edad de la carretera, se introdujo maquinaria pesada, para la extracción del roble aledaño a la obra, lo que produjo pequeñas fisuras en diferentes partes del tramo. Esto se refleja en los bajos resultados mecánicos de los testigos a 365 días. No obstante se extrajo testigos a 90 días y se los almacenó en cámara húmeda hasta los 365 días, fecha en que fueron ensayados, con el objetivo de

comprobar el grado de deterioro que sufrió la carretera en términos mecánicos. Los resultados se indican con más detalle en los apartados 5.9.2, 5.9.3 y 5.9.4

Foto 5.14: Carretera con hielo y nieve.

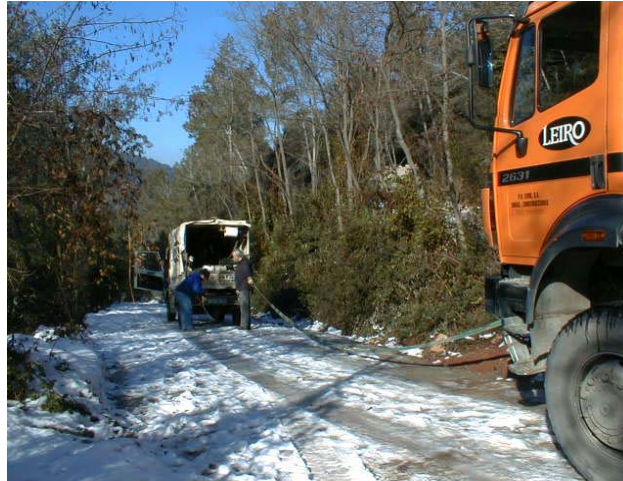


Foto 5.15: Extracción de los testigos



5.9.2 Resultados de los ensayos mecánicos del hormigón compactado.

En la tabla 5.15 se muestran los resultados de las resistencias mecánicas del HC, tanto de las probetas realizadas en el laboratorio con EIRSU de Mataró y EIRSU utilizada en la carretera (Ec), así como los testigos extraídos del tramo experimental de la carretera. En el gráfico 5.14 se indican los resultados de tracción indirecta del HC en función de la edad del material cementado. En el gráfico 5.15 se compara los resultados de tracción indirecta de las diferentes matrices.

Tabla 5.15: Resultados de los ensayos mecánicos del hormigón compactado.

Dosificaciones y Resistencias mecánicas	Resultados mecánicos para HC con EIRSU			
	Dosificaciones en porcentaje de masa total			
	THCEc	THCN	HCEc	HCEM
Cemento	15,17%	12,89 %	15,17%	14,79%
Arena	34,67%	47,91%	34,67%	33,81%
Árido grueso	(Ec 5-12 + 12-20) 50,26%	(Áridos naturales) 42,84%	(Ec 5-12 + 12-20) 50,26%	(EM 5-12 + 12-20) 52,39%
Humedad	7,55%	7,0 %	7,55%	7,9%
Densidad (g/cm ³)	1,975	2,33	1,99	1,98
Compresión 28 días (MPa)	30,57	33,03	31,8	31,12
Compresión 90 días (MPa)	31,64	34,51	32,5	32,08
Compresión 365 días (MPa)	20,98	21,60	34,12	33,42
Tracción indirecta a 28 días (MPa)	3,173	3,256	3,234	3,205
Tracción indirecta a 90 días (MPa)	3,204	3,283	3,259	3,236
Modulo de elasticidad 365 d. (MPa)	25.280	31.806	28.820	27.500

Gráfico 5.14: Resultados de los ensayos a tracción indirecta sobre los testigos de HC (THC).

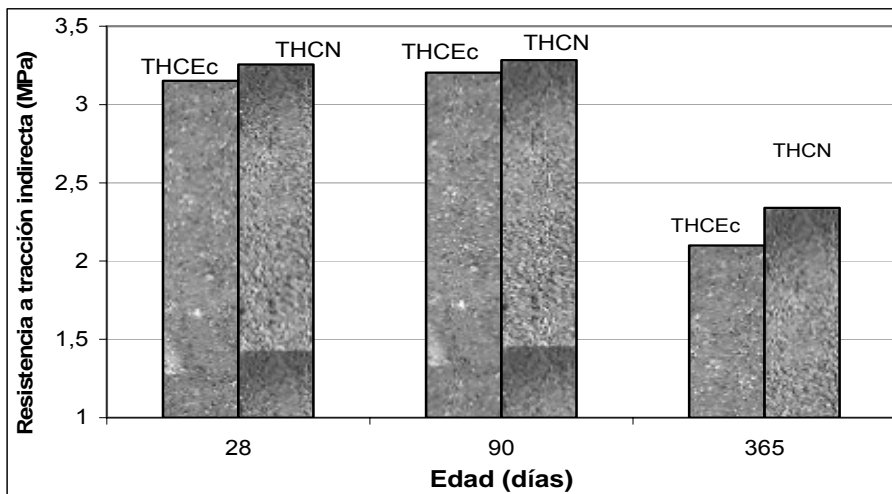
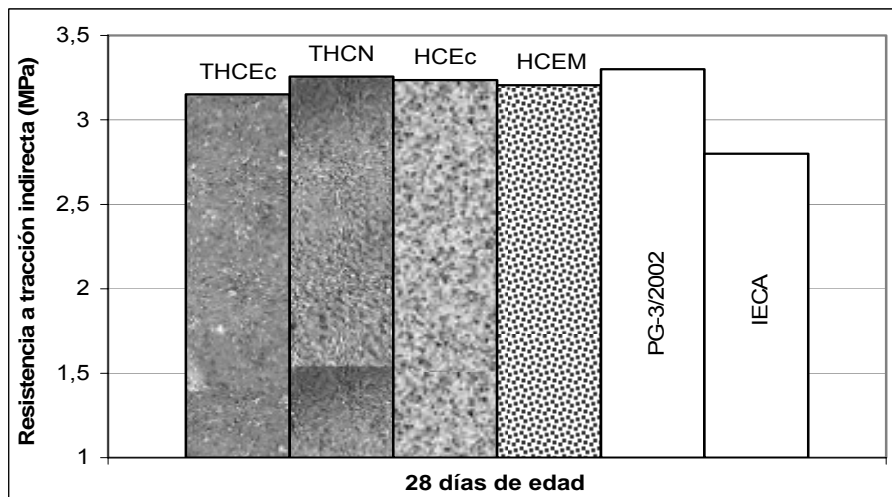


Gráfico 5.15: Resultados de los ensayos a tracción indirecta a 28 días de edad, sobre los testigos de HC y límites exigidos por el PG-3/2002 y sugeridos por el IECA (2003)



5.9.3 Resultado de los ensayos mecánicos de la grava-cemento.

En la tabla 5.16 se encuentran los resultados de las resistencias mecánicas de la G-C, tanto de las probetas realizadas en el laboratorio con EIRSU de Mataró y Ec, así como de los testigos extraídos del tramo experimental de carretera. En el gráfico 5.16 se indica los resultados de compresión simple de la G-C en función de la edad del material cementado y en el gráfico 5.17 se comparan los resultados de compresión simple de las diferentes matrices.

Tabla 5.16: Resultados de los ensayos mecánicos de la grava-cemento.

Dosificaciones y Resistencias mecánicas	Resultados mecánicos para G-C con EIRSU			
	Dosificaciones en porcentaje de masa total			
	TG-CEc	TG-CN	G-CEc	G-CEM
Cemento	4,23%	2,87 %	4,34%	4,23%
Arena	44,52%	51,87%	44,52%	43,38%
Árido grueso	(Ec 5-12 + 12-20) 51,13%	(Áridos naturales) 42,25%	(Ec 5-12 + 12-20) 51,13%	(EM 5-12 + 12-20) 52,39%
Humedad	7,46%	6,7%	7,46%	7,8 %
Densidad seca máxima (g/cm ³)	1,928	---	1,95	1,93
Compresión 28 días (MPa)	4,65	Frágil	5,61	5,24
Compresión 90 días (MPa)	6,53	Frágil	7,02	7,05
Compresión 365 días (MPa)	7,05	Frágil	8,45	8,402
Modulo de elasticidad 365d (MPa)	17.522	Frágil	18.983	18.460

Gráfico 5.16: Resultados de los ensayos a compresión sobre los testigos de G-C (TG-CEc)

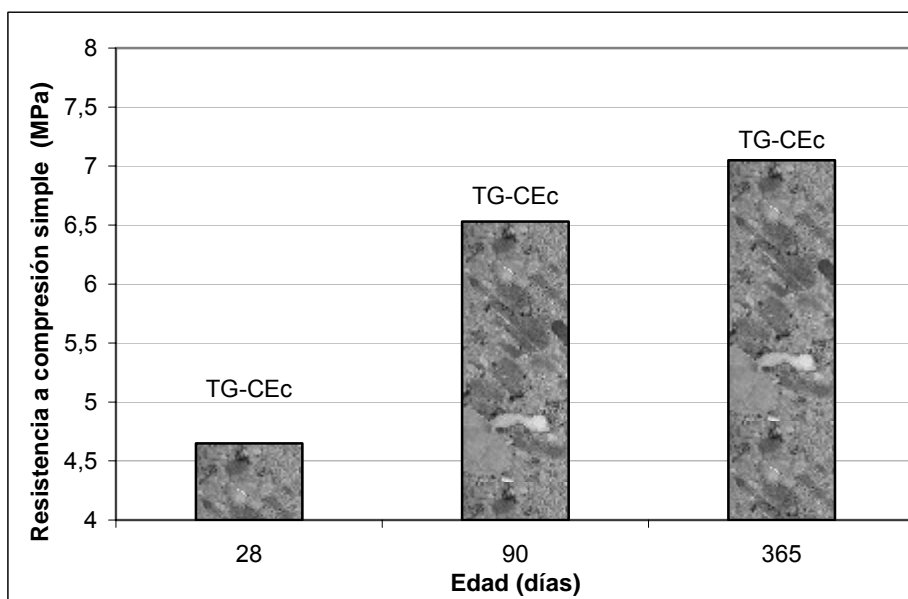
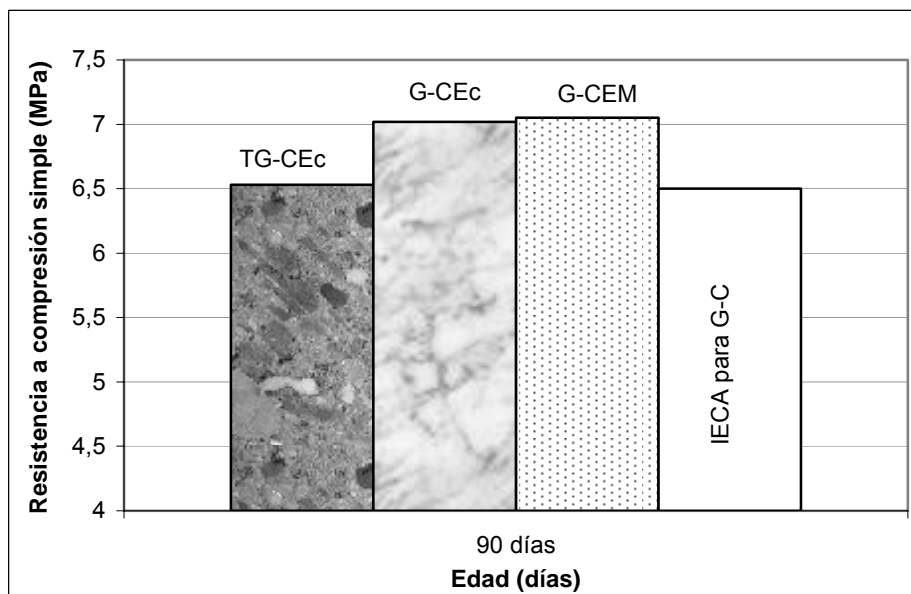


Gráfico 5.17: Resultados de los ensayos a compresión simple a 90 días de edad, sobre los testigos de G-C y límites recomendados por el IECA (2003).



5.9.4 Análisis de los resultados mecánicos.

Los resultados de compresión, tracción indirecta y módulo de elasticidad, se realizaron para los testigos extraídos del tramo experimental de carretera, y se compararon con las probetas proctor modificado que se hicieron en el laboratorio y con los parámetros exigidos por el PG-3/2002 y las recomendaciones del IECA (2003), dando resultados un tanto distintos. Esto sirvió como referente, para comprobar que tanto las EIRSU como la compactación del conjunto, influyen en los resultados mecánicos. No obstante, estas diferencias no son muy marcadas, por lo que los resultados mecánicos tampoco son demasiado diferentes.

Hormigón compactado

En cuanto a la resistencia del hormigón compactado, el PG-3/2002 exige una resistencia a tracción indirecta a los 28 días, mayor a 3,3 MPa. En caso de vías de baja intensidad de tráfico la resistencia característica a tracción indirecta recomendada para hormigones compactados, se puede reducir a 2,8 MPa (según el IECA, 1996). En la tabla 5.15 y el gráfico 5.15 se muestra que la resistencia a compresión de los THCEc no cumple con lo estipulado por el PG-3/2002, ya que estos presentan una resistencia a tracción indirecta de 3,173 MPa, muy cercana a la de los THCN de 3,256 MPa.

Sin embargo, ambos materiales están dentro de los 2,8 MPa recomendados por el IECA (2003) para vías de baja intensidad de tráfico. Desde luego se cree que las resistencias del hormigón compactado con EIRSU han de aumentar su resistencia a 365 días, pudiendo incluso alcanzar lo exigido por el pliego. Lamentablemente, esto no se pudo comprobar con los testigos de carretera, ya que a los 365 días dieron resistencias menores que a 90 días. Esto se debió a que posterior a los 90 días de edad, se introdujo en la carretera maquinaria pesada para extraer los árboles cercanos a la carretera, fisurando algunos subtramos, entre ellos el de HCEc y HCN.

Como se aprecia en el gráfico 5.14, las resistencias de los THCN son más altas que todos los materiales cementados, y que como se ha mencionado se trata de un HC con áridos naturales. No muy por debajo de éste, se encuentran los THCEc y los THCEM, lo que indica que las Ec tienen buenas características comparado con los áridos naturales y mejor comportamiento mecánico que las EM. Esto también se observa en que las matrices con Ec dieron una densidad seca máxima sensiblemente mayor que las EM, lo que concuerda con los resultados mecánicos.

Otro particular que mostraron las gráficas 5.14 y 5.15 es la diferencia de compactación del laboratorio con la del tramo experimental de carretera, siendo mejor compactado en el laboratorio y dando entonces, mejores respuestas en las probetas que en los testigos.

Grava-cemento

Para la grava-cemento el IECA (2003) recomienda una resistencia a compresión simple a 90 días, del orden de 6,5 a 8,5 MPa, en la tabla 5.16 y gráfico 5.17 se muestra que la resistencia a compresión de los TG-CEc fue de 6,53 MPa, cumpliendo así con la recomendación del IECA (2003) para G-C. Este incremento de las resistencias en la G-CEc se atribuye a cierto componente puzolánico de la EIRSU. Lamentablemente no se tiene los valores reales de este incremento a 365 días, ya que posteriormente a los 90 días se introdujo en la carretera maquinaria pesada (que se detalla en el apartado 5.9.5), lo cual deterioró los subtramos.

Las resistencias de las G-CEN fueron imposibles de determinar, ya que los testigos de la carretera se rompían con facilidad, impidiendo la extracción de los mismos. En cuanto a las resistencias de las G-CEc fueron más altas que las G-CEM, lo que indica que las Ec tienen mejores características dando una densidad seca máxima sensiblemente mayor que con las EM, lo que concuerda con los resultados mecánicos. Los gráficos 5.16 y 5.17 indican la diferencia existente entre la compactación del laboratorio con la del tramo experimental de carretera, siendo mejor compactado en el laboratorio y dando entonces mejores respuestas en las probetas que en los testigos, argumento que coincide con los resultados obtenidos en probetas y testigos de HC.

Vistos los resultados de las resistencias y considerando que en el tramo experimental se utilizaron áridos de EIRSU en mezclas con áridos naturales finos, se puede observar que tanto la TG-CEc como el THCEc dieron buenos resultados mecánicos, incluso los THCEc dieron valores de resistencia a tracción indirecta semejante al THCN (testigo de hormigón compactado fabricado totalmente con áridos naturales). Además, cabe esperar que aumenten las resistencias con el tiempo, pues como se ha mencionado las EIRSU tienen un cierto componente puzolánico. No obstante es importante saber el comportamiento del tramo con respecto al impacto ambiental, que se verá en el capítulo 6.

5.9.5.- Deterioro del tramo de carretera, posterior a los 90 días de edad.

El las tablas 5.17, 5.18 y el gráfico 5.18 se comparan los resultados a compresión de los testigos de la carretera, extraídos y ensayados a los 365 días de edad con los testigos de la carretera, extraídos a 90 días de edad, pero almacenados en cámara húmeda hasta los 365 días, edad en la que se rompieron dichos testigos a compresión. Esta comparación puede servir para analizar el grado de deterioro que sufrió la carretera por el uso, en especial por la maquinaria pesada que se movilizó en la carretera, para extraer los árboles que se encontraban a los dos lados del camino (foto 5.16), lo que repercutió en el firme, ocasionando múltiples fisuras en el camino y por ende en los testigos de carretera. Cabe aclarar que no todos los testigos han sufrido el mismo grado de afectación, puesto que las cargas aplicadas al camino fueron localizadas en los sitios de mayor cercanía a los árboles.

Foto 5.16: Deterioro de la carretera por el uso de maquinaria pesada, utilizada para extraer los árboles que se encontraban a los dos lados del camino.



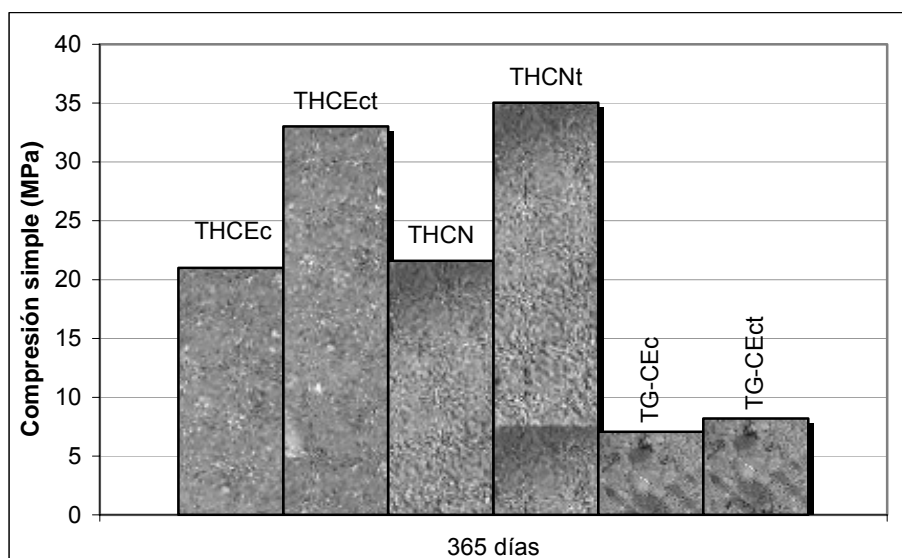
Tabla 5.17: Comportamiento mecánico del tramo experimental de carretera a los 365 días de edad en el subtramo de HC.

Testigos de la carretera Extraídos y ensayados a los 365 días de edad		Testigos de la carretera extraídos a los 90 días de edad, depositados en cámara húmeda hasta completar los 365 días y ensayados a 365 días.	
THCEc	THCN	THCEct	THCNt
20,98 MPa	21,6 MPa	33,01 MPa	35,04 MPa

Tabla 5.18: Comportamiento mecánico del tramo experimental de carretera a los 365 días de edad en el subtramo de G-C.

Testigos de la carretera Extraídos y ensayados a los 365 días de edad	Testigos de la carretera extraídos a los 90 días de edad, depositados en cámara húmeda hasta completar los 365 días y ensayados a 365 días.
TG-CEc	TG-CEct
7,05 MPa	8,25 MPa

Gráfico 5.18: Resistencia a compresión del tramo de carretera a los 365 días de edad.



Los resultados mostrados en la tabla 5.17 y 5.18 y en el gráfico 5.18, evidencian el deterioro del tramo experimental de carretera, Así pues, los testigos extraídos de los subtramos de HC con escorias (THCE) y hormigón compactado con áridos naturales (THCN), que además fueron extraídos y ensayados a 365 días de edad, muestran valores inferiores de resistencias a compresión que los testigos de los mismos tramos mencionados, pero extraídos a los 90 días de edad y ensayados a 365 días. Esta diferencia de resistencias, evidencia entre otras circunstancias (humedad, temperatura, etc.) el deterioro del tramo por la utilización de maquinaria pesada para la

extracción de roble. Estos resultados coinciden con la baja resistencia de los testigos extraídos a los 365 días en el subtramo de HC que se indica en los resultados del apartado 5.9.2 y 5.9.3.

En cuanto a los testigos y G-C con escorias (TG-CE), se observa que la resistencia a compresión casi no ha disminuido, lo cual puede ser debido a que no se aplicaron cargas excesivas en este subtramo y que este tipo de matrices tuvieron un comportamiento adecuado.

5.10.- FISURAS Y MANCHAS.




La fisuración del hormigón es atribuible a numerosas causas. Las fisuras pueden sólo afectar a la apariencia de una superficie, pero también pueden indicar fallas estructurales significativas o falta de durabilidad. Las fisuras pueden representar la totalidad del daño, pero también pueden señalar problemas de mayor magnitud, su importancia depende del tipo de estructura, así como de la naturaleza de la fisuración.

En el tramo experimental de carretera se detectaron varias fisuras a simple vista, que fueron apareciendo en diferentes periodos y por causas diversas, en tanto que otras fisuras menos visibles, pero en mayor cantidad, se atribuyen a la retracción y a cambios volumétricos debidos a gradientes térmicos. Esta clase de fisuras es característica inherente de las capas de materiales tratados con conglomerantes hidráulicos, como afirma el IECA (2003).

En general se detectaron claramente dos tipos de fisuras. Las fisuras de retracción térmica, que como se ha mencionado anteriormente son inherentes de las capas de materiales tratados con conglomerantes hidráulicos, como afirma el IECA (2003) y las fisuras causadas por sobrecarga de la estructura en servicio.

Dentro del análisis de deterioro determinado sobre el tramo experimental de carretera, se incluye la aparición de manchas o pigmentaciones ocasionadas por los materiales que constituyen las EIRSU. En la tabla 5.19 se muestra en fotografía las fisuras con las edades de aparición de estas, así como las manchas y las posibles causas que las han producido.

Tabla 5.19: Fisuras

Subtramos	Fotos de las fisuras en superficie en los subtramos	Edad de aparición	Ubicación de las fisuras desde la cota más alta de cada subtramo	Geometría de la fisura	Probable causa	
Subtramo 1 HCN Espesor: 15 cm.		28 Días	a 8m	Fisuras transversales	Retracción térmica	
			a 13 m			
			a 20 m			
		Más de 90 días	En las esquinas	Fisuras ortogonales	Sobrecarga	
Subtramo 2 HCEc Espesor: 15 cm.		Más de 90 días	a 13 m	Fisuras transversales y fisuras ortogonales	Retracción térmica Sobrecarga	
			En las esquinas			
Subtramo 3 HCEc Espesor: 12 cm.		Más de 90 días	a 13 m	Fisuras transversales y fisuras ortogonales	Retracción térmica Sobrecarga	
			a 20 m			
				En las esquinas		
Subtramo 4 HCEc Espesor: 10 cm		Más de 90 días	a 2 m	Fisuras transversales	Retracción térmica	
			a 4 m			
				a 16 m	Fisuras ortogonales	Sobrecarga
				23 m		
Subtramo 5 G-CEc Espesor: 10 cm		Más de 90 días	Color de oxidado	No se encontró fisuras visibles	--	

Como se puede ver en la tabla 5.19, las primeras fisuras visibles se produjeron a los 28 días de edad de la carretera. Se trata de fisuras transversales (de lado a lado) que se marcan en todo lo ancho de la carretera, la más prominente se halla ubicada en el cambio de materiales compactados (subtramos de 1 y 2) entre HCN y HCEc, y se produjo por retracción térmica de las losas. Esta fisura tiene un máximo de abertura de labios 2 mm en superficie y mínimo de 1 mm. Fue la única fisura de estas dimensiones que se produjo por retracción térmica. El resto de fisuras de esta clase son mucho más pequeñas con abertura de labios menor a 2 mm.

Como se observa en la tabla 5.19, a partir de los 90 días, aparecieron pequeñas fisuras ortogonales, ubicadas en las esquinas de los subtramos, se supone que fueron ocasionadas por la sobrecarga que sufrió el pavimento, a causa del uso de maquinaria pesada (orugas, etc.) para talar los árboles que circundaban el camino. Estas fisuras en el HCN, y en el HCEc tuvieron 15 cm de longitud y con abertura de labio semejante a 1 mm. Ambos subtramos sufrieron similares grados de deterioro, lo que conduce a pensar que el HCEc tuvo un buen comportamiento frente al HCN, más aún si se considera que el HCEc fue realizado con áridos gruesos de Ec. En los dos siguientes subtramos (3 y 4) de HCEc, la aparición de este tipo de fisuras fueron de mayor longitud y anchura, esto se debió al poco espesor de las losas (espesores de 12 y 10 cm respectivamente), que no soportaron las cargas de la maquinaria.

Por último se puede ver que el subtramo 5 de G-CEc, soportó bien las cargas de las máquinas de tala de árboles, con lo cual no se evidenciaron fisuras a simple vista. También cabe la posibilidad de que este subtramo no haya sido cargado excesivamente por dicha maquinaria. En, en todo caso este análisis coincide con los buenos resultados mecánicos expuestos anteriormente.

En cuanto a las manchas en el tramo, éstas fueron apareciendo a partir de los 90 días de ejecución de la carretera, fueron manchas de oxidación de la fracción metálica de la EIRSU, especialmente en los subtramos de HCEc, y de forma menos evidente en el subtramo de G-CEc.

En general se observó que muy poco deterioro de la carretera en los subtramos de HCEc y G-CEc, para el periodo de los primeros 90 días, a partir de esta edad los subtramos sufrieron los efectos de la sobrecarga de maquinaria pesada, lo cual produjo fisuras considerables. No obstante, el grado de deterioro de los subtramos fabricados con EIRSU, fueron similares al subtramo fabricado con áridos de origen natural.

5.11.- CONCLUSIONES DEL TRAMO EXPERIMENTAL DE CARRETERA.

- 1) Las características de las Ec utilizadas en el tramo experimental de carretera, resultaron muy semejantes a las estudiadas en el capítulo 3. No obstante, existen ciertas divergencias que resultaron favorables en las propiedades mecánicas del tramo. Tales diferencias son derivadas de los porcentajes de materiales constituyentes de las Ec. Así por ejemplo, la disminución de vidrio y aumento de material de neoformación incidieron en la geometría de las Ec, aumentando el índice de lajas (lo que mejora la compactación), y disminuyendo el coeficiente Los Ángeles (incrementando la resistencia a desgaste). El resto de características fueron muy similares a ET y EM, en especial la granulometría, donde continuó existiendo carencia de las fracciones 10-12 mm y 16-20 mm, lo que incidió en las curvas de dosificación, evidenciando la falta de áridos de la franja 16-20 mm. En todo caso, se intentó en cada apartado cumplir con las especificaciones exigidas por el PG-3/2002, o en su defecto las recomendaciones del IECA (1996 y 2003) para áridos de HC y G-C. Se insiste en la afirmación, de que añadir fracción 16-20 mm de áridos gruesos de origen natural, podría no sólo cubrir la fracción faltante de la granulometría, sino también mejoraría las características del árido.

- 2) Vistos los resultados de las resistencias y considerando que en el tramo experimental de carretera se utilizaron áridos de EIRSU en mezclas con áridos naturales finos, se puede observar que tanto la G-CEc en capas base para tráfico ligero como el HCEc en pavimentos de baja intensidad de tráfico, y la G-C en la reparación local de baches, dieron buenos resultados mecánicos. No obstante, es importante recordar que cada muestra es bastante heterogénea, por lo que es recomendable hacer un estudio de caracterización antes de utilizar las EIRSU y establecer una resistencia característica un tanto superior a las exigidas por el PG-3/2002, ya que la diferencia de compactación del laboratorio con la del tramo experimental de carretera hace que las probetas resistan mejor las sollicitaciones que los testigos.

- Así pues, la resistencia mecánica de los THCEc si bien no cumplieron con los parámetros exigidos por el PG-3/2002 para HC de 3,3 MPa, ya que tiene una resistencia a tracción indirecta de 3,17 MPa. Sin embargo, está dentro de lo recomendado por el IECA en vías de baja intensidad de tráfico de 2,8 MPa.

- En cuanto a G-C el IECA (2003) recomienda una resistencia a compresión simple a 90 días, del orden de 6,5 a 8,5 MPa, la resistencia a compresión de los TG-CEc fue de 6,53 MPa, cumpliendo con así con la recomendación del IECA (2003) para G-C.
 - Las resistencias del hormigón compactado con EIRSU y la grava-cemento con EIRSU aumentaron sus resistencias a los 365, pudiendo incluso alcanzar lo exigido por el pliego. Lamentablemente, esto no se pudo comprobar con los testigos de carretera, ya que a los 365 días dieron resistencias menores que a 90 días. Esto se debió a que posteriormente a los 90 días de edad, se introdujo en la carretera maquinaria pesada para extraer los árboles cercanos a la carretera, fisurando algunos subtramos, entre ellos el de HCEc, HCN y G-CEc
- 3) La construcción del tramo experimental de carretera, utilizando la tecnología de los hormigones compactados con rodillo, hizo más versátil la puesta en ejecución de los diferentes subtramos, aportando ventajas sobre otras tecnologías, como el uso de maquinaria convencional para la puesta en obra y construcción, y la alta capacidad de soporte inicial, lo que permitió una apertura inmediata al tráfico una vez finalizada la compactación del tramo. No obstante, se presentaron ciertos inconvenientes derivados de la tecnología del hormigón compactado con rodillo, tales como la notable sensibilidad de la resistencia a pequeñas variaciones de humedad en el proceso de puesta en obra, por lo que se han de tener en cuenta ciertos factores ambientales (temperatura, humedad, lluvia, etc) que pueden afectar a los áridos, recomendándose apilarlos en lugares lo más protegidos posible, así como asegurar una adecuada compactación del material en la obra, dando el número suficiente de pasadas de los rodillos vibrantes, y controlando que la densidad mínima exigida se haya alcanzado. Otro de los inconvenientes del HC y la G-C fue la exigua regularidad superficial, aunque esto no suele ser un factor muy decisivo en este tipo de carreteras, dada la velocidad a la cual circulan los vehículos. Por último, un factor que también se debe considerar es el transporte del material desde la planta a la obra, tiempo en el cual hay que proteger con una lona la mezcla para evitar diferencias en la humedad, y al mismo tiempo evitar la segregación al verter la mezcla en la obra, reduciendo la altura de caída.
- 4) Las EIRSU necesitan un control similar e incluso más riguroso que los áridos de origen natural. Esto pone de manifiesto la necesidad de seguir un protocolo, semejante al que se viene planteando en el transcurso de esta tesis. El protocolo se inicia por la etapa de caracterización de las EIRSU como áridos para HC y G-C, posteriormente el cálculo de dosificaciones adecuadas, tomando en consideración las recomendaciones del PG-3/2002,

seguidamente la caracterización mecánica de los hormigones, así como el estudio de durabilidad. Y finalmente la etapa de análisis medioambiental (capítulo 6).

- 5) El volumen de EIRSU es actualmente considerable siendo importante gestionarlo (capítulo 2), por lo que la utilización de EIRSU como parte de los áridos en hormigones compactados, puede reducir de forma elevada y a corto plazo los RSU (Quenee, B., 2000), Por ello, la importancia de este capítulo radica en la posibilidad de apreciar a escala real la aplicación en HC y G-C con EIRSU de forma controlada, dando resultados mecánicos satisfactorios dentro del plazo de duración de la presente investigación.

CAPITULO 6

6.- IMPACTO AMBIENTAL DE LAS EIRSU COMO ÁRIDOS EN HORMIGÓN COMPACTADO Y GRAVA-CEMENTO.

6.1.- INTRODUCCIÓN.

Este capítulo estudia el comportamiento ambiental que genera el uso de las EIRSU en mezclas con áridos finos de origen natural en matrices compactadas con cemento Pórtland.

El comportamiento ambiental de las EIRSU se comprobó en base al estudio de los lixiviados, por lo que se estableció un escenario de lixiviación, bajo el cual se determinaron los tests más adecuados tanto para el material como para la aplicación definida en el presente estudio. Así, se utilizó el test NEN 7341 sobre las EIRSU sueltas y mezcladas con áridos fino natural en matrices compactadas con cemento Pórtland, cuyos resultados fueron comparados bajo los límites holandeses del Building Decree, establecidos para lixiviados de EIRSU. Los resultados obtenidos sobre las EIRSU estudiadas, dieron valores de lixiviación en ciertos metales superiores a los límites mencionados, por lo que se procedió de acuerdo con la práctica holandesa, al realizar el test NEN 7345 para las matrices compactadas, en el cual se definió el grado de retención de aquellos metales lixiviados que podrían ser peligrosos para el medio ambiente.

Los resultados de los tests de lixiviación indicados, posibilitaron la comparación individual y conjunta con varios parámetros, uno de los cuales fue el análisis químico determinado sobre las EIRSU sueltas -sin cemento- (capítulos 3 y 5), así como relaciones entre los lixiviados de cada fracción y lixiviados de las matrices de G-C y HC (probetas fabricadas en

el laboratorio y testigos extraídos del tramo experimental de carretera). Además se realizó la recogida de lixiviados en el subtramo 7 de grava-cemento (con Ec) de carretera, de esta forma se obtuvieron valores reales de lixiviación y se comparó con los resultados obtenidos hasta el momento y los límites del Building Decree holandés establecidos para lixiviados de EIRSU.

6.2.- CONDICIONES DE ENTORNO DE LAS EIRSU FRENTE A LOS LIXIVIADOS.

Con el objetivo de conocer y a ser posible, cuantificar el posible impacto ambiental de las EIRSU (tanto sueltas como en matrices compactas con cemento Pórtland), se realizaron los test de lixiviación, aunque sus resultados pueden no ser decisivos por separado, en conjunto, son un buen referente. Desde luego, existen muchos factores que influyen en la lixiviación de los contaminantes. Así, la concentración de un contaminante en el lixiviado depende de su disponibilidad y esta a su vez depende de la solubilidad de dicho componente en el agua o en el líquido lixivante. En otras palabras, cuando la muestra considerada entra en contacto con el líquido lixivante, algunos de sus constituyentes se disolverán de forma parcial o totalmente en ella. El proceso de disolución viene dado por determinadas características de los sólidos involucrados en el proceso, como son la relación superficie/volumen de sus partículas, la relación de poros, su tamaño e intercomunicación. Así como también los mecanismos de transporte del líquido que determinan la velocidad e intensidad del proceso.

6.2.1.- Lixiviación.

En los hormigones en masa el proceso de lixiviación viene determinado por la difusión, mientras que en los materiales granulares por percolación. Este último puede ser simulado mediante un ensayo de columna en el laboratorio, tomando en cuenta las variaciones que hay que realizar en el ensayo, ya que tanto la velocidad del flujo como el tiempo de duración del ensayo deberán ser extrapolables a las condiciones reales (Hendriks, 2002).

Un sistema granular sometido a lixiviación puede estar en equilibrio o puede regirse por condiciones cinéticas. En equilibrio, la velocidad de liberación de un componente del sólido es grande con respecto a la velocidad de agua que percola a través del material granular. Cuando ocurre lo contrario, el sistema será gobernado por condiciones de lixiviación controladas por la cinética y no por condiciones de equilibrio. Esto puede ocasionar variaciones sobre las condiciones de ensayo y diferentes relaciones líquido/sólido (L/S).

En los hormigones, la velocidad de lixiviación viene determinada por la difusión de los constituyentes en el interior del material. El agua penetra por succión capilar, el transporte de agua se realiza por conducción capilar y la movilidad de los componentes del sólido disueltos por difusión. En este caso se puede aplicar el ensayo de difusión (Tank leaching test o monolítico) con inmersión total, renovación periódica del líquido lixivante (agua o agua acidificada) y análisis periódico del agua con los componentes lixiviados, con lo que se obtienen curvas de evolución de un elemento lixiviado con el tiempo.

Existen muchos factores que influyen en la lixiviación, y que deben ser considerados al elegir el tipo de test, ya que al omitir estos factores, se corre el riesgo de obtener resultados no extrapolables a situaciones reales. Los factores químicos, las condiciones de equilibrio o cinéticas, la solubilidad, el pH del agua o el impuesto por las condiciones que rodean al material, las condiciones redox, los procesos de adsorción y los cambios originados por la materia orgánica, pueden crear situaciones diversas y cambiantes, que dificultarán aun más la elección del test de lixiviación y la interpretación de sus resultados, por lo que es necesario definir el escenario de lixiviación.

6.2.2.- Definición del escenario de lixiviación.

El escenario de lixiviación está determinado por las condiciones en que el material ejerza su función. No obstante, la reproducción exacta de estos escenarios reales es muy costosa, por lo que se recurre a los test de laboratorio, pero los resultados de reales de experimentación y de laboratorio son difíciles de correlacionar. Para salvar estas diferencias se aplican correcciones en función de los siguientes factores:

- *el medio lixivante*
- *el material de muestra*
- *la estructura de la que formará parte*
- *el método de ensayo en el laboratorio.*

Según Hendriks (2002), el método de lixiviación viene dado por una serie de factores que modifican *el medio lixivante*. Al pasar los resultados del laboratorio a las condiciones prácticas, se debe tener en cuenta los factores químicos tales como la concentración de sales, presencia de humus, oxidantes y reductores, acidez, formación de complejos, detergentes, CO₂, O₂, etc., factores de tipo biológicos, y factores físicos como son: la temperatura, viscosidad, presión, adsorción y absorción.

El material de muestra, utilizado en este caso son las EIRSU de Mataró (EM), las EIRSU utilizadas en el tramo experimental de carretera (Ec) y a manera de referente las EIRSU de Tarragona (ET). Todas las escorias fueron separadas previamente en dos fracciones 5-12 y 12-20 mm, y fueron caracterizadas en los capítulos anteriores. Además del material de muestra citado, también se incluyeron los materiales provenientes de las mezclas de áridos naturales y EIRSU tratadas con cemento Pórtland. En cuanto a la estructura a la que irá a formar parte las EIRSU, se considera para la presente tesis, como sustitución parcial de los áridos para la fabricación de HC y G-C. En la foto 6.1 se indica a la izquierda las EIRSU 5-12 y 12-20, así como el cemento y la arena natural que se utilizaron en la fabricación de las probetas de HC y G-C, y que fueron sometidas a los test de lixiviación.

Foto 6.1: EIRSU 5-12 y 12-20, cemento y la arena natural utilizados en la fabricación de las probetas de HC y G-C, y que fueron sometidas a los test de lixiviación.



En el método de ensayo de laboratorio, influyen factores como: la elección del mecanismo de transporte, reproductibilidad, extrapolación a periodos de tiempo mayores, pretratamiento de las muestras en el laboratorio, carga por metro cuadrado (considerando la relación L/S) y precisión. Por lo que se escogieron para la presente tesis los test de lixiviación NEN 7341 de disponibilidad y el test NEN 7345 de difusión, ya que se pretendió obtener resultados de lixiviación en condiciones extremas (NEN 7341) y evaluar el potencial y velocidad de lixiviación de los compuestos en las matrices de cemento Pórtland a largo plazo (NEN 7345), en especial el de aquellos metales que sobrepasen los límites establecidos en el primer test mencionado. Se descartó el test de columna, ya que el objetivo de la utilización de las EIRSU es la de formar parte de un sólido monolítico como son las matrices compactas de la aplicación estudiada en el capítulo 5. A continuación se indican los detalles de cada uno de los test utilizados.

6.2.3- Test de lixiviación por disponibilidad NEN 7341

El Test de lixiviación por disponibilidad NEN 7341 desarrollado por Netherlands Normalisation Institute (NNI), sirve para caracterizar y determinar el comportamiento de las EIRSU frente a la lixiviación, para su utilización como material de construcción, cuyo objetivo es indicar la cantidad de compuestos que puede lixiviar un material bajo condiciones extremas. Se trata de un ensayo agresivo, en el que se somete al material a lavado con agua acidulada, cuando éste ha perdido su capacidad tamponadora.

El procedimiento de este Test consiste en moler hasta la pulverización una muestra de tal forma que pase el 95% del total por el tamiz 125 μm , a continuación se pesa una cantidad exacta de este material y se lava durante tres horas con agitación en agua a pH 7 y posteriormente con agua a pH 4, comparable con el agua de lluvia ácida. En ambos periodos de lavado se trabaja con una relación entre el volumen de lixivante y la masa de sólido utilizado en el ensayo (L/S) de 50 lt/kg, en el caso de las EIRSU se utilizó dos recipientes en los cuales se agitó la mezcla mencionada con un pequeño dispositivo, el cual se indica en la foto 6.2.

Foto 6.2: Test de lixiviación por disponibilidad NEN 7341.



Al término se separa el líquido lavado y se determina su composición, dando entonces, la cantidad lixiviada por componente. Este ensayo de lixiviación supone condiciones extremas por el ataque ácido, el tamaño de la muestra y las condiciones de agitación, a las que son sometidas las muestras de EIRSU, por lo tanto, los resultados marcan la emisión del compuesto ($E_{L/S}$) para una relación: volumen de lixivante / masa del sólido (L/S).

El valor de emisión $E_{L/S}$ se compara con $E_{m\acute{a}x}$ que se calcula con la siguiente fórmula

$$E_{\max} = \frac{I_{\max}}{dc \cdot h} * \left[\frac{1 - e^{-k \cdot L/S}}{1 - e^{-k \left[\frac{N_i^{-t}}{dc \cdot h} \right]}} \right] + E_{sol} \quad (6.1)$$

Donde:

$E_{m\acute{a}x}$: Emisión máxima aceptada a una determinada relación L/S.

L/S: Relación entre el volumen de lixiviante y la masa de sólido utilizado en el ensayo (L/S), esta relación es de 100 para el ensayo de disponibilidad.

dc: Densidad estándar de los materiales de construcción (1550 kg/m³) o densidad real en caso que sea menor que la estándar.

h: Grueso de aplicación, donde 0,2 m es el valor mínimo para el caso de materiales no consolidados.

k: Constante que depende de cada componente inorgánico.

N_i: Precipitaciones en mm/año se acostumbra a tomar 300 mm/año para aplicaciones no aisladas y 6 mm/año para aplicaciones con aislamiento.

t: Periodo de tiempo en años en el cual se considera la emisión. Se acostumbra a tomar 100 años, excepto para los cloruros, bromuros y sulfatos por lo que a estos se les considera 1 año.

E_{sol} : Valor de corrección en mg/kg que representa el nivel base de un suelo estándar.

I_{máx}: Inmisión máxima aceptada en un periodo de tiempo determinado en mg/m², este parámetro se determina teniendo en cuenta la cantidad máxima permisible de un componente que se puede encontrar en un suelo (también en el agua superficial), después de un determinado tiempo (normalmente 100 años, excepto para los cloruros, bromuros y sulfatos, para los cuales se acostumbra a considerar 1 año). Así, I_{máx} se fija en función del incremento del contaminante, que sería aceptable respecto a un valor (target value) que garantiza la calidad del suelo, ya que este incremento representa un riesgo ecológico negligible. La normativa holandesa fija I_{máx} del 1% (valor altamente restrictivo), el cual, aplicado en la fórmula 6.1 proporciona una emisión denominada Emáx1%.

Como se ha mencionado la evaluación de los resultados del test se realiza comparando la emisión de cada componente con los valores de $E_{máx1\%}$, No obstante, diversos autores como Hendriks (2003)¹, consideran al límite $E_{máx1\%}$ como altamente restrictivo, por este motivo recomiendan evaluar los resultados obtenidos respecto a criterios de $I_{máx}$ menos restrictivos de 5% y 10%, los que aplicados en la fórmula 6.1 dan valores de $E_{máx5\%}$ y $E_{máx10\%}$, estas emisiones pertenecen a cada especie iónica que lixivia un material. En la tabla 6.1 se indican los valores de $E_{máx1\%}$, $E_{máx5\%}$ y $E_{máx10\%}$ para algunos metales lixiviados.

Tabla 6.1: Valores de $E_{máx1\%}$, $E_{máx5\%}$ y $E_{máx10\%}$.

Metales lixiviados	Límites según la fórmula 6.1 de la NEN 7341		
	$E_{máx1\%}$	$E_{máx5\%}$	$E_{máx10\%}$
As	2,11	7,75	14,81
Ba	21,22	102,51	204,13
Cd	0,06	0,21	0,41
Co	1,06	4,93	9,77
Cr	5,02	24,37	48,57
Cu	1,99	8,96	17,67
Mo	0,63	2,57	4,99
Ni	2,32	9,1	17,57
Pb	4,91	21,36	41,93
Se	0,08	0,27	0,51
Sn	1,00	4,87	9,71
Sb	0,15	0,65	1,28
Zn	8,77	35,87	69,74
Cl-	477,0	2181,3	4311,7
SO ₄	1297,9	6017,8	11917,6

Desde luego, la normativa holandesa establece que si para un determinado componente $E_{L/S} \leq E_{máx1\%}$ se puede considerar que el material cumple con los requisitos de aceptación para el componente. En caso contrario, cabe pasar a realizar un test de lixiviación específico para el uso futuro que se desee dar al material. En la presente tesis se ha realizado el test de lixiviación monolítico NEN 7345 que se indica a continuación.

6.2.4.- Test de lixiviación por difusión o monolítico NEN 7345

Existen diferentes test de lixiviación monolíticos, que evalúan el potencial y velocidad de lixiviación de matrices cementadas con cemento Pórtland a largo plazo. Uno de los más importantes es el test holandés Netherlands Tank Leaching Test NTLT (Barna, et. al., 1994), el cual ha sido adoptado en la normativa holandesa: Leaching Characteristics of Solid Healthy and Building and Waste Materials (NEN 7345, marzo de 1995).

¹ Conversación personal con el profesor Enric Vázquez.

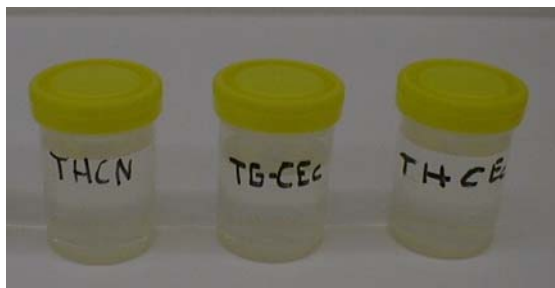
A partir de los tests de lixiviación monolíticos (sobre muestras no pulverizadas) se obtiene información sobre los mecanismos de lixiviación de residuos solidificados. El flujo acumulativo por unidad de superficie de cada contaminante se calcula y representa para cada intervalo de tiempo, permitiendo así, distinguir diferentes mecanismos de lixiviación.

El Test NEN 7345 consiste en utilizar materiales que superen los 40 mm, a continuación se los sumerge en un recipiente lleno de agua destilada que ha sido acidulada con ácido nítrico hasta pH 4. En tiempos de 0,25; 1; 2,25; 4; 9; 16; 36 y 64 días $\pm 10\%$, tiempos en los cuales se cambia el agua y se determina la concentración de los componentes de interés. En la foto 6.3 se indica los recipientes donde se sumergieron los materiales monolíticos y en la foto 6.4 los recipientes de extracción periódica de los lixiviados.

Foto 6.3: Test de lixiviación por difusión o monolítico NEN 7345 – recipiente donde se sumergieron los testigos monolíticos de HC y G-C.



Foto 6.4 Test de lixiviación por difusión o monolítico NEN 7345 – recipientes de extracción periódica de los lixiviados.



De los resultados obtenidos se calcula la lixiviación acumulada por unidad de superficie en función del tiempo, facilitando la extrapolación a una lixiviación a largo plazo, mediante la fórmula 6.2, determinando en cada contaminante la sumatoria de las 8 extracciones realizadas.

$$\text{Lixiviación acumulada} = \sum_{i=1}^8 E_i \quad (6.2)$$

La legislación holandesa (norma NEN 7345) según los valores de lixiviación acumulada, clasifica los materiales en dos categorías en función de los valores límites U1 y U2 que se indican en la tabla 6.2:

Tabla 6.2: Valores límite U1 y U2 según la NEN7345.

Metales lixiviados	Límites establecidos por la NEN 7345	
	U1 mg/m ²	U2 mg/m ²
As	40	300
Ba	600	4500
Cd	1	7,5
Co	25	200
Cr	150	950
Cu	50	350
Hg	0,4	3
Mo	15	95
Ni	50	350
Pb	100	800
Sb	3,5	25
Se	1,5	9,5
Sn	25	200
V	250	1500
Zn	200	1500
Br	25	200
Cl	20000	150000
F	1500	9500
SO ₄	25000	200000

Categoría 1: Los materiales cuyos valores de lixiviación acumulada estén por debajo de los límites U1 no presentan ninguna restricción medioambiental para su utilización, esto dependerá de los criterios físicos y estructurales.

Categoría 2: Los materiales que presenten lixiviación acumulada por sobre los límites establecidos a U2 tienen una utilización restringida.

Los materiales que tienen valores de lixiviación entre U1 y U2 no presentan ninguna restricción medioambiental para su uso, pero se obliga a la extracción del contaminante que supera los límites U1 al acabar la vida útil de este material.

INSA y ECN han realizado trabajos de modelización a partir de test monolíticos (Barna, 1994), utilizando cemento Pórtland como agente solidificante y residuos de depuración de gases de combustión de la incineración de RSU y escorias de fundición, dando como resultado en los

dos tipos de residuos, una gran cantidad de sales y un relativamente alto contenido de plomo. La aplicación de los tests de lixiviación anteriores ha permitido encontrar una buena relación entre los resultados experimentales y los simulados mediante el modelo de difusión (3D) para iones como el Na.

En general existen tres factores que pueden impedir la lixiviación de un compuesto:

- 1) Aislamiento químico, que también después de la fragmentación del producto sigue teniendo una pequeña lixiviación del componente en cuestión hacia el medio ambiente.
- 2) Aislamiento físico, que demuestra la influencia de la estructura de los poros del producto en la lixiviación (porosidad abierta); se puede deducir este parámetro en la movilidad del Na u otro componente inerte que se moviliza con la misma facilidad en la matriz (tortuosidad).
- 3) Retención química dentro del producto intacto, que a pesar de su aislamiento físico limitado, evita el lavado de los componentes por controles de solubilidad química.

6.3.- MUESTRAS SOMETIDAS A LOS TEST DE LIXIVIACIÓN.

En primera instancia se determinaron los lixiviados según el test NEN 7341, que tal como se ha mencionado anteriormente es el ensayo más agresivo. No obstante, dado que en ciertos casos algunos elementos sobrepasan el límite establecido $E_{máx}1\%$, se prosiguió a realizar el test monolítico NEN 7345.

Las muestras utilizadas fueron las estudiadas en los capítulos anteriores, tanto de las EIRSU sueltas y en dos fracciones 5-12 mm y 12-20 mm, así como las probetas fabricadas en el laboratorio y los testigos del tramo experimental de carretera.

En este sentido se aprovecharon los testigos utilizados en la determinación de las propiedades mecánicas, es decir, de un testigo de hormigón compactado con escoria de la carretera (THCEc) roto a compresión, se extrajo el material suficiente para realizar el test de disponibilidad NEN 7341 por duplicado. Lo mismo se hizo en el caso de los testigos de hormigón compactado con árido natural de la carretera (THCN) y testigos de grava-cemento con escoria de la carretera (TG-CEc).

Para el caso del test monolítico NEN 7345 se utilizaron los testigos cuyas caras superficiales se encontraban en buen estado, puesto que al extraer los testigos, hubo muchas probetas que sufrieron roturas en las caras durante este proceso, además se sometió a este test las probetas proctor modificado fabricadas en el laboratorio, con la dosificación seleccionada de HC y G-C.

La extracción de las probetas sobre los subtramos correspondientes, se realizó en zonas centrales sobre la anchura de la carretera, evitando acercarse demasiado a los bordes. Por otra parte, todos los testigos fueron sacados de los subtramos con espesor de 15 cm. Los testigos de G-C natural no fueron considerados en el estudio de lixiviación, ya que el único subtramo realizado con este material era demasiado frágil y sus dosificaciones fueron muy distintas a la G-C con EIRSU (tal como se explicó en el capítulo 5).

A continuación se indican las muestras sometidas a los tests de lixiviación del presente capítulo y se comparan con los resultados obtenidos con los límites establecidos en cada normativa indicada.

6.3.1 Muestras sometidas al test NEN 7341.

Para determinar la calidad en términos ambientales de las EIRSU sueltas de la misma planta (EM y Ec) y comparar con EIRSU de otra de las plantas de incineración de RSU de Cataluña, como es el caso de las EIRSU de Tarragona (ET), se efectuó el test NEN 7341 para cada una de estas muestras y para cada fracción estudiada en los capítulos anteriores, relacionando los resultados con el análisis químico (capítulo 3 y 5), para así encontrar el grado de solubilidad de cada una de las EIRSU estudiadas.

Además se determinó el grado de retención de los contaminantes en cemento, en comparación a las concentraciones encontradas sobre las EIRSU sueltas (sin cemento), para ello se realizó el test 7341 sobre muestras pulverizadas provenientes de matrices compactas (con cemento Pórtland), utilizándose testigos del tramo experimental de carretera y probetas proctor modificado fabricadas en el laboratorio con las dosificaciones establecidas en el capítulo 4 y 5. No obstante, los resultados de lixiviación de los testigos (cuyos componentes son las Ec5-12, Ec12-20, arena natural y cemento) no son directamente comparables con las Ec sueltas, ya que el porcentaje de participación de estas en la dosificación no es del 100%, por lo tanto se ha determinado el porcentaje de participación de las Ec5-12 y Ec12-20 en la carretera, llamadas Epc5-12 y Epc12-20 y que son comparables con las lixivaciones de las EIRSU sueltas.

Para determinar Epc5-12 y Epc12-20 se parte de las dosificaciones de Ec determinadas en el capítulo 5 para HCEc y G-CEc:

La participación de las Ec en la dosificación del HCEc fue la siguiente:

Ec5-12: 14,58 %

Ec12-20: 35,66 %

Para encontrar el porcentaje de participación de la fracción 5-12 mm con respecto al 100% de la mezcla, primero se sumó los porcentajes de ambas fracciones que participan en la mezcla (14,58% + 35,66), lo que dio un total de 50,26 %, si esto es el 100%, la fracción Ec5-12 tiene un valor de participación real del 29%. Y para la fracción 12-20 mm de 71,1%.

Seguidamente se realizó el mismo procedimiento con la dosificación de la G-CEc, dando para Ec5-12 el 26,8% y para Ec12-20 el 73,2%. Finalmente se calculó el promedio de los resultados obtenidos, por cada fracción, ya que los valores eran muy semejantes para G-CEc y HCEc, dando los siguientes resultados de Epc:

Epc 5-12 mm: 27,9%

Epc 12-20 mm: 72,1%.

Estos son los porcentajes reales de participación de Ec en la dosificación, por lo tanto se aplicó este porcentaje a cada uno de los iones lixiviados de cada fracción y la suma de estos resultados proporcionó Epc. Que viene a ser un equivalente de las EIRSU sueltas que participa en la dosificación. **Este parámetro fue de utilidad a la hora de comparar las EIRSU integradas en un sistema con cemento Pórtland y las EIRSU sueltas, ya que así ambas muestras participaron en iguales proporciones. No obstante, este procedimiento asume que los finos de la arena natural no aportan contaminantes al lixiviado.**

A continuación se enumeran las muestras utilizadas en el test de lixiviación por disponibilidad NEN 7341.

- 1) EIRSU de Mataró y Tarragona extraídas en el mes de marzo de 2001:

<i>EIRSU</i>	<i>Fracciones</i>
EM	5-12
EM	12-20
ET	5-12
ET	12-20

- 2) EIRSU utilizadas en la carretera (son EIRSU de Mataró extraídas en el mes de noviembre de 2001):

<i>EIRSU</i>	<i>Fracciones</i>
Ec	5-12
Ec	12-20

- 3) Testigos de la carretera experimental con Ec extraídos a los 28, 90 y 365 días de edad, en los subtramos de G-C y HC:

<i>Testigos</i>	<i>con Ec a 28, 90 y 365 días de edad.</i>
THC	Ec28/90/365d
TG-C	Ec28/90/368d

- 4) Testigos extraídos de la carretera experimental pertenecientes al subtramo realizado con los áridos naturales, a 365 días de edad:

<i>Testigos</i>	<i>con áridos naturales a 365 días de edad.</i>
THC	N365d

6.3.2 Muestras sometidas al test NEN 7345.

Una vez determinado el estudio de los lixiviados mediante el test NEN 7341, se encontraron los contaminantes que sobrepasaron el límite establecido $E_{máx}1\%$, por lo que se realizó el test NEN 7345, que tiene como objetivo determinar el grado de difusión de aquellos contaminantes peligrosos de las EIRSU sueltas, pero dentro de un sólido monolítico que en este caso es el HC y la G-C, para ello se utilizaron tanto probetas proctor modificado que se realizaron en el laboratorio como con los testigos extraídos del tramo de carretera.

Con el material monolítico de 3 probetas proctor modificado fabricadas en el laboratorio, con la dosificación seleccionada para HCEM, y otras 3 probetas de G-CEM, y almacenados en cámara húmeda hasta completar los 28 días de edad se realizó el test de difusión. Además, como ya se mencionó anteriormente, se realizó el mismo test para los testigos extraídos del tramo experimental de carretera en los subtramos de HC y G-C con Ec a edades de 28, 90 y 365 días. Y del subtramo de HC realizado con los áridos naturales con edades de 365, este último sirvió como parámetro comparativo de los lixiviados en este tipo de sistemas monolíticos.

A continuación se enumeran las muestras utilizadas en el test de lixiviación monolítico NEN 7345.

- 1) Las probetas proctor modificado fabricadas en laboratorio con las EIRSU de Mataró del mes de Marzo de 2001 (HCEM y G-CEM) con las dosificaciones seleccionadas del capítulo 4:

Probetas Marzo con EM a 28 días de edad

HC EM28d

G-C EM28d

- 2) Testigos de la carretera experimental con Ec extraídos a los 28, 90 y 365 días de edad, en los subtramos de G-C y HC:

Testigos con Ec a 28, 90 y 365 días de edad.

THC Ec28/90/365d

TG-C Ec28/90/368d

- 3) Testigos extraídos de la carretera experimental pertenecientes al subtramo realizado con los áridos naturales, a 365 días de edad.

Testigos con áridos naturales a 365 días de edad.

THC N365d

6.4.- RESULTADOS DE LOS TEST DE LIXIVIACIÓN

A continuación se muestran los resultados del ensayo de disponibilidad NEN 7341 para las EIRSU sueltas, posteriormente se indicarán los resultados de las EIRSU con cemento Pórtland en matrices compactas, en vista de los resultados obtenidos se realiza el test de difusión NEN 7345 o monolítico sobre probetas y testigos y finalmente se indican los resultados de los lixiviados del tramo instrumentado de G-CEc de la carretera.

6.4.1.- Resultados del test de disponibilidad holandés NEN 7341 de las EIRSU sueltas (sin cemento Pórtland).

A continuación se indican los resultados del test NEN 7341 para cada una de las muestras de EIRSU sueltas y de cada fracción estudiada en los capítulos anteriores, de las cuales se indica en la foto 6.5 una de las muestras fraccionada en 5-12 (izquierda) y 12-20 (derecha).

Foto 6.5 Muestras de EIRSU sueltas de la fracción 5-12 (izquierda) y 12-20 mm (derecha).

En la tabla 6.3 se puede apreciar en la columna 1, 2 y 3 los límites establecidos por la normativa holandesa Building Materials Decree y por diversos expertos para emisiones del 1%, 5% y 10%, en las columnas 4 y 5 se encuentran los iones lixiviados de las EM (del mes de Marzo de 2001), en las columnas 6 y 7 los de ET (también son muestras recogidas en el mes de Marzo de 2001), en las columnas 8 y 9 los de las Ec (EIRSU utilizadas en la carretera) y en la columna 10 Epc (porcentaje de cada metal lixiviado que participa en el tramo experimental de carretera).

Además, en los gráficos 6.1 a 6.7, se muestran los iones lixiviados de las EIRSU sueltas, según la fracción y el origen de la muestra.

Tabla 6.3: Resultados del test de disponibilidad NEN 7341 de las escorias sueltas (escorias sin cemento) en mg/kg.

Iones lixiviados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Límites			EM		ET		Ec		Epc
	Emáx 1%	Emáx 5%	Emáx 10%	EM 5-12	EM 12-20	ET 5-12	ET 12-20	Ec 5-12	Ec 12-20	
As	2,11	7,75	14,81	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	nd
Ba	21,22	102,51	204,13	50,52	15,85	63,62	62,04	86,63	94,90	92,59
Cd	0,06	0,21	0,41	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	nd
Co	1,06	4,93	9,77	2,81	2,64	2,84	3,40	3,49	4,07	3,90
Cr	5,02	24,37	48,57	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5,00	5,06	5,04
Cu	1,99	8,96	17,67	47,01	14,70	70,42	24,28	47,01	31,59	35,89
Mo	0,63	2,57	4,99	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	nd
Ni	2,32	9,1	17,57	3,69	2,81	5,74	5,92	4,68	3,25	3,65
Pb	4,91	21,36	41,93	54,02	17,99	72,51	33,18	55,66	37,90	42,86
Se	0,08	0,27	0,51	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	nd
Sn	1,00	4,87	9,71	18,96	13,68	21,63	17,03	20,01	14,65	16,14
Sb	0,15	0,65	1,28	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	nd
Zn	8,77	35,87	69,74	208,6	117,20	309,32	179,48	227,02	192,54	202,16
Cl-	477,0	2181,3	4311,7	3720,8	1371,2	2745,5	1415,7	1980,7	985,6	1263,2
SO ₄	1297,9	6017,8	11917,62	4520,5	3405,6	4867,8	2208,9	3503,6	3020,4	3155,2

n.d.: no detectadas.

Gráficos de iones lixiviados bajo el test 7341 de EIRSU sueltas.

Gráfico 6.1: Test 7341 de EIRSU sueltas – Ba.

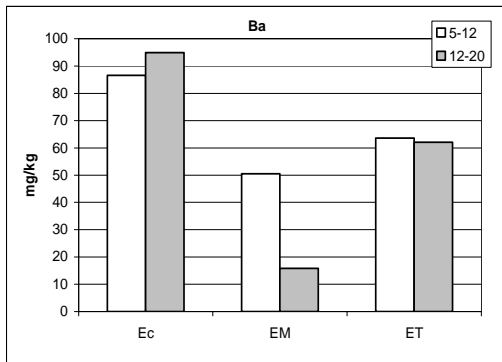


Gráfico 6.2: Test 7341 de EIRSU sueltas – Cu.

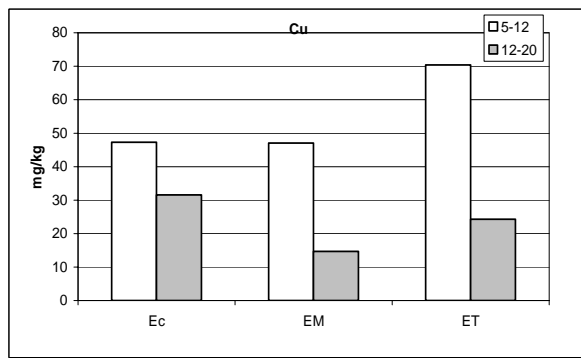


Gráfico 6.3: Test 7341 de EIRSU sueltas – Co.

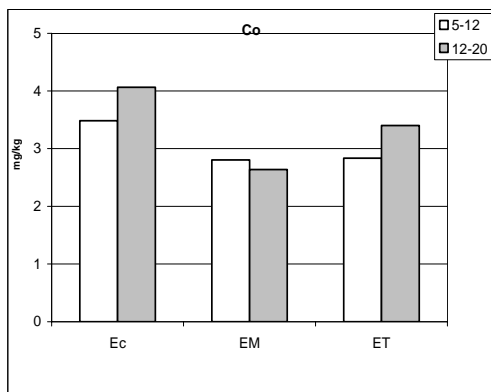


Gráfico 6.4: Test 7341 de EIRSU sueltas – Ni.

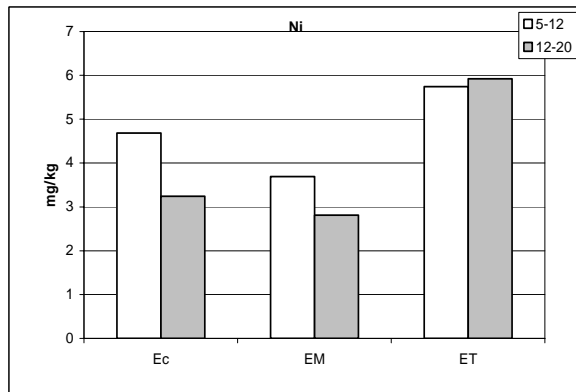


Gráfico 6.5: Test 7341 de EIRSU sueltas – Pb.

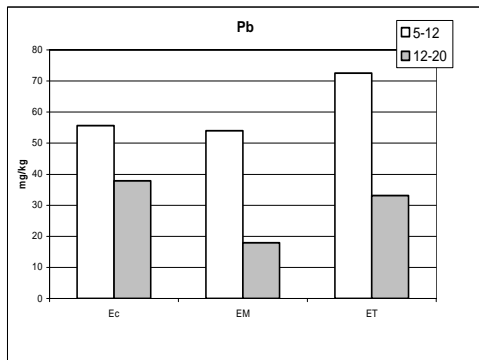


Gráfico 6.6: Test 7341 de EIRSU sueltas – Sn.

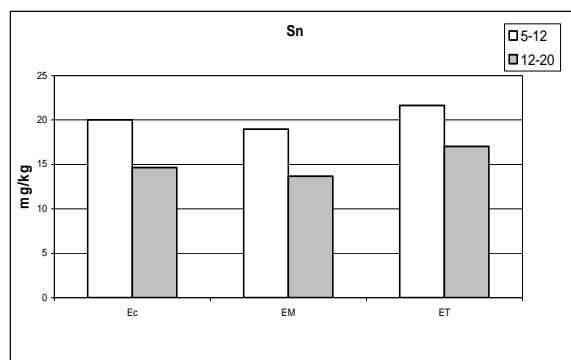
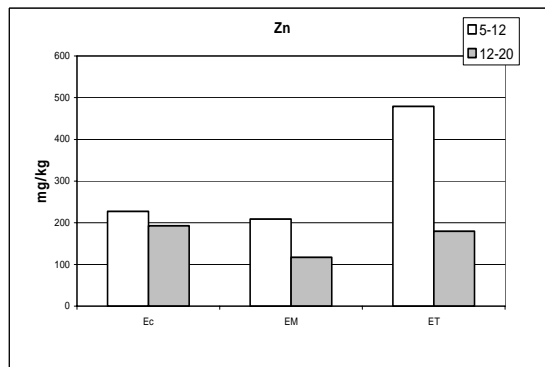


Gráfico 6.7: Test 7341 de EIRSU sueltas – Zn.



De los resultados se puede ver que la cantidad de iones lixiviados en ET es mayor que en EM, tanto en la fracción 5-12 como en 12-20 mm, en tanto que Ec está entre EM y ET, coincidiendo con los resultados del análisis químico determinado en las EM, ET y Ec de cada fracción de acuerdo al capítulo 3 y 5. A continuación se indica en la tabla 6.4, 6.5 y 6.6 y en los gráficos 6.8 a 6.13 los resultados del análisis químico y el de lixiviación de aquellos iones que también aparecen en el análisis de lixiviación de cada fracción y muestra estudiadas.

Tabla 6.4: Resultados del análisis químico y de lixiviación de aquellos elementos edetectados en las muestras de EM en mg/kg.

Iones Lixiviados	EM 5-12		EM 12-20	
	Análisis químico	Lixiviados	Análisis químico	Lixiviados
Cu	3.500	47,01	1.200	14,70
Pb	6.700	54,02	1.900	17,99
Zn	2.900	208,6	1.950	117,20
Cl-	4.200	3.720,8	1.500	1.371,2
SO ₄	6.700	4.520,5	4.800	3.405,6

Tabla 6.5: Resultados del análisis químico y de lixiviación de aquellos elementos detectados en las muestras de ET en mg/kg.

Iones Lixiviados	ET 5-12		ET 12-20	
	Análisis químico	Lixiviados	Análisis químico	Lixiviados
Cu	5.700	70,42	2.380	24,28
Pb	10.500	72,51	2.000	33,18
Zn	4.800	479,32	2.400	1.79,48
Cl-	3.300	2.745,5	2.100	1.415,7
SO ₄	7.600	4.867,8	4.100	2.208,9

Tabla 6.6: Resultados del análisis químico y de lixiviación de aquellos elementos detectados en las muestras de Ec en mg/kg.

Iones Lixiviados	Ec 5-12		Ec 12-20	
	Análisis químico	Lixiviados	Análisis químico	Lixiviados
Cu	3.850	47,01	2.600	31,59
Pb	6.200	55,66	4.000	37,90
Zn	3.110	227,02	2.700	192,54
Cl-	2.200	1.980,7	1.800	985,6
SO ₄	5.200	3.503,6	4.610	3.020,4

Gráficos de iones lixiviados bajo el test 7341 y análisis químico de EIRSU sueltas.

Gráfica 6.8: Iones lixiviados con el test 7341 y análisis químico de EM5-12.

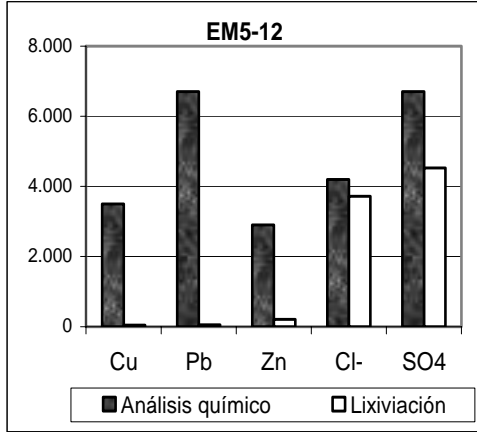
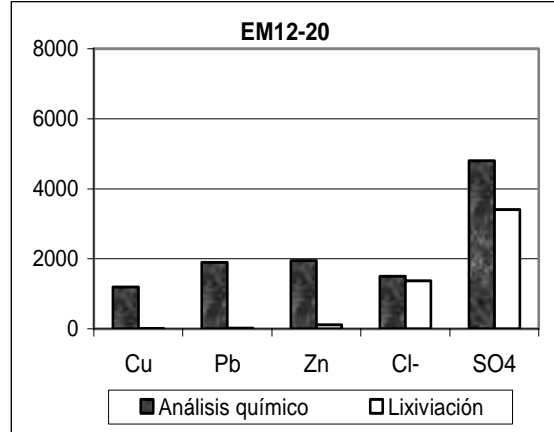


Gráfico 6.9: Iones lixiviados con el test 7341 y análisis químico de EM12-20



Gráfica 6.10: Iones lixiviados con el test 7341 y análisis químico de ET5-12.

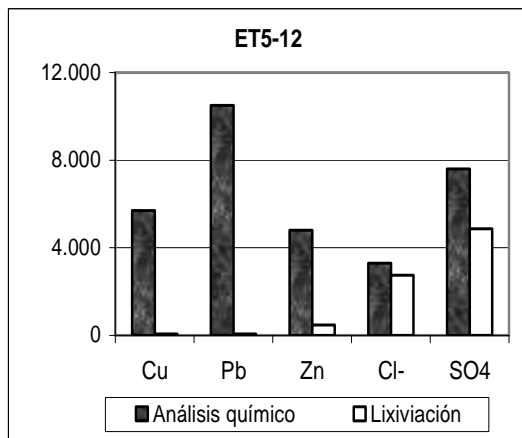
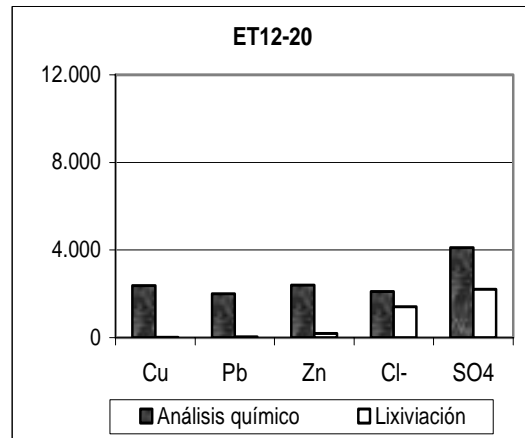


Gráfico 6.11: Iones lixiviados con el test 7341 y análisis químico de ET12-20



Gráfica 6.12: Iones lixiviados con el test 7341 y análisis químico de Ec5-12.

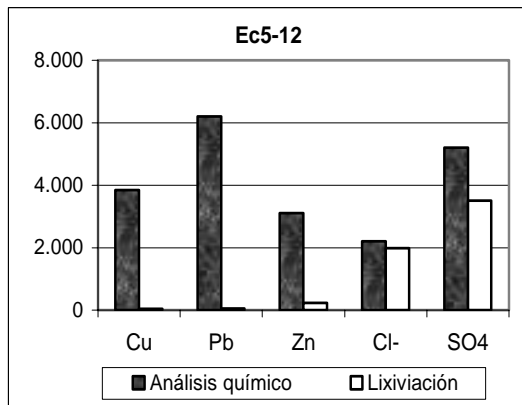
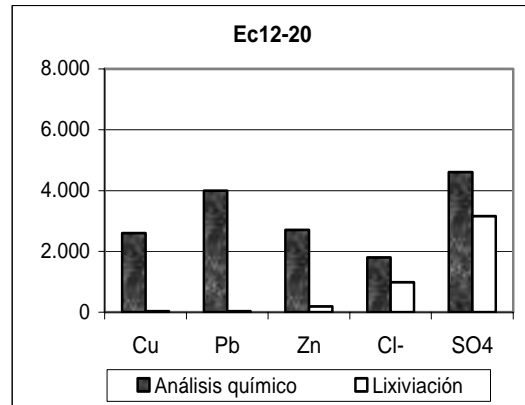


Gráfico 6.13: Iones lixiviados con el test 7341 y análisis químico de Ec12-20



Resulta interesante comparar los resultados de este ensayo con los de caracterización química de los capítulos 3 y 5, donde se aprecia que en la fracción 5-12 el contenido de iones es mayor que en 12-20, lo cual repercute en la lixiviación. Así, en este capítulo, la lixiviación de casi todos los iones es también más alta en 5-12 que en 12-20 (ver tabla 6.4 a 6.6). En las gráficas 6.8 a 6.13 se observa que los porcentajes de lixiviación en las EIRSU son sumamente bajos en comparación con los resultados del análisis químico, esto se debe a que los metales de las gráficas pueden formar compuestos insolubles, y por ello dar valores de lixiviación más bajos.

El alto contenido de cloruros y sulfatos (tablas 6.4 a 6.6), se justifican a partir de la alta solubilidad que poseen. Sin embargo, se observa que en los resultados del análisis químico los valores son más altos que los de lixiviación, esto se debe a que el análisis químico representa el contenido total de iones de las EIRSU.

Al comparar los metales lixiviados según el test de disponibilidad NEN 7341, sobre las EIRSU todo uno (indicados en capítulo 2 y 3), con las EIRSU estudiadas en este capítulo (fracción 5-12 y 12-20 mm), se observó la lixiviación de los mismos iones. No obstante, se cree que el As, Cd, Mo, Se, Sb, V, y W (encontrados en la bibliografía) provienen especialmente de la fracción de EIRSU 0-5 mm, misma que en esta tesis se descartó desde el inicio (ver capítulo 3), ya que no se detectó (en cantidades considerables) en las fracciones 5-12 y 12-20 de las EM, ET y Ec estudiadas.

Las columnas 4, 5, 8 y 9 de la tabla 6.3, muestran los iones lixiviados que pertenecen a la planta de tratamiento de Mataró (EM), sin embargo las dos primeras columnas son los resultados de las muestras extraídas en el mes de marzo del 2001 y las columnas 8 y 9 son los iones de las EIRSU utilizadas en el tramo experimental de carretera (Ec), extraídas de la misma planta de Mataró, pero en el mes de noviembre de 2001. Sin embargo, los resultados de lixiviación muestran claras diferencias entre las dos EIRSU de la misma planta extraídas en diferentes meses, esto se justifica ya que los iones lixiviados pueden cambiar cualitativa y cuantitativamente, en función del tipo de RSU del que procedan.

En los gráficos 6.14, 6.15 y 6.16 que se indican a continuación, se pueden ver los límites Emáx 1%, 5% y 10% representados con líneas verticales, donde la parte superior de la línea equivale a la Emáx de 10%, el punto intermedio al Emáx5% y el punto más bajo Emáx1%. Y en forma de barras se representan los valores de emisiones de cada ión lixiviado bajo el test NEN 7341 de las EIRSU sueltas.

Resultados del test NEN 7341 de EIRSU sueltas y límites Emáx 1%, 5% y 10%.

Gráfico 6.14: Iones lixiviados de las EIRSU sueltas, bajo el test 7341 y límites Emáx 1%, 5% y 10% - As, Cd, Co, Cr, Mo, Ni, Se, Sn, y Sb.

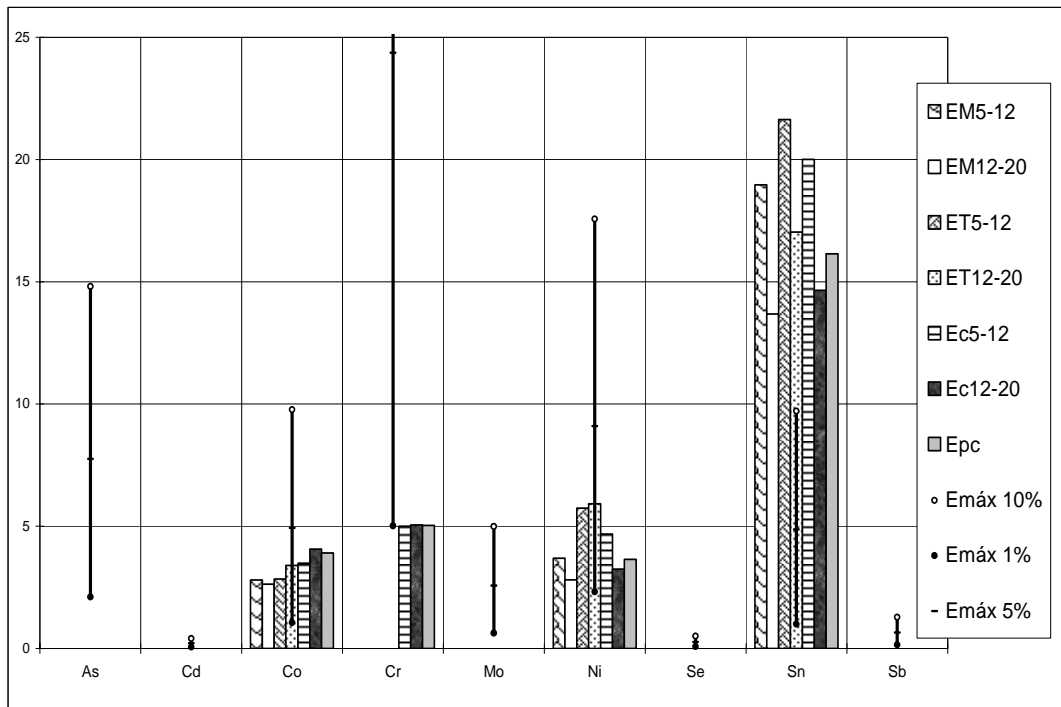


Gráfico 6.15: Iones lixiviados de las EIRSU sueltas, bajo el test 7341 y límites Emáx 1%, 5% y 10% - Ba, Cu, Pb, Zn.

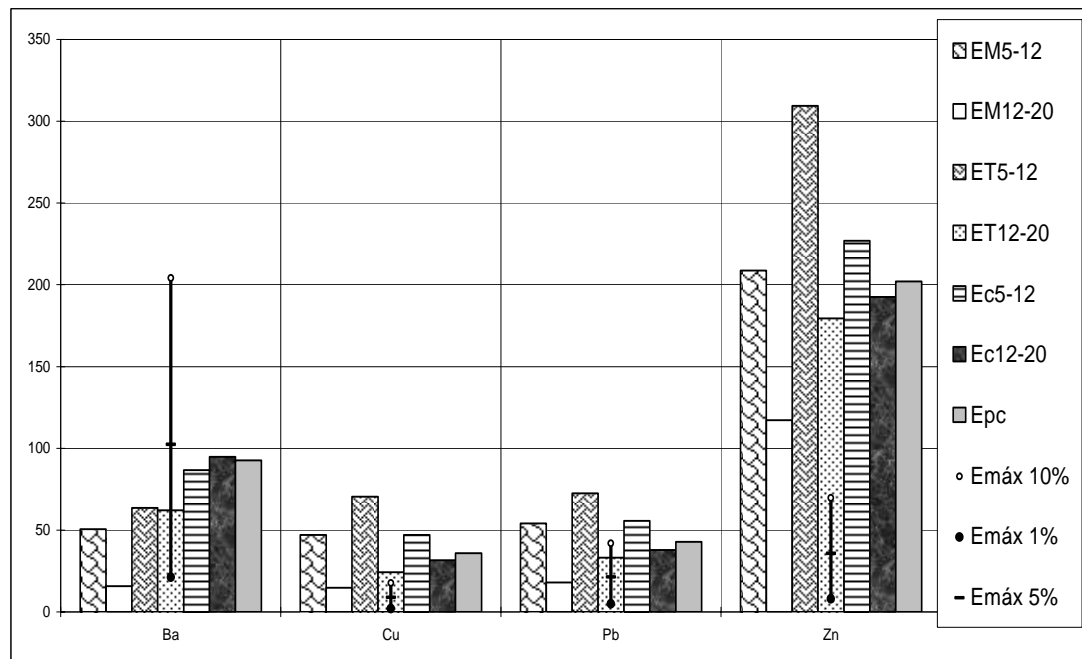
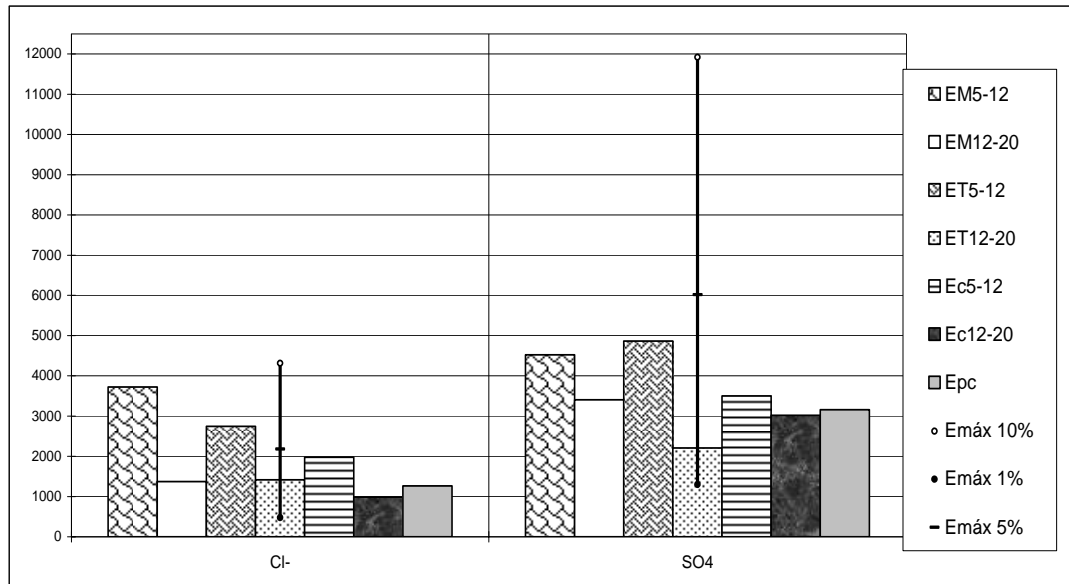


Gráfico 6.16: Iones lixiviados de las EIRSU sueltas, bajo el test 7341 y límites Emáx 1%, 5% y 10% - cloruros y sulfatos.



Como se puede observar en los gráficos 6.14 a 6.16, el As, Cd, Cr, Se y Sb cumplen con Emáx1%, en tanto que el Co, Ni, Ba y SO₄ cumplen con Emáx5% y Emáx10%, y el Cl cumple sólo con Emáx10%. Sin embargo, el Sn, Cu, Pb y Zn sobrepasan Emáx10%.

Si comparamos los resultados de las muestras ensayadas de Mataró, Tarragona y las de la carretera, son en su mayoría menores que Emax5% y Emáx10%, con lo se puede considerar que el material si bien no cumple con los requisitos de aceptación del componente según la normativa holandesa más prohibitiva del Emáx1%, si están dentro de los criterios menos restrictivos, de Emáx 5% y Emáx10%, excepto el Sn, Cu, Pb y Zn.

Con el objetivo de determinar el grado de retención (bajo el mismo test) que el cemento puede aportar en la retención de estos metales (en especial al Cu, Sn, Pb, Zn y Cl, que no cumplen con los límites de disponibilidad menos restrictivos), se realizó el análisis de lixiviación de las EIRSU, en muestras pulverizadas provenientes de matrices compactadas con cemento (tanto probetas como testigos), el mismo que se indica a continuación.

6.4.2.- Resultados del test de disponibilidad holandés NEN 7341 de las EIRSU integradas en un sistema con cemento Pórtland (tratadas con cemento Pórtland).

En la foto 6.6 se indican tres de los testigos del subtramo de carretera, que fueron finamente molidos y posteriormente sometidos al test NEN 7341, el primer testigo (empezando

desde la izquierda) pertenece al subtramo de áridos naturales, los dos siguientes dos testigos, fueron fabricados con EIRSU de la carretera, arena natural y cemento, en diferentes porcentajes, donde el primero de la derecha es de G-CEc y el testigo del medio es de HCEc. De esta forma se ha tratado las EIRSU con cemento Pórtland.

Foto 6.6: EIRSU integradas en un sistema con cemento Pórtland (tratadas con cemento Pórtland).



En la tabla 6.7 se aprecia en las columnas 1, 2 y 3 los límites mencionados en el apartado anterior de Emáx1%, 5% y 10%. En la columna 4 los iones lixiviados de las EIRSU que participan en la carretera (Epc), en las columnas 5, 6 y 7 se encuentran los iones lixiviados a partir de los testigos extraídos del subtramo de grava-cemento (G-C), en las columnas 8, 9 y 10 los del subtramo de HC y finalmente en la columna 11 los del subtramo de HC realizado totalmente con áridos naturales (THCN).

Tabla 6.7: Test de disponibilidad NEN 7341 de las EIRSU en matrices compactas con cemento Pórtland en mg/kg.

Iones Lixivios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Límites			Epc	Testigos de G-C			Testigos de HC			
	Emáx 1%	Emáx 5%	Emáx 10%		TG-C Ec28d	TG-C Ec90d	TG-C Ec365d	THC Ec28d	THC Ec90d	THC Ec365d	THCN 365d
As	2,11	7,75	14,81	nd	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	nd
Ba	21,22	102,5	204,13	92,5	42,47	57,39	68,98	43,87	80,14	41,59	29,81
Cd	0,06	0,21	0,41	nd	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	nd
Co	1,06	4,93	9,77	3,90	3,77	nd	5,54	7,44	nd	5,76	6,44
Cr	5,02	24,37	48,57	5,04	3,05	nd	3,18	0,91	nd	3,72	3,02
Cu	1,99	8,96	17,67	35,8	29,77	39,66	36,86	21,65	20,78	31,33	nd
Mo	0,63	2,57	4,99	nd	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	nd
Ni	2,32	9,1	17,57	3,65	2,30	nd	9,45	9,63	6,11	5,71	8,47
Pb	4,91	21,36	41,93	42,8	42,90	nd	8,97	58,43	12,97	Nd	nd
Se	0,08	0,27	0,51	nd	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	nd
Sn	1,00	4,87	9,71	16,1	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	nd
Sb	0,15	0,65	1,28	nd	nd	nd	nd	nd	n.d.	Nd	nd
Zn	8,77	35,87	69,74	202,1	571,99	148,73	96,93	444,5	360,6	127,33	34,83
Cl-	477,0	2181,3	4311,7	1263,2	938,89	1211,4	978,0	950,1	939,6	785,89	496,51
SO ₄	1297,9	6017,8	11917,6	3155,2	1137,2	1827,0	2042,3	1494,1	1334,5	3498,6	2936,2

En los gráficos 6.17 a 6.25, se muestran los resultados de cada uno de los iones lixiviados de los testigos según el subtramo de extracción y la edad de los mismos (28, 90, 365 y THCN365 días), en cada caso se incluyó en la primera barra, los resultados de la Epc (según el aporte correspondiente de Ec5-12 y Ec12-20 dentro de las especificaciones seleccionadas en el capítulo 5).

Gráficos de contaminantes lixiviados bajo el test 7341 de EIRSU tratadas con cemento

Gráfico 6.17: Test 7341 de EIRSU

Tratadas con cemento Pórtland – Ba.

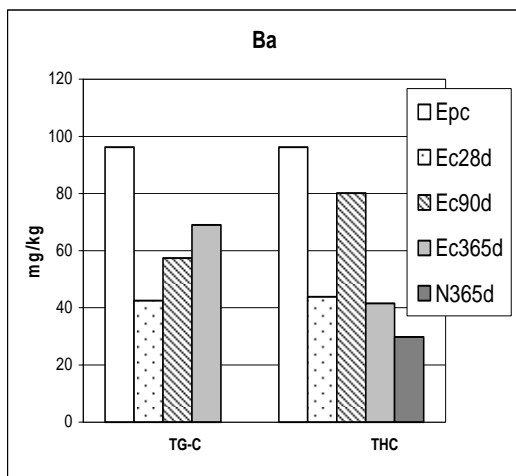


Gráfico 6.18: Test 7341 de EIRSU

tratadas con cemento Pórtlan – Cr.

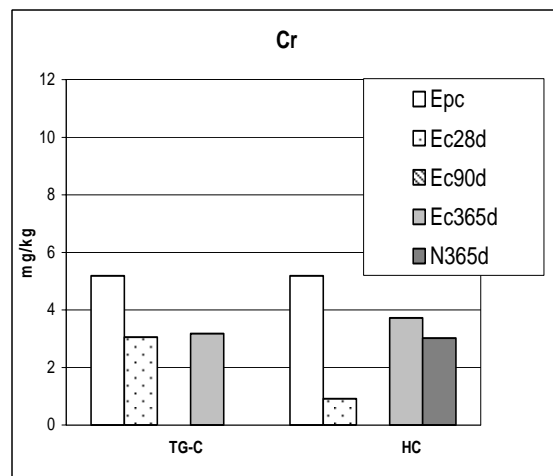


Gráfico 6.19: Test 7341 de EIRSU

tratadas con cemento Pórtland – Co.

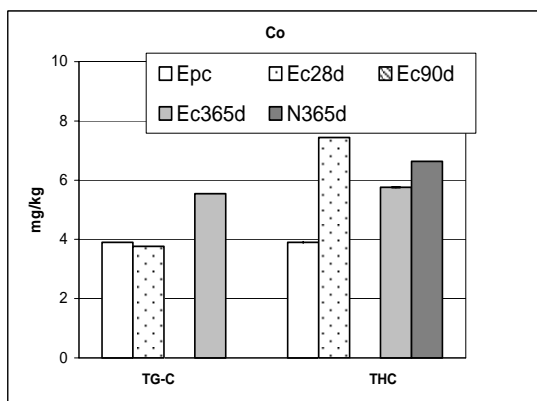


Gráfico 6.20: Test 7341 de EIRSU

tratadas con cemento Pórtlan – Cu.

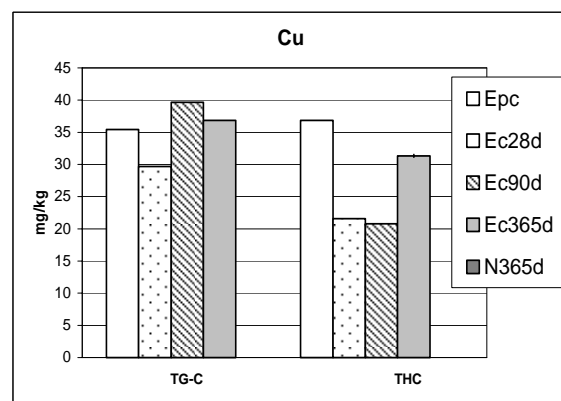


Gráfico 6.21: Test 7341 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland – Ni.

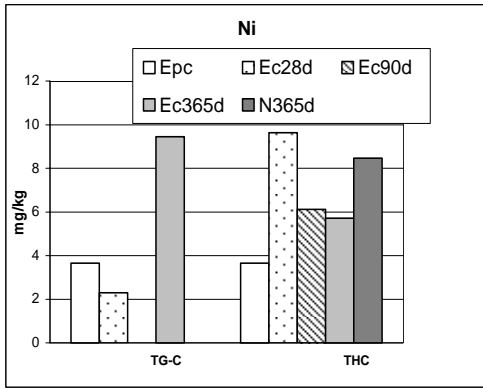


Gráfico 6.22: Test 7341 de EIRSU tratadas con cemento Pórtlan – Zn.

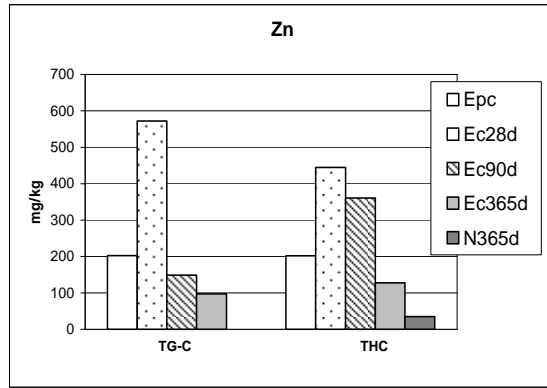


Gráfico 6.23: Test 7341 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland – Pb.

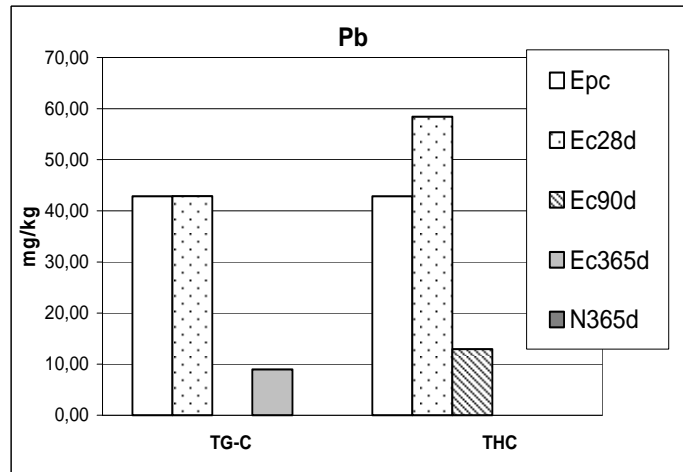


Gráfico 6.24: Test 7341 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland – cloruros

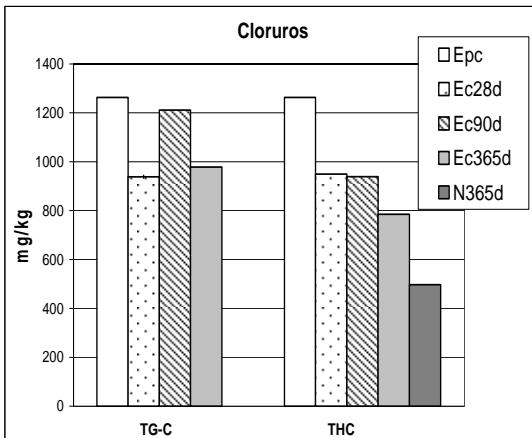
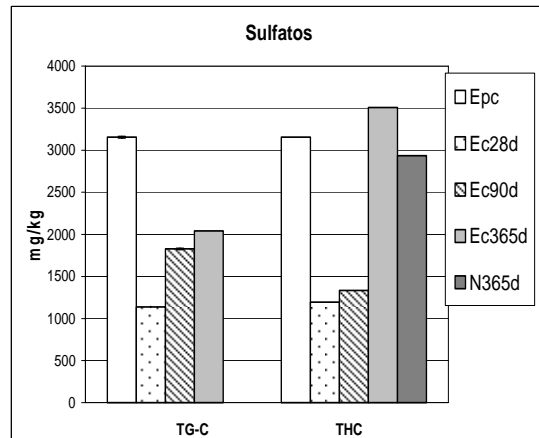


Gráfico 6.25: Test 7341 de EIRSU tratadas con cemento Pórtlan – sulfatos.



Los valores de Epc sirven para evaluar el grado de retención que otorga el cemento en cada uno de los elementos lixiviados y facilitar la comparación bajo el mismo ensayo, entre los lixiviados sobre las Ec sin cemento y las Ec con cemento Pórtland. Observándose que el Ba (gráfico 6.17), Sn, los cloruros (gráfico 6.24) y los sulfatos (gráfico 6.25) (excepto THCEc365d) son más altos en las escorias sin cemento (EIRSU sueltas), mientras que en las tratadas con cemento disminuyen considerablemente (llegando el Sn a no detectarse), caso contrario sucede con el Co, Cr, Ni, Zn y Pb, cuyos aumentos en las escorias cementadas pueden llegar a ser significativos, como el Zn cuya lixiviación alcanza casi a triplicar al de Epc. Otra particularidad de estos resultados es el comportamiento del Cu y Pb (Pb a los 28 días), donde continúan teniendo solubilidades semejantes a las EIRSU sueltas. Existen diferentes hipótesis que justifican los comportamientos anteriormente mencionados.

El Ba es un elemento que precipita con los cloruros y sulfatos, por lo tanto llega a formar parte de la matriz de escoria, este hecho se refleja en la poca cantidad de Ba (gráfico 6.17) que se presenta en la lixiviación (Alba, N., 1998). En lo referente a las EIRSU con cemento Pórtland de los testigos de G-CEc, la lixiviación del Ba aumenta sensiblemente con el tiempo, mientras que en los testigos de H-CEc se mantiene bastante constante excepto a los 90 días donde la lixiviación del Ba llega casi a duplicar al resto y a partir de esta edad se cree que el Ba estabiliza su lixiviación cerca de $E_{máx}5\%$. En cuanto a la estabilidad frente al cemento se puede observar que los iones están muy bien retenidos en la matriz de cemento, llegando a reducir su lixiviación en todos los testigos y edades, y acercándose sensiblemente (como en el caso del HC) a los valores de los testigos de hormigones con áridos natural THCN365d.

Los cloruros y los sulfatos cumplen con $E_{máx}5\%$, aunque sus comportamientos son distintos en función del tiempo. Así, los cloruros (gráfico 6.24) mantienen más o menos la misma lixiviación en los TG-CEc, en tanto que en los THCEc tiende a disminuir, en cambio los sulfatos (gráfico 6.25) tardan más en solubilizarse en ambos materiales. Al comparar con las EIRSU sin cemento, se observa que la matriz de cemento retiene muy poco a los cloruros y a los sulfatos.

El Co (gráfico 6.19) y el Ni (gráfico 6.21) aumentan su lixiviación con el tiempo, en los testigos de G-CEc y HCEc. Sin embargo, los resultados de lixiviación de Co y Ni en los THCN365d son muy parecidos a los realizados con EIRSU sin cementar. Esto se le atribuye al hecho de que el Co y el Ni pueden ser aportados de los combustibles provenientes del tráfico sobre la carretera.

En cuanto al Cr (gráfico 6.18), se cree que se trata del Cr(III), ya que éste se estabiliza con el cemento (Alba, N., 1998), reduciendo su lixiviación con el tiempo. Además, al igual que el Co y el Ni, su contenido de lixiviado es semejante a los THCN365d y ventajosamente están muy por debajo de los límites de emisión máxima mencionados.

El Sn que en las escorias sueltas tenía una emisión superior a $E_{máx}$ 10%, en las escorias tratadas con cemento Pórtland, se integran totalmente en la matriz de cemento, hasta el punto de no detectar su lixiviación. En tanto que el Cu, Pb y Zn continúan sobre los tres límites de emisión $E_{máx}$. No obstante, la presencia de estos metales podría adjudicarse al hecho de que la escoria esta constituida por diferentes residuos, como el vidrio, la cerámica, restos metalúrgicos, etc (ver capítulo 3 y 5, materiales constituyentes en las EIRSU). Los restos metalúrgicos, generalmente contienen Cu, Pb, Sn, Zn, etc, los que al coincidir en los testigos extraídos del tramo experimental, dependiendo del volumen del metal contenido en la muestra pulverizada, los resultados pueden dar valores poco representativos con respecto a todo el subtramo.

Si analizamos por separado al Cu, Pb y Zn (gráfico 6.20, 6.23 y 6.22) vemos que el comportamiento del Cu en el tiempo es de incremento de su lixiviación, mientras que el Pb y el Zn en cambio disminuyen en ambos tramos. Esto se debe a que según la bibliografía la concentración de Cu se eleva a niveles de pH alcalinos debido a que generalmente va asociado con la presencia de materia orgánica soluble (Van der Sloot, 1991), cuyo aporte es consecuencia directa del material orgánico arrastrado por la lluvia, desde la ladera al tramo de carretera, así el Cu se vuelve más soluble con el tiempo, mientras que el Zn y el Pb, se extraen en las primeras fracciones.

El Pb, es fuertemente soluble a elevados pH por la formación de $Pb(OH)_3$, a concentraciones elevadas puede retardar las primeras reacciones de hidratación, este problema ha sido ampliamente tratado por Ortego (1991), Herrera (1992), donde afirman que el Pb no puede sustituir al Ca, ni puede actuar como punto de nucleación ya que el pH de la reacción se encuentra en forma soluble. Suponemos que esa es la razón por lo que no se evidencia una estabilización (a los 28 días) en la matriz de cemento Pórtland.

En los gráficos 6.26, 6.27 y 6.28 se representan con líneas verticales las emisiones máximas de 1%, 5% y 10%, donde se observa que en general los testigos sometidos al test de lixiviación de disponibilidad NEN 7341, cumplen el E_{max} del 1% que marca la normativa y con $E_{máx}$ 5% menos restrictiva, lo que comparado con las EIRSU sueltas, muestran una disminución de los iones lixiviados, reflejando estabilización de los iones en la matriz cementante, por lo que se puede considerar que el material cumple con los requisitos de

aceptación de los componentes. No obstante continúan siendo Cu, Zn y Pb los iones que limitan el uso de las escorias.

Resultados del test NEN 7341 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland y límites Emáx 1%, 5% y 10%.

Gráfico 6.26: Componentes lixiviados de las EIRSU tratadas con cemento Pórtland, bajo el test 7341 y límites Emáx 1%, 5% y 10% - Ba, Cu, Pb, Zn.

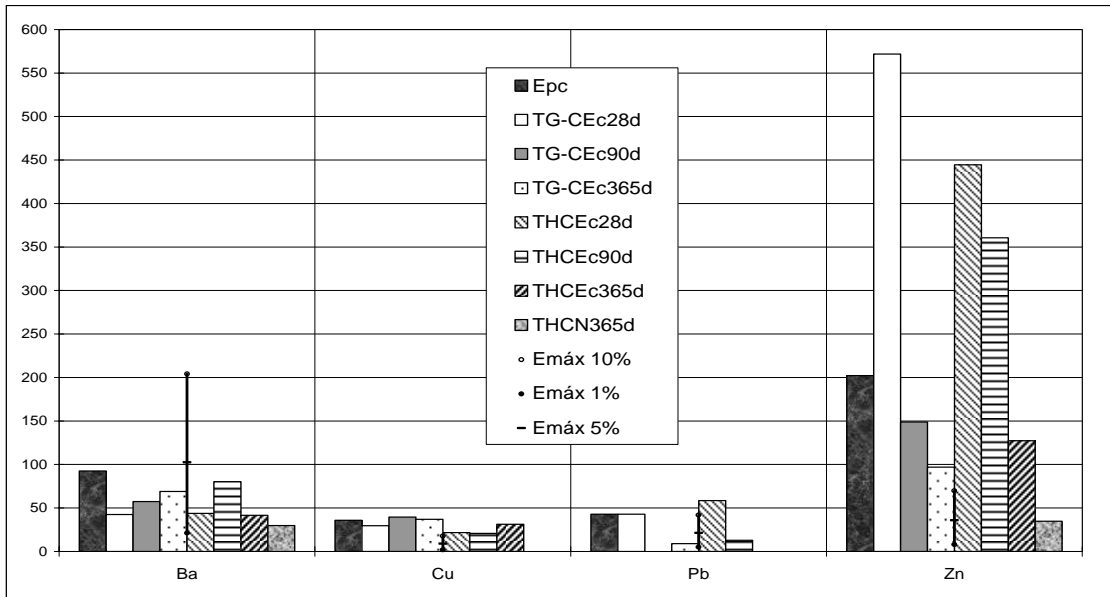
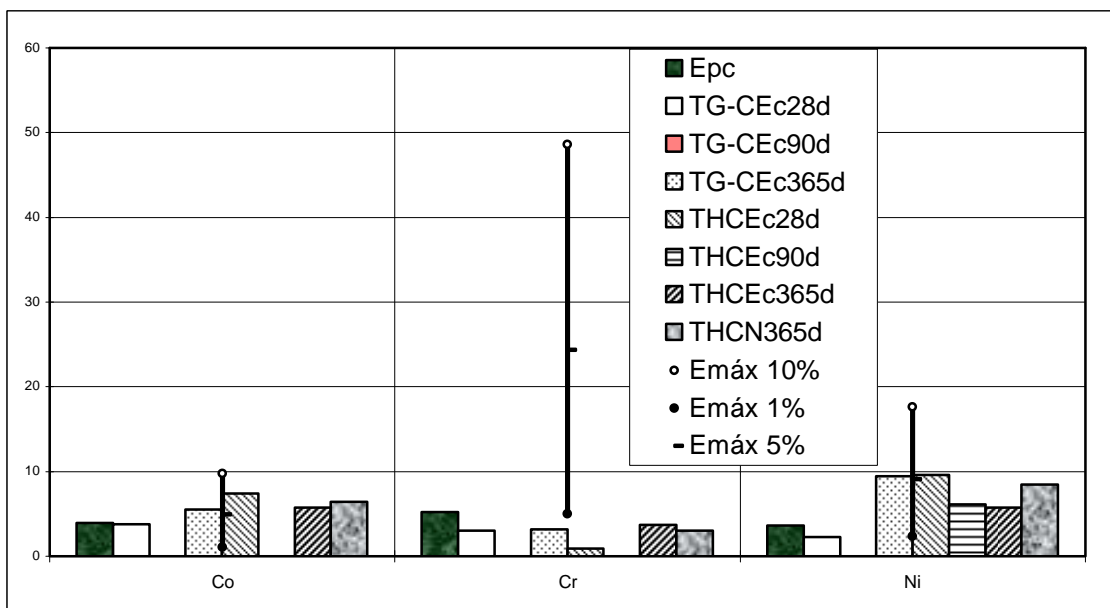
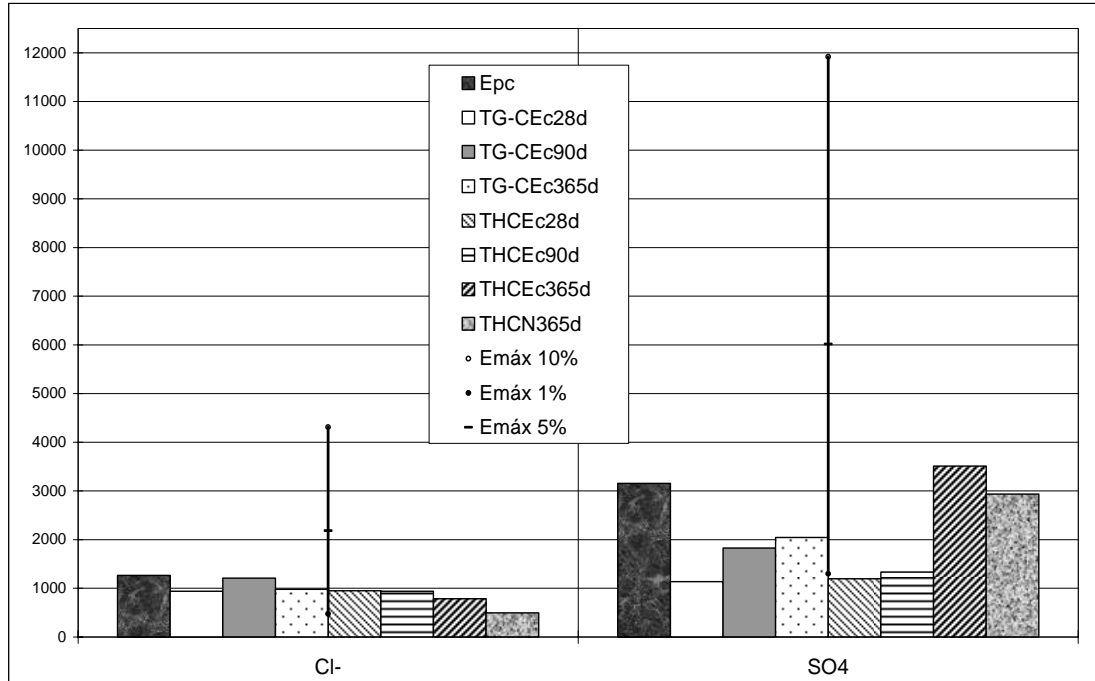


Gráfico 6.27: Componentes lixiviados de las EIRSU tratadas con cemento Pórtland, bajo el test 7341 y límites Emáx 1%, 5% y 10% - Co, Cr y Ni.



Gráfica 6.28: Componentes lixiviados de las EIRSU tratadas con cemento Pórtland, bajo el test 7341 y límites Emáx 1%, 5% y 10% - cloruros y sulfatos.



Como se observa en las gráficas 6.26, 6.27 y 6.28, el material ha tenido un buen comportamiento frente a los lixiviados, pese a que este ensayo tiene un ataque ácido sobre el material finamente molido (material que ha perdido su capacidad tamponadora en la matriz cementante), es decir se sometió al material a condiciones extremas, llegando siempre a sobreestimar los lixiviados.

Sin embargo, el material cumplió con los límites de la normativa holandesa de Emáx1%, excepto para el Cu, Pb y Zn que de hecho no cumplen ni el Emáx10%. Por lo que al no estar dentro de los requisitos de aceptación, se realizó un test específico para la aplicación. Así, con el objetivo de determinar el grado de solubilidad en el que se encuentran estos metales y cuantificar el posible impacto al medio ambiente, se hizo el test de lixiviación de difusión NEN 7345 (Tank leaching) sobre EIRSU en matrices cementadas en un sistema monolítico.

6.4.3.- Resultados del test de difusión NEN 7345 (Tank leaching test o monolítico) de las EIRSU integradas en sistemas compactados con cemento Pórtland.

En la foto 6.7 se indican tres de los testigos del subtramo de carretera, que fueron sometidos al test NEN 7345, con sus respectivos recipientes de extracción de lixiviado periódico. El primer testigo (empezando desde la izquierda) pertenece al subtramo de áridos naturales (THCN), los dos siguientes dos testigos, fueron fabricados con EIRSU de la carretera, arena natural y cemento, en diferentes porcentajes, donde el primero de la derecha es un testigo de THCEc y el testigo del medio es TG-CEc. De esta forma se ha tratado las EIRSU con cemento Pórtland.

Foto 6.7: Materiales monolíticos sometidos al test de lixiviación NEN 7345.



En la tabla 6.8 se indican en las columnas 1 y 2 los límites establecidos por la legislación holandesa. En las columnas 3 y 7 los iones lixiviados de las probetas fabricadas en el laboratorio (con las dosificaciones seleccionadas en el capítulo 4 de G-CEM y HCEM respectivamente), con las EIRSU de Mataró extraídas en el mes de marzo de 2001 y ensayadas a los 28 días de edad (prob. Marzo), en las columnas 4, 5 y 6 se encuentran los componentes lixiviados de los testigos extraídos de la carretera, pertenecientes al subtramo de grava – cemento (TG-CEc), en las columnas 8, 9 y 10 los del subtramo de hormigón compactado (THCEc) y finalmente en la columna 11 los del subtramo realizado con la áridos naturales (HCN)

Tabla 6.8: Resultados del test de difusión NEN 7345 de las escorias tratadas con cemento Pórtland, en materiales monolíticos de G-C y HC realizados con las dosificaciones seleccionadas.

Iones lixiviados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Límites		Grava-cemento				Hormigón compactado				
	U1 mg/m ²	U2 mg/m ²	G-C EM	TG-C Ec28d	TG-C Ec90d	TG-C Ec365d	HC EM	THC Ec28d	THC Ec90d	THC Ec365d	THCN 365d
As	40	300	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ba	600	4500	1,2	1,65	3,09	3,09	0,89	3,58	2,9	1,02	n.d.
Cd	1	7,5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Co	25	200	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cr	150	950	n.d.	2,74	0,8	2,3	n.d.	0,44	n.d.	n.d.	n.d.
Cu	50	350	n.d.	6,46	6,06	3,08	n.d.	2,14	n.d.	n.d.	n.d.
Hg	0,4	3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	nd
Mo	15	95	n.d.	n.d.	n.d.	1,59	n.d.	n.d.	n.d.	1,73	1,75
Ni	50	350	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Pb	100	800	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Sb	3,5	25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Se	1,5	9,5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Sn	25	200	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
V	250	1500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2,76	1,44	0,65	n.d.	n.d.
Zn	200	1500	n.d.	9,13	11,13	5,44	n.d.	1,57	2,22	3,82	4,44
Br	25	200	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cl	20000	150000	4379	3669	3055	4632	1932	2307	1543	1275	n.d.
F	1500	9500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
SO ₄	25000	200000	1321	1531	1753	2160	780	1022	1125	1130	n.d.

En los gráficos 6.29 a 6.36, se muestran los resultados de cada uno de los componentes lixiviados de los testigos según el subtramo de extracción y la edad de los mismos.

Gráficos de componentes lixiviados bajo el test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland.

Gráfico 6.29: Test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland – Ba.

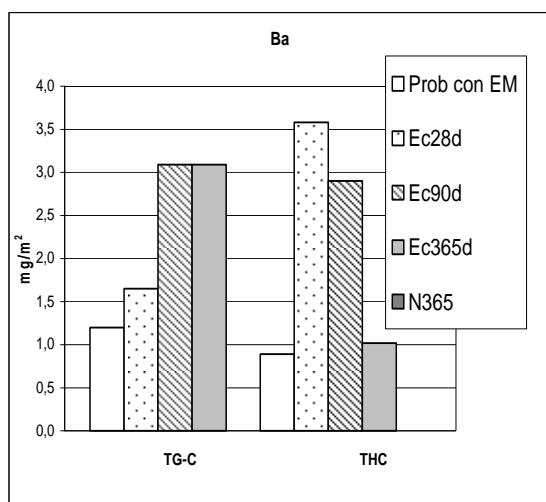


Gráfico 6.30: Test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland – Cr.

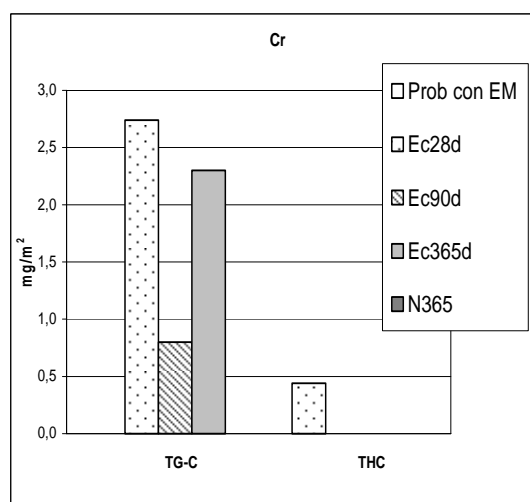


Gráfico 6.31: Test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland – Cu.

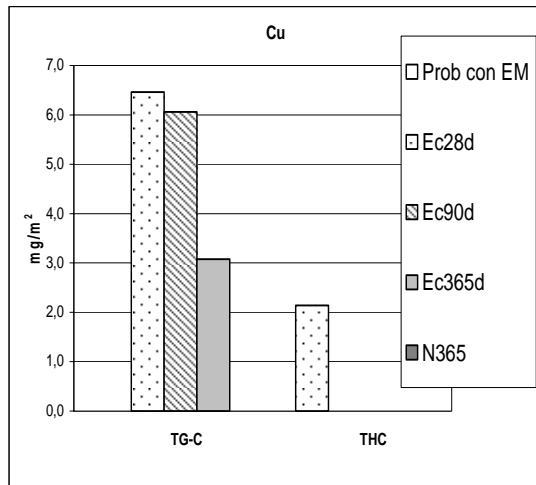


Gráfico 6.32: Test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtlan – V.

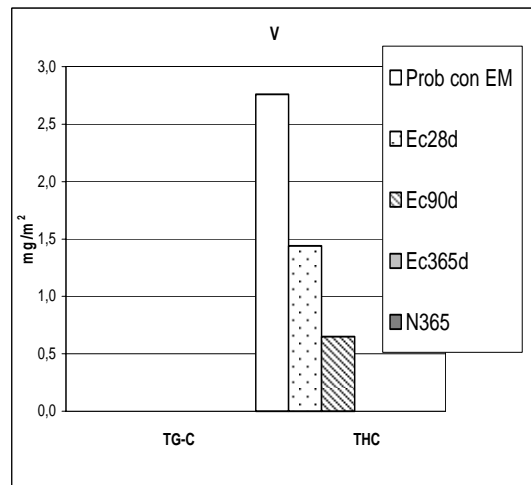


Gráfico 6.33: Test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland – Zn.

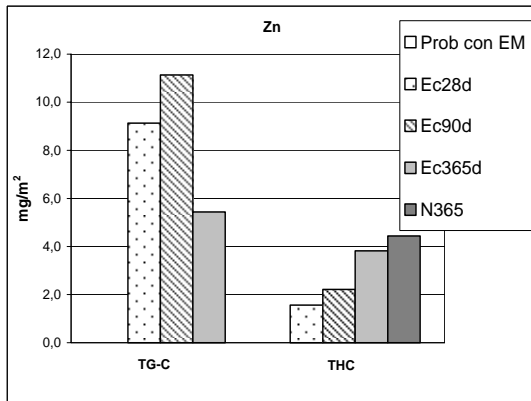


Gráfico 6.34: Test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtlan – Mo.

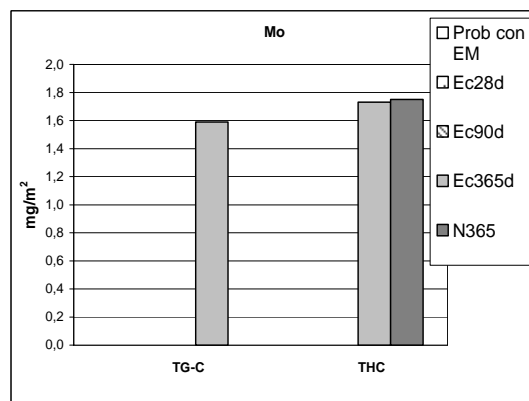


Gráfico 6.35: Test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtland –cloruros

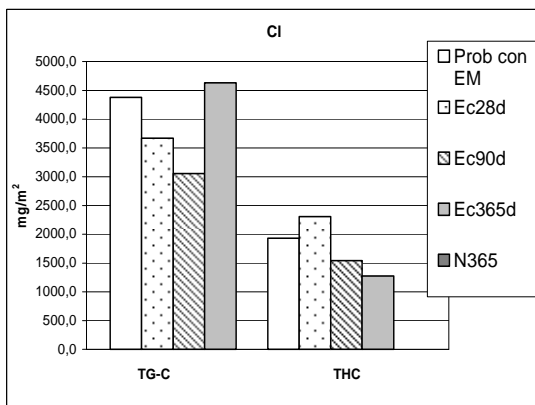
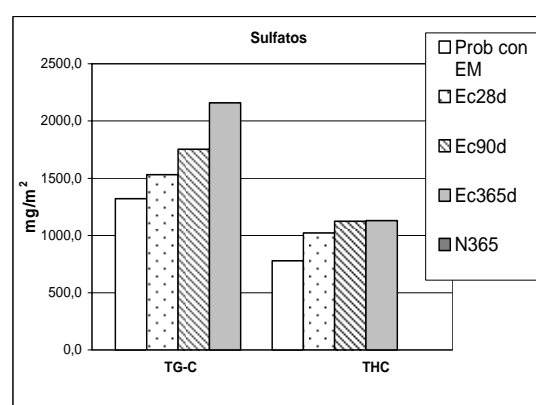


Gráfico 6.36: Test 7345 de EIRSU tratadas con cemento Pórtlan – sulfatos.



Comparando los resultados del test 7345 con los límites U1 y U2, se observa que hubo un excelente comportamiento de las matrices cementantes frente a los lixiviados. Así, el Cu, Pb y el Zn, que en el ensayo de disponibilidad coartaban el uso de las EIRSU, este ensayo pone de manifiesto que los iones se han integrado completamente en la matriz de cemento por lo que no se evidencia una lixiviación lo suficientemente alta para ser detectada, en todo caso las concentraciones de Cu, Pb, y Zn según el test son sumamente bajas. El resto de iones detectados son semejantes a los de los THCN, por lo que no se considera que las EIRSU en matrices compactadas, puedan emitir porcentajes peligrosos de contaminantes.

En cuanto al resto de iones, cuyos valores ya eran bajos en el test 7341, como era de esperar en este test, muchos de ellos incluso no se lograron detectar. En consecuencia, bajo la luz de la normativa holandesa NEN 7345, las muestras presentaron valores de lixiviación acumulada por debajo de los límites U1, y por lo tanto no presentan ninguna restricción medioambiental para su utilización. En cuanto a los resultados en las probetas elaboradas en el laboratorio con las mismas dosificaciones que los testigos de los subtramos de carretera, dan valores de lixiviación sensiblemente mayores que los de la carretera, por lo que son un buen referente para el estudio de lixiviación de las EIRSU en carreteras de HC y G-C.

6.4.4.- Resultados de lixiviación del subtramo de bacheo de grava-cemento con EIRSU y arena natural.

Como se indicó en el capítulo 5, se realizó en el tramo experimenta de la carretera un subtramo instrumentado, con el objetivo de recoger el agua de lixiviado y comparar con los resultados de los test realizados en el presente capítulo.

El subtramo instrumentado es el que se detalla en el esquema 1 (capítulo 5) al que se le denominó subtramo 7, en este subtramo de grava cemento compactado, se utilizó Ec5-12, Ec 12-20, arena natural AN2/0-5, y cemento Pórtland. Y se instrumentó de manera que se logre recoger el agua de lixiviación de forma periódica a corto plazo. No obstante, existieron ciertos obstáculos para recoger el agua, ya que por un lado, las heladas de las primeras semanas de construcción del subtramo impidieron extraer agua, luego la escasez de lluvia y la colmatación de los orificios de la tubería de recogida de lixiviados, obligó a regar el subtramo con agua de la toma de agua potable del sector (agua corriente), hasta conseguir una cierta cantidad de muestra, cuyos resultados son las dos muestras -G-CEc(1) y G-CEc(2)- que se indican en la tabla 6.9. Además se analizó el agua de la corriente con la que se regó, con el objetivo de descartar posibles contribuciones de metales provenientes del agua de riego.

Tabla 6.9: Valores de lixiviación del agua recogida en el subtramo de bacheo de grava-cemento con Ec (G-CEc), sin tomar en cuenta: el área lixiviada y el volumen de la G-CEc.

Iones	Iones detectados en el agua corriente	Iones lixiviados detectados en el subtramo G-CEc(1)	Iones lixiviados detectados en el subtramo G-CEc(2)
		(incluyen los lixiviados detectados en el agua corriente)	(incluyen los lixiviados detectados en el agua corriente)
(mg/l)			
Al	<0,5	5,283	1,659
B	0,287	<0,1	0,216
Ca	28,88	89,6	64,82
Fe	<0,1	<0,1	<0,1
K	21,09	39,7	25,27
Li	0,722	<0,1	<0,1
Mg	5,845	n.d.	14,98
Mn	<0,5	<0,5	<0,5
Na	253,4	336	125,6
P	<0,5	<0,5	<0,5
S	22,93	67,6	49,87
Si	4,492	4,88	0,6061
Ti	<0,1	<0,1	<0,1
Zr	<0,1	<0,1	<0,1
Br	0,7	1,8	<0,1
NO3	1,1	10,7	16
As	<0,1	<0,1	<0,1
Ba	<0,1	<0,1	<0,1
Cd	<0,1	<0,1	<0,1
Co	<0,1	<0,1	<0,1
Cr	<0,1	0,11	<0,1
Cu	<0,1	1,032	0,1084
Mo	<0,1	<0,1	<0,1
Ni	<0,1	<0,1	<0,1
Pb	<0,1	<0,1	<0,1
Sb	<0,5	<0,5	<0,5
Sr	0,391	0,605	0,2423
V	<0,1	<0,1	<0,1
Zn	<0,1	<0,1	<0,1
Cl	108,2	1564,2	103
SO4	76,4	963,2	227

Con el objetivo de determinar el comportamiento real a corto plazo del subtramo (7) de G-CEc, se ha separado en la tabla 6.10 los iones lixiviados del subtramo, cuyos límites se mencionan en la norma holandesa Building Materials Decree. En la tabla 6.10 se indican estos valores.

Tabla 6.10: Valores de lixiviación de los iones considerados en la norma holandesa Building Materials Decree, provenientes del subtramo G-CEc.

Iones	Lixiviados detectados agua corriente	Iones lixiviados detectados en el subtramo G-CEc(1)	Iones lixiviados detectados en el subtramo G-CEc(2)
		(incluyen los lixiviados detectados en el agua corriente)	(incluyen los lixiviados detectados en el agua corriente)
mg/lt			
Cu	<0,1	1.032	0,1084
Br	0,7	1.8	<0,1
Cl	108,2	1564,2	103
SO ₄	76,4	963,2	227

Como se puede apreciar en la tabla 6.10, la primera columna pertenece a los iones cuyos límites se mencionan en la norma holandesa Building Materials Decree. En la siguiente columna se encuentran los iones lixiviados provenientes del agua corriente y en las dos columnas siguientes se indican los iones lixiviados provenientes de la GCEc. No obstante, como se ha mencionado anteriormente, los lixiviados de la tabla 6.9 y 6.10 incluyen el agua de riego (agua corriente), por lo tanto se ha restado ésta de los lixiviados del subtramo, para obtener los metales lixiviados “provenientes de la G-CEc”, cuyos valores se indican en la tabla 6.11.

Tabla 6.11: Iones lixiviados procedentes del subtramo G-CEc (sin concentraciones aportadas por los lixiviados del agua corriente)

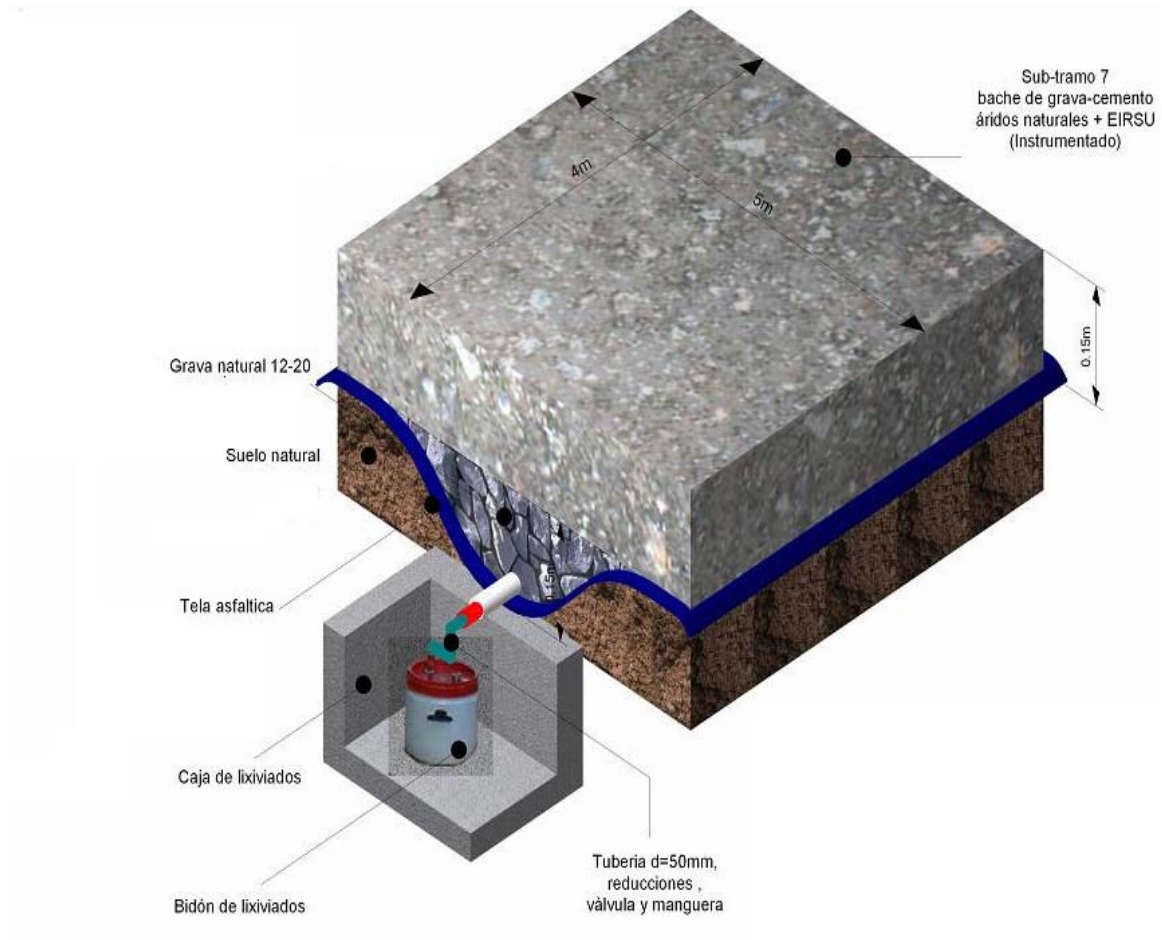
Iones	Iones lixiviados del subtramo G-CEc(1) (Sin los lixiviados detectados en el agua corriente)	Iones lixiviados del subtramo G-CEc(2) (Sin los lixiviados detectados en el agua corriente)
	mg/lit	mg/lit
Cu	1.032	0,1084
Br	1.1	0
Cl	1.456	0
SO ₄	886,8	150,6

Con el objetivo de comparar los lixiviados de la carretera (producidos por Ec) con los límites más restrictivos en materia de lixiviados de EIRSU de la normativa holandesa Building Materials Decree, se determinó la relación L/S para el subtramo de G-CEc, lo cual sirve para aplicar la formula 6.1 (mencionada en el apartado 6.2.3), para Emáx1%.

Para determinar la relación L/S (lt/kg) del subtramo, se evaluó el agua recogida de los lixiviados del subtramo G-CEc y se determinó el volumen de mezcla de grava-cemento. Con los siguientes datos de partida:

- El volumen de agua corriente que se regó en el subtramo: 600 litros.
- Se logró recoger mediante el sistema de instrumentación del subtramo: 35 litros.
- En un área del subtramo de 5 m de ancho, por 5 m de longitud y por 15 cm de espesor.
- La densidad del subtramo de G-CE: 1.95 g/cm³.

A continuación se indica el detalle (detalle 1, mencionado en el capítulo 5) del subtramo de G-CEc.



Con estos datos se calculó el volumen: $400 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} \times 0.15 \text{ cm} = 3000000 \text{ cm}^3$

El producto del volumen de G-CEc por la densidad del mismo, dio la masa del subtramo de G-CEc de 5.850 kg.

La relación líquido sólido (L/S) fue de: $35 \text{ lt} / 5.850 \text{ kg}$ dando un resultado en lt/kg de 0,006.

A continuación se multiplicó la relación L/S, para cada uno de los iones lixiviados de la tabla 6.11 y así se determinó el valor del lixiviado con respecto a la relación L/S, comparable con la Norma Holandesa Building Materials Decree para $E_{\text{máx}}1\%$ considerada como muy restrictiva, y adicionalmente se calcularon los límites para $E_{\text{máx}}5\%$ y $E_{\text{máx}}10\%$, los resultados se indican en la tabla 6.12.

Tabla 6.12: Comparación entre Emáx1% (Norma Holandesa Building Materials Decree), Emáx5%, Emáx10% y los metales lixiviados procedentes del subtramo de G-CEc (sin los lixiviados del agua corriente) con respecto a la relación L/S de 0,006.

Iones	Emáx1%	Emáx5%	Emáx10%	Iones lixiviados detectados en el subtramo G-CEc(1)	Iones lixiviados detectados en el subtramo G-CEc(2)
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Cu	0,25	0,26	0,28	0,0062	0,00065
Br	2,6	2,61	2,62	0,0067	0
Cl	52,4	58,27	65,5	0,0087	0
SO ₄	120,3	129,7	141,3	5,31	0,90

Si se comparan los valores de Emáx1% con los de lixiviación encontrados en G-CEc se puede ver que las dos muestras de agua recogidas tienen lixivaciones muy por debajo de Emáx1%, cumpliendo así con el límite más restrictivo de la norma holandesa Building Materials Decree. Razón por la cual, la lixiviación de las EIRSU del subtramo garantiza el buen comportamiento ante la lixiviación y el bajo costo ambiental que la carretera en general puede ocasionar.

6.5.- CONCLUSIONES DEL CAPITULO

Conclusiones del test de lixiviación por disponibilidad NEN 7341 desarrollado por Netherlands Normalisation Institute (NNI), en las EIRSU sueltas.

- 1) Si comparamos los resultados de las muestras ensayadas de Mataró, Tarragona y las de la carretera, son en su mayoría menores que Emax5% y Emáx10%, con lo se puede considerar que el material si bien no cumple con los requisitos de aceptación del componente según la normativa holandesa más prohibitiva del Emáx1%, si están dentro de los criterios menos restrictivos, de Emáx5% y Emáx10%, excepto el Sn, Cu, Pb y Zn.
- 2) Al comparar los iones lixiviados según el test de disponibilidad NEN 7341, sobre las EIRSU todo uno (indicados en el estado del arte y en el capítulo 2 y 3), con las EIRSU estudiadas en este capítulo (fracción 5-12 y 12-20 mm), se observó la lixiviación de los mismos contaminantes. No obstante, se cree que el As, Cd, Mo, Se, Sb, V, y W

(encontrados en la bibliografía) provienen especialmente de la fracción de EIRSU 0-5 mm, misma que en esta tesis se descartó desde el inicio (ver capítulo 3), ya que no se detectó en las fracciones 5-12 y 12-20 de las EM, ET y Ec del presente estudio.

- 3) Los resultados de las muestras de lixiviación pertenecientes a la planta de tratamiento de Mataró del mes de Marzo de 2001 son distintas a las del mes de Noviembre del mismo año (EIRSU utilizadas en el tramo experimental de carretera (Ec), esto se justifica bajo la premisa de que las EIRSU poseen gran heterogeneidad y la presencia de iones puede cambiar según el tipo de RSU del que proceden.
- 4) Con el objetivo de determinar el grado de encapsulamiento (bajo el mismo test) que el cemento puede aportar en la retención de los contaminantes que no cumplen con Emáx1%, se realizó el análisis de lixiviación de las EIRSU, en muestras pulverizadas provenientes de matrices compactadas con cemento (tanto probetas como testigos), el mismo que se indica a continuación.

Conclusiones del test de lixiviación por disponibilidad NEN 7341 desarrollado por Netherlands Normalisation Institute (NNI), en las EIRSU tratadas con cemento Pórtland.

- 1) Las EIRSU en matrices tratadas con cemento Pórtland tuvieron un buen comportamiento frente a los lixiviados, pese a que este test tiene un ataque ácido, sobre el material finamente molido (material que ha perdido su capacidad tamponadora en la matriz cementante). Sin embargo, el material cumplió con los límites de la normativa holandesa de Emáx1%, excepto con el Cu, Pb y Zn. Que al no estar dentro de los requisitos de aceptación, obligaron a realizar un test específico para la aplicación. Así, con el objetivo de determinar el grado de solubilidad en el que se encuentran estos metales y cuantificar el posible impacto al medio ambiente, se realizó el test de lixiviación de difusión NEN 7345 (Tank leaching) sobre EIRSU en matrices cementadas en un sistema monolítico.
- 2) En el test de lixiviación NEN 7341 con ataque ácido, tanto en las EIRSU como en EIRSU en matrices cementadas con cemento Pórtland, dieron resultados de Pb, Zn y Cu altos, esto se debe a que el pH es un factor importante en la movilización de estos metales. El pH de solubilidad dentro de la matriz cementante viene dado por la capacidad de tamponamiento, esta capacidad de tamponamiento se pierde en el test de

disponibilidad, por lo que el Pb y Zn y Cu al no integrarse en la matriz cementante son más proclives a lixiviar.

- 3) En el test de lixiviación NEN 7341 para las EIRSU en matrices con cemento Pórtland se encontró que: el Sn que en las EIRSU sueltas tenía una emisión superior a $E_{máx}$ 10%, en las EIRSU con cemento Pórtland, se integran totalmente en la matriz de cemento, hasta el punto de no detectar su lixiviación. En tanto que el Cu, Pb y Zn continúan sobre los tres límites de emisión $E_{máx}$. No obstante, la presencia de estos iones podría adjudicarse al hecho de que las EIRSU están constituidas por diferentes residuos, como el vidrio, la cerámica, restos metalúrgicos, etc. Los restos metalúrgicos, están generalmente formados por Cu, Pb, Sn, Zn, etc, los que al coincidir en los testigos extraídos del tramo experimental, dependiendo del volumen del metal contenido en la muestra pulverizada, pueden dar valores difíciles de correlacionar con los valores reales del subtramo en cuestión.

Conclusiones del test de lixiviación de difusión o monolítico NEN 7345, desarrollado por Netherlands Tank Leaching Test NTLT, en las EIRSU en matrices tratadas con cemento Pórtland.

- 1) Bajo la luz de la normativa holandesa NEN 7345, las muestras presentaron valores de lixiviación acumulada por debajo de los límites U1, en consecuencia, no presentan ninguna restricción medioambiental para su utilización.
- 2) Si bien el Cu, Pb y Zn en el ensayo de disponibilidad coartaban el uso de las EIRSU, en el test de difusión NEN 7345 se pone de manifiesto que estos metales se han integrado completamente en la matriz de cemento o no son lo suficientemente solubles con este método de lixiviación, en todo caso sus emisiones son sumamente bajas en este test.
- 3) Los resultados en las probetas elaboradas en el laboratorio con las mismas dosificaciones, que los testigos de los subtramos de carretera, dan valores de lixiviación según el test 7345, semejantes a los de la carretera, por lo que son un buen referente para el estudio de lixiviación de las EIRSU en carreteras de HC y G-C.

Conclusiones de la lixiviación del subtramo de bacheo de grava-cemento con EIRSU y arena natural.

- 1) Los valores de lixiviación del subtramo de bacheo de grava-cemento con EIRSU y arena natural, muestran valores muy bajos respecto al límite más restrictivo del Emáx1%, razón por lo cual la lixiviación del subtramo garantiza el buen comportamiento ante la lixiviación y el bajo costo ambiental que la carretera en general puede ocasionar.
- 2) Los resultados del test 7345 sobre las probetas elaboradas en el laboratorio y los testigos de la carretera, dieron valores de lixiviación sensiblemente mayores que las muestras de lixiviado tomadas del subtramo instrumentado de G-CEc de la carretera, por lo tanto son un buen referente para el estudio de lixiviación de las EIRSU en carreteras de HC y G-C a corto plazo.

Conclusiones generales del test de lixiviación.

- 1) A partir de los test ensayados se puede concluir que el uso de estas EIRSU no representan riesgo desde el punto de vista medioambiental, aunque es aconsejable un seguimiento periódico para asegurar que este comportamiento se mantenga.
- 2) Las EIRSU en matrices tratadas con cemento Pórtland produjeron en la G-C y en el HC una disminución de la lixiviación de metales pesados debido a las reacciones químicas entre las EIRSU y la matriz cementante, al mismo tiempo el proceso, redujo la permeabilidad y aumentó la durabilidad física de la matriz final.
- 2) Las EIRSU en matrices tratadas con cemento Pórtland resultaron muy favorables a la hora de utilizarlas, ya que el proceso no requirió cantidades excesivas de cemento Pórtland, además no fue necesario la utilización de ningún aditivo y la tecnología usada fue la misma que de un hormigón compactado con áridos naturales.

CAPÍTULO 7

7.- CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS.

7.1.- INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas a partir de los estudios realizados a lo largo de la tesis. Estas conclusiones se exponen en dos partes, primero las conclusiones generales y luego las conclusiones específicas. Para cerrar el capítulo, se han planteado posibles futuras líneas de investigación.

Las conclusiones generales responden al cumplimiento de los objetivos principales que han guiado el desarrollo de esta tesis. Estos se han dirigido a la caracterización de las EIRSU en su posible utilización como árido grueso, en la fabricación de hormigones compactados y gravamento, y su aplicación en un tramo experimental de carretera. En estos se han considerado distintos aspectos como son entre otros, el comportamiento mecánico, la durabilidad y el impacto ambiental.

Las conclusiones específicas obedecen a distintos aspectos concretos, referentes a los estudios que se han realizado, encaminados a conseguir los objetivos propuestos.

Finalmente se plantean los diferentes temas de investigación que han surgido en el desarrollo del presente trabajo, y que no ha sido posible cubrir en el periodo del desarrollo de la tesis.

7.2.- CONCLUSIONES GENERALES.

El objetivo principal de la presente tesis, ha sido estudiar el uso controlado de las EIRSU en construcción, especialmente como parte de los áridos en mezclas con cementos para la fabricación de matrices compactadas. Por lo que en la presente investigación, se ha llevado a cabo la caracterización de las EIRSU como áridos para hormigón compactado (HC) y gravamento (G-C) para firmes, a continuación se realizó el estudio de los sistemas con EIRSU, posteriormente se ejecutó la puesta en marcha de un tramo experimental de carretera y por último se hizo el análisis del impacto ambiental (control de lixiviados) que tendrían estas tipologías en obra. Las conclusiones generales derivadas del presente estudio se indican a continuación:

- De forma general los resultados obtenidos a partir de la caracterización de las EIRSU, mostraron cierta semejanza con los áridos de origen natural y que al mismo tiempo cumplen las especificaciones exigidas por el PG-3/2002, o en su defecto las recomendaciones del IECA (1996 y 2003) para áridos en HC y G-C. No obstante, existen algunos parámetros derivados de la morfología del material, cuyos resultados no están dentro de los límites exigidos en el pliego. Sin embargo, no han representado inconvenientes en el plazo de la realización de la presente tesis, dentro de la aplicación del tramo experimental de carretera.
- En cuanto al estudio de HC y G-C con áridos gruesos provenientes de las muestras de EIRSU de la incineradora de Mataró (del mes de Marzo de 2001 y Noviembre de 2001) y finos de arena natural, en las dosificaciones seleccionadas, arrojaron buenos resultados ante las solicitaciones aplicadas, llegando a cumplir los requerimientos recomendados por el IECA (1996 y 2003) para vías de baja intensidad de tráfico y muy cerca de lo exigido por el PG-3/2003.
- En el caso del tramo experimental de carretera, las soluciones con HCEc y G-CEc, utilizando la tecnología del HCR fueron adecuadas desde el punto de vista de las resistencias mecánicas respecto a las soluciones más tradicionales. Lamentablemente solo se pudo obtener resultados in situ, hasta los 90 días, pero es de pensar que las resistencias del hormigón compactado con EIRSU aumentan a largo plazo, ya que los testigos extraídos de la carretera a los 90 días y almacenados en cámara húmeda hasta completar los 365 días, aumentaron sus resistencias mecánicas, llegando incluso alcanzar lo exigido por el PG-3/2002.

- La inclusión de las EIRSU en matrices con cemento Pórtland produjeron en la G-C y en el HC una disminución de la lixiviación de metales pesados debido a las reacciones químicas entre los componentes de las EIRSU y la matriz cementante. Al mismo tiempo el proceso redujo la permeabilidad y aumentó la durabilidad física de la matriz final.
- La inclusión de las EIRSU en matrices con cemento Pórtland, fue ambientalmente favorable, ya que el proceso no requirió cantidades excesivas de cemento (semejantes a las recomendadas por el PG-3/2002), además no fue necesario la utilización de ningún aditivo, la tecnología usada fue la misma que la de un hormigón compactado con áridos naturales y el sistema de EIRSU con cemento Pórtland se avino a la heterogeneidad de las EIRSU.
- Los resultados reales de lixiviación del material puesto en obra en el subtramo de gravaje, dieron valores de lixiviación muy bajos respecto a las establecidas por el test holandés NEN 7341 con $E_{máx}1\%$, razón por lo cual la lixiviación del tramo garantiza el buen comportamiento ambiental dentro del plazo estudiado. En tanto que los test desarrollados en el laboratorio sobre muestras tanto de la carretera como probetas fabricadas con las mismas dosificaciones, dieron resultados de emisiones un tanto mayores a los límites establecidos por el test holandés NEN 7341 con $E_{máx}1\%$, por lo tanto se realizó el test 7345, cuyos resultados no presentan ninguna restricción medioambiental para su utilización y además fueron semejantes a los valores obtenidos en el tramo experimental.

7.3.- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS.

7.3.1 Conclusiones relativas a la etapa de caracterización.

- Al comparar los resultados de caracterización física, morfológica, química y las propiedades geológicas realizadas a las muestras de EIRSU por duplicado, se encontraron diferencias considerables, lo que nos obligó a repetir muestreos y ensayos en varias ocasiones, hasta obtener resultados coherentes entre sí. Esto se debe a la heterogeneidad que hace de las EIRSU un residuo tan peculiar y que al mismo tiempo, requiere de un análisis exhaustivo donde la clave puede ser la etapa de muestreo y cuarteo.

- Los resultados obtenidos a partir de la caracterización de las EIRSU, si bien son similares a los áridos de origen natural y cumplen las especificaciones exigidas por el PG-3/2002, o en su defecto las recomendaciones del IECA (1996 y 2003) para áridos en HC y G-C. No obstante, existen algunos parámetros, tales como Índice de Lajas, el coeficiente de desgaste Los Ángeles y la granulometría (vacíos granulométricos de las franjas 10-12,5 y 16-20 mm), cuyos resultados no están dentro de los límites exigidos en el pliego.

En este sentido se considera que para mejorar las características mencionadas del árido y cubrir las fracciones ausentes en la granulometría, se ha de añadir fracción gruesa de origen natural.

- Otra de las limitaciones encontradas en la etapa de caracterización fueron los sulfatos solubles en ácido de las fracciones 5-12, cuyo valor está relativamente cerca del límite recomendado por el PG-3/2002, pero esto se puede solucionar utilizando cemento resistente a sulfatos, previniendo de esta forma posibles expansiones del hormigón por ataque del SO_4 a la pasta y la formación de ettringita secundaria.
- Finalmente, un posible aspecto problemático que poseen las EIRSU es el potencial de expansión producido por la reacción de los álcalis del cemento con las EIRSU observado en el ensayo. Esto se debió a que los áridos contienen restos de vidrios domésticos (especialmente en las fracciones gruesas), que aportan un porcentaje significativo de sílice reactiva, que reacciona con los álcalis del cemento en el proceso de hidratación. Para atenuar o bloquear esta reacción (además de añadir un porcentaje de la fracción 12-20 mm de áridos naturales mencionado anteriormente), se debe utilizar cemento bajo en álcalis. Otra alternativa sería, frenar la entrada de humedad a las matrices compactadas. Ello se producirá si estas capas se utilizan bajo mezclas asfálticas o impermeabilizadas.

7.3.2 Conclusiones relativas a la etapa de estudio de hormigón compactado y grava-cemento con EIRSU.

- El estudio de hormigones compactados y grava cemento con áridos gruesos provenientes de las muestras de EIRSU de la incineradora de Mataró (del mes de Marzo de 2001 y Noviembre de 2001) y finos de arena natural, en las dosificaciones seleccionadas, en general arrojaron buenos resultados sobre las probetas fabricadas en el laboratorio, ante las sollicitaciones aplicadas, llegando a cumplir los requerimientos recomendados por el IECA (2003) y el PG-3/2002 para vías de baja intensidad de tráfico para G-C y muy cerca de lo exigido por el PG-3/2003 para HC.

Así, la inclusión del 14,79% de cemento para el HCEM dio valores de 3,205 MPa a tracción indirecta a los 28 días. Sí bien no cumple con el valor de 3,3 MPa recomendado por el PG-3/2002, si satisfizo los 2,8 MPa recomendado por el IECA (2003) para vías de baja intensidad de tráfico.

En cuanto a la G-CEM con una inclusión de 4,23% de cemento fue la más favorable dando valores a compresión simple a 7 días de 3,81 MPa llegando a cumplir con la resistencia a compresión simple de 3,5 MPa a 7 días exigida por el PG-3/2002 para capas base de tráfico pesado o medio.

7.3.3 Conclusiones relativas a la etapa de aplicación en un tramo experimental de carretera.

En el caso del tramo experimental de carretera, las soluciones con HCEc y G-CEc, utilizando la tecnología del HCR fueron adecuadas desde el punto de vista de las resistencias mecánicas por las siguientes razones:

- Tanto la G-CEc en capas base para tráfico ligero como el HCEc en pavimentos de baja intensidad de tráfico, y la G-CEc en la reparación local de baches, dieron buenos resultados mecánicos. No obstante, es importante recordar que cada muestra es bastante heterogénea, por lo que se recomienda hacer un amplio estudio de caracterización antes de utilizar las EIRSU y establecer una resistencia característica un tanto mayor a las recomendadas, ya que la diferencia de compactación del laboratorio con la del tramo experimental de carretera, hace que las probetas fabricadas en el laboratorio resistan mejor las sollicitaciones, que los testigos extraídos de los subtramos.

Así pues, la resistencia mecánica de los THCEc no cumplieron con los parámetros exigidos por el PG-3/2002 para HC de 3,3 MPa 28 días, ya que tuvieron una resistencia a tracción indirecta de 3,17 MPa. Sin embargo, está dentro de lo recomendado por el IECA en vías de baja intensidad de tráfico de 2,8 MPa.

En cuanto a G-C, el IECA (2003) recomienda una resistencia a compresión simple a 90 días, del orden de 6,5 a 8,5 MPa. La resistencia a compresión de los TGCEc fue de 6,53 MPa, cumpliendo así con la recomendación del IECA (2003) para G-C.

Es de prever que las resistencias del hormigón compactado con EIRSU aumenten a 365 días por cierto componente puzolánico de las EIRSU, pudiendo incluso alcanzar lo exigido por el pliego. Lamentablemente, esto no se pudo comprobar con los testigos de carretera, ya que a los 365 días dieron resistencias menores que a 90 días. Esto se debió a que posteriormente a los 90 días de edad, se introdujo en la carretera maquinaria pesada para extraer los árboles cercanos a la carretera, fisurando algunos subtramos, entre ellos el de HCEc y HCN.

- La utilización de ciertas EIRSU (escograva) como sustitución de los áridos naturales evita el apilamiento de estos materiales en las plantas de tratamiento de RSU. Además, el volumen de EIRSU es actualmente considerable siendo importante gestionarlo, por lo que la utilización de EIRSU como parte de los áridos en hormigones compactados, se puede ver reducida de forma elevada a corto plazo.
- La tecnología de puesta en obra del hormigón compactado con rodillo en mezclas de EIRSU y áridos de origen natural, no requirieron equipos distintos a los que normalmente ya poseen los contratistas locales y que les permite ejecutar obras de pavimentación a precios competitivos, puesto que no tienen que realizar grandes inversiones económicas en maquinaria.

7.3.4 Conclusiones relativas a la etapa del estudio de impacto ambiental.

En cuanto al impacto ambiental de las EIRSU, en la presente tesis se evaluó por medio de los tests de lixiviación y del estudio de los lixiviados, cuyos resultados concluyen los siguientes aspectos:

- Los resultados de lixiviación de las muestras extraídas del subtramo instrumentado de grava-cemento dieron valores de lixiviación muy bajos respecto a los establecidos por la

- especificación para el test holandés NEN 7341 con $E_{máx}1\%$, razón por la cual la lixiviación del tramo garantiza el buen comportamiento ambiental en el plazo de la presente tesis.
- En cuanto a los resultados del Test NEN 7341, obtenidos en el laboratorio sobre las muestras de EIRSU sueltas de Mataró, Tarragona y las de la carretera, son en su mayoría menores que $E_{máx}5\%$ y $E_{máx}10\%$, con lo se puede considerar que el material suelto, si bien no cumple con los requisitos de aceptación del componente según la normativa holandesa más prohibitiva del $E_{máx}1\%$, sí están dentro de los criterios menos restrictivos, de $E_{máx}5\%$ y $E_{máx}10\%$, excepto para el caso del Sn, Cu, Pb y Zn.
 - Con el objetivo de determinar el grado de retención (bajo el mismo test) que el cemento puede aportar en la retención de los contaminantes que no cumplen con $E_{máx}1\%$, se realizó el análisis de lixiviación de las EIRSU, en muestras pulverizadas provenientes de matrices compactadas con cemento (tanto probetas como testigos), cuyos resultados mostraron un buen comportamiento frente a los lixiviados, pese a que este test realiza un ataque ácido sobre el material finamente molido (material que ha perdido su capacidad tamponadora en la matriz cementante). Sin embargo, el material cumplió con los límites de la normativa holandesa de $E_{máx}1\%$, excepto con el Cu, Pb y Zn, que al no estar dentro de los requisitos de aceptación, obligaron a realizar un test específico para la aplicación.
 - Así pues, con el objetivo de determinar el grado de solubilidad en el que se encuentran estos metales y cuantificar el posible impacto al medio ambiente, se realizó el test de lixiviación de difusión NEN 7345 sobre EIRSU en matrices cementadas en un sistema monolítico, cuyos resultados presentaron valores de lixiviación acumulada por debajo de los límites U1. En consecuencia, no presentan ninguna restricción medioambiental para su utilización.
 - Los resultados del test NEN 7345 sobre las probetas elaboradas en el laboratorio y los testigos de la carretera, dieron valores de lixiviación sensiblemente mayores que las muestras de lixiviado tomadas del subtramo instrumentado de G-CEc de la carretera, por lo tanto son un buen referente para el estudio de lixiviación de las EIRSU en carreteras de HC y G-C a corto plazo.

- Como se ha mencionado anteriormente, las EIRSU necesitan un control semejante e incluso más riguroso que los áridos de origen natural. Esto se refiere a crear un protocolo, mismo que se viene planteando en el transcurso de esta tesis. El protocolo para el caso de la G-CE y HCE, se inicia por la etapa de caracterización de las EIRSU, incluyendo el análisis químico de las EIRSU, cuyos resultados son los que determinan los diferentes parámetros a tener en cuenta en la aplicación. Posteriormente se ha de realizar los cálculos de dosificaciones adecuadas, tomando en consideración las recomendaciones del PG-3/2002, seguidamente la caracterización mecánica de los hormigones, así como el estudio de durabilidad. Y finalmente la etapa de análisis medioambiental, a corto y largo plazo.

7.4.- INVESTIGACIONES FUTURAS

A lo largo del trabajo presentado se han puesto de relieve otros temas de investigación relativos al comportamiento de las EIRSU. De entre ellos cabe destacar la evolución de las EIRSU a largo plazo, tanto desde el punto de vista mecánico, de durabilidad y el impacto ambiental, ya que por efectos de la utilización de la carretera así como factores de orden atmosférico podrían ocasionar cambios en la solubilidad de ciertos metales de las EIRSU.

Por otro lado, sería interesante realizar el estudio de HC y G-C con EIRSU de diferente calidad y procedencia, así como variar el tipo de cemento, e incluso considerar la utilización de aditivos. Además, se puede probar la participación de mezclas con áridos gruesos de origen natural, de tal forma que se pueda obtener las dosificaciones más apropiadas, cuyas respuestas mecánicas, de durabilidad y de impacto ambiental, sean aceptables a los requerimientos establecidos en el PG-3/2002.

Independientemente del análisis de H-C y G-C, es importante estudiar la aplicación de las EIRSU como áridos para la construcción de prefabricados, en rellenos, como capas de firme, etc. No obstante, hay que destacar la necesidad del establecimiento de un protocolo de control.

BIBLIOGRAFÍA

VVAA. (2001). Ingeniería Ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. McGraw-Hill. International (UK).

ACEVERSU. (2002). Asociación Catalana de empresas de valorización energética RSU <http://www.aceversu.com>. Acceso: 2 de Julio de 2002.

AEMA. (2004). Agencia Europea del Medio Ambiente. Señales medioambientales.

Agencia de Residuos de Cataluña. (1999). Los residuos de Cataluña,. <http://www.arc-cat.net/publicacions/pdf/agencia/res-cat.pdf>. Acceso: 21 de Enero de 2000.

Agencia de Residuos de Cataluña. (2004). Los residuos de Cataluña, Balance estadístico del 2003. <http://www.arc-cat.net/publicacions/pdf/agencia/res-cat.pdf>. Acceso: 5 de Marzo de 2004.

Aguado, A., Agulló L. (2004). Anales de la construcción y materiales avanzados. E.T.S. d'Enginyers de Camins, Canals i Ports. UPC.

Akhter, H., Butler, L., G., Branz, S., Cartledge, F. K. y Titlebaum, M.E. (1990). *Immobilization of As, Cd, Cr and Pb – Containing Soils by Using Cement or Possolanic Fixing*. Journal of Hazardous Materials, 9, 2-3, pp: 145-155.

Alba, N. (1998). *Estabilizació/Solificiació de residus d'incineració de RSU en matrius de ciment, Valoració ambiental*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Alba, N., Gassó, S., Lacorte, T. y Baldasano, J.M. (1997). *Characterization of Municipal Solid Waste Incineration Residues from Facilities with Different Air Pollution Control Systems*. Journal of the Air de Waste Management Association, 47, pp: 1170-1179.

Alkemade, M.C. y Eymael M.T. (1994). *How to prevent Expansion of MSWI Bottom Ash in Road Constructions*. In Environmental Aspects of Constructions With Waste Materials. Editors: Goumans J., Van der Sloot H.A. y Aalberst Th. G. Elsevier Science B.V., pp: 863-876.

Amaral, L. (1999): *Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental*. Tesis doctoral. Universidad Politècnica de Cataluña., Escuela Superior de Caminos, Canales y Puertos. Dep. de Ingeniería de la Construcción.

ASTM C 1260. (1994). *Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (Mortar-Bar Method)*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA. Annual Book of ASTM Standard.

ASTM C 88–83 .Test for Soundness of aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.

- Baldasano, J. M., Calleja, A. y Mulet, A. (1989). *Environmental risk assessment via Microtox of leachate from MSW incineration residues*. Second International Landfill Symposium, SARDINIA' 89.
- Barna, R., Moszkowicz, P., Veron, J. y Tirnoveanu, M. (1994). *Solubility model for the pore solution of leached concrete containing solidified waste*. Journal of Hazardous Materials, 37, pp: 33-39.
- Baron, J. y Ollivier, J. (1992). *La Durabilité des Bétons*. Presse de l'école nationale des Ponts et chaussées, Paris, 1ª edición.
- Bouchard, M. (1978). *Utilization des Machefers d'incineration d'ordures ménagères en technique routière*. International conference on the use of by – products and waste in civil engineering. París, pp: 419-424.
- Brunner, P.H. (1988). *Approche Globale des Problems d'Environnement lies á l'Incineration d'Ordures ménagères*. Pollution Atmospherique, Juillet-September, pp: 301-308.
- Calleja, J. (1996). *Teorías acerca de los procesos expansivos en cemento y hormigón*. Cemento-Hormigón, pp: 762.
- Cánovas, M. F. (1996). *Hormigón*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 4ª edición. CEB-FIP (1995). Código modelo CEB-FIP 1990 para hormigón estructural, E-4. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- Carrascon, S. (1996). Experiencias con pavimentos de hormigón compactado en Catalunya. El hormigón en vías rurales y urbanas. Ed. IECA, pp:187-194. Madrid.
- CEB-FIP MODEL CODE. (1995). Comité Euro-International du Béton - Scope, Present Activities and Future Prospects.
- Collins, R.J. (1978). *Utilization of incinerator residue in the United States*. In International Conference on the Use of by – Products and Waste in Civil Engineering. París. 413-418.
- Conner, J.R. (1993). *Chemistry of Cementitious solidified. Stabilized Waste Forms*. Microstructure of Solidified Waste Forms. Spence R.D. ed: Oak Ridge Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, pp: 41-82.
- Cullinane, M. J., Bricka, R. M. y Francingues N.R. (1987). *An assessment of materials that interfere with stabilization/solidification processes*. Proc 13th Annual Research Symposium, Cincinnati, OH., pp: 64-71.
- Chandler, A. J., Eighmy, T. T., Hartlén, J., Hjelm, O., Kossom, D.S., Sawell, S.E., Van der Sloot, H.A. y Vehlow, J. (1997). *Municipal Solid Waste incinerator Residues*.
- (IAWG). (1992). *The International Ash Working Group Metals Distribution in Solidified/Stabilized Waste Forms after Leaching*. Studies in environmental Science 67. Elsevier Science B. V. Chen, X., Zou, Bishop, I. Hazardous Waste & Hazardous Materials, 9, 2, pp: 163-171.
- Chimenos, J.M., Segarra, M., Fernández, M.A y Espiell, F. (1999). Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator. Journal of Hazardous Materials A: 64, pp: 211-299.

DOGC 1776. (1993). *Ley reguladora de residuos 6/93 del 15.de Julio de 1993*,. Por el que se establece la Orden de aplicación a los residuos sólidos urbanos procedentes de la los procesos termo metalúrgicos, para favorecer la valorización.

DOGC 2181. (1996). *Ordre de 15 de febrer sobre varolització d'scories*. (13.3.1996). Por el que se establece la Orden de aplicación a las escorias procedentes de la incineración de residuos municipales y a las resultantes de precesos termo metalúrgicos, para favorecer la valorización.

EHE. (1990). *Instrucción de hormigón estructural*. EHE. Comisión Permanente del Hormigón, Madrid. Acceso: 24 de Enero de 2000.

EN 1097-6. (1996). *Test for mechanical and physical properties of aggregates*. Determination of particle density and water absorption.

Entidad Metropolitana del Medio Ambiente. (2004). Residuos. <http://www.ema-amb.com>. Acceso: 7 de Julio de 2004.

Environmental Protection Agency -EPA-. (1991). *Methodology for assessing environmental releases of and exposure to municipal solid waste combustor residuals*. Exposure Assessment Group Office of Health and Environmental Assesment. Washington DC 20460. EPA/600/8-91/031.

Flor, M.V., Barra, M., Pardo, P., Vázquez, E y Josa, A. (2003). *Laboratory and field study on leaching and properties of gravel-cement-bount and Soller copacted concrete using MSWI bottom ash as aggregates*. WASCOP, Progress on the Road to Sustainability 4-5 y 6 de Junio, San Sebastian – España. Editors: G. Ortíz de Urbina (INASMET) y H. Goumans (ISCOWA), pp: 155-164.

Greenpace (2005). http://www.greenpace.org/espana_es/extra. Acceso: 14 de Marzo de 2005.

Hendriks, Ch. F. and Raad, J.S. (2002). *Principles and background of the Building Materials Decree in the Netherlands*. RILEM TC SRM: Sustainable application of mineral raw materials in construction. Materials and Structures, Vol.30, January-February 1997, pp: 3-10.

Herrera, E., Titlebaum, M., Cartledge, F. y Eaton, H. (1992). *Evaluation of the Leaching Properties of Solidified Heavy Metal Wastes*. J. Environ. Sci. Health, A (27), 4, pp: 983-998.

Hjelmar, O. (1988). *Leachate from Municipal Incinerator Ash*. ISWA Proceedings,1, pp: 383-390.

IECA. (1984). *II Jornadas Sobre Pavimentos de Hormigón*. Consejería de Política Territorial y Energía (Junta de Andalucía), Dirección General de Carreteras (MOPU), Diputación Provincial de Córdoba.

IECA. (1996). *El hormigón en las vías rurales y urbanas*. Centro de publicaciones - Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento.

IECA. (2003). *Manual de firmes con capas tratadas con cemento*. Centro de publicaciones - Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento.

Institut Cartogràfic de Catalunya. (2005). Plantas de incineración de RSU de Catalunya. <http://www.icc.es>. Acceso: 19 de Abril de 2002.

Incineración de RSU. [http://www. Ambientum.com/revista2003_2005/incineración.htm](http://www.Ambientum.com/revista2003_2005/incineración.htm). Acceso: 28 de Abril de 2005.

ITeC. (1995). *Aprofitament de Residus en la Construcció*. Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña, Generalitat de Catalunya (Departamento de Medio Ambiente, Junta de Residus). 1.

Izquierdo, M. (2005). “*Valorització d’Escòries d’Incineració de Residus Sòlids Urbans en Capes Granulars del Ferm*” Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, y Institut de Ciències de la Terra “Jaume Almera” – CSIC. Barcelona.

Izquierdo, M., López-Soler, A., Vazquez, E., Barra, M. and Querol, X. (2002). *Characterisation of bottom ash from municipal solid waste incineration in Catalonia*. Journal of Chemical Technology and Biotechnology.

Jan, G.P., Born, R. y Veelenturf, A.L. (1997). *MSWI Residues in the Netherlands Putting Policy Into Practice*. Goumans/Senden/Van der Sloot, Editors. Waste Materials in Construction: Putting Theory into Practice.

Jansegers, E. (1997). *The use of MSWI bottom ash in hollow construction materials*. Studies in Environmental Science 71, Waste Materials in constructions, Putting Theory into Practice, pp: 431-436.

Johson, C.A. (1993). *Geochemical properties of municipal solid waste incinerator bottom ash: Implications for its utilisation*. Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG), CH-8600 Dübendorf, Switzerland.

Jefatura del Estado. *Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos*. BOE número 96 de 22 de abril de 1998, por el que se establece en su artículo 3.a al Catálogo Europeo de Residuos (CER), aprobado por las Instituciones Comunitarias mediante la Decisión 94/3/CE, de la Comisión, del 20 de Diciembre de 1993.

Josa, A. (1996). *Precauciones a tomar en el proyecto y puesta en obra de pavimentos de hormigón para vías de baja intensidad de tráfico*. El hormigón en vías rurales y urbanas. Ed. IECA, pp:37-42. Madrid.

Kraemer, C. Morilla, A. I. y del Val, M. A. (1999). *Carreteras II*. Cátedra de caminos y Aeropuertos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid y Valencia.

Lee, C.C. and Huffman, G.L. (1989). *Incineration of Solid Waste*. Environmental Progress, 8,3, pp: 143-151.

Mehta, P. K. (1983). *Mechanism of sulphate attack on Portland cement concrete – another look*. Cement and Concrete Research, 13, pp: 401-416.

Mehta, P.K. y Monteiro, P.J.M. (1994). *Estructura, propiedades y materiales*. Concreto. Editora Pini, Sao Paulo, 1ª edición.

Mielich, K.L., Revéis, K.S. (1995). *Uso de las cenizas de fondo de los residuos sólidos urbanos incinerados*. ASCE, Journal of Energy Engineering, pp: 2.

Ministerio de Medio Ambiente. (1997). *Medio Ambiente en España*, Madrid, pp: 278.

Ministerio de Medio ambiente. (2000) Residuos. <http://mma.es>: Acceso: 2 de Julio de 2002.

- Nadal, A. R., SIRUSA. (1999). *Sistemas de incineración de residuos sólidos urbanos*. Caso de Tarragona. Madrid. Acceso: 9 de Junio de 2000.
- Nectoux, D., Grandhaie, F., Terminaux R. and Bonnet, S. (1995). *Valorisation des Machefers d'Incineration d'ordures Ménageres (MIOM)*. Granulats pour Bétons. In proceedings of the international congress on waste on waste solidification stabilization process. Editors: Cases. J. m and Thomas F., pp: 395-400.
- NEN 7341. (1993). *Determination of leaching characteristics of inorganic components from granular (wastes) materials*. NNI, Delf (Netherlands). Formerly NVN 2508.
- NEN 7345. (1993). *Determination of the release of inorganic constituents from construction materials and stabilized waste products*. NNI, Delf (Netherlands). Formerly Draft NEN 5432.
- NLT 108. (1991). Apisonado de suelos por el método Próctor modificado.- UNE 103-501/94.
- NLT-153. (1992). Densidad relativa y absorción de áridos gruesos.
- NLT-202/91. (1992). *Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo*. Normas del Laboratorio de Transportes y Mecánica del Suelo. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. CEDEX. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento. Madrid.
- Oberholster, R. E. y Davies, G. (1986). *An accelerate method for testing the potential alkali reactivity of siliceous aggregates*. Cement and Concrete Research, 16, pp: 181-189.
- Ortego , J.D., Barroeta, Y., Catledge, F.K y Akhter, H. (1991). *Leaching Effects on Silicate Polimerization. An FTIR and Si NMR Study of Lead and Zinc in Portland Cement*. Environ, Sci. Technol., 15, 6, pp: 1171-1174.
- Pardo, P. (2003). *Harmonització i validació de metodologia analítica per a la determinació del fraccionament de fòsfor en sediments*. Tesis doctoral, Universitat de Barcelona.
- PG-3. (2002). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la construcción de carreteras y puentes*. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo
- Phil, K.A. (1997). *The application of incinerator botton ash in road construction*. Studies in Environmental Science 71, Waste Materials in constructions, Putting Theory into Practice, pp: 541-550.
- Programa de gestión de residuos municipales de Cataluña 2001-2006 (PROGREMIC). <http://www.arc-cat.net/agencia/programes/pgrm.html>. Acceso: 16 de Agosto de 2005.
- Quenee, B. (2000). *The use of MSWI bottom ash as aggregates in hydraulic concrete, waste Materials in Construction*, vol. 1 pp.422-437. Pergamon. Elseiver Science.
- Quenee, B., Li, G., Siwak J. M. y Basuyau, V. (2000). *The use of MSWI (Municipal Solid Waste Incineration) bottom ash as aggregates in hydraulic concrete*. Waste Materials in Construction. Ed. G.R. Woolley, J.J.J.M. Goumans and P.J. Wainwright.
- Seguí, P., y Far, S. M. (2000). *Estudi i optimització de l'aprofitament dels residus d'incineradora per al seu ús en carreteres*. UIB, empresa TIRME S.A. Conselleria de d'educació i Cultura. (Área de Foment) BOCAIB no. 140 del 31/11/98.

- Selinger, A., Schmidt, V., Bergfeldt, B., Vehlow J. and Simon, G. (1997) *Investigation of Sintering Processes in Bottom Ash to Promote the Reuse in Civil Construction (Part 1) – Element Balance and Leaching*. Waste Materials in Construction: Putting Theory Into Practice.
- Shively, W., Bishop, P., Gress, D. and Brown, T. (1986). *Leaching Test of Heavy Metals Stabilized with Portland Cement*. Journal WPCF, 58, 3, pp: 234-240.
- Stämpfli, D. (1992). Final Report – Cements and Bottom Ash Chemistry, ERG Report.
- Stegmann, J.A., Schneider, J., Baetz, and B. W. y Murphy, K. L. (1995). *Lysimeter Washing of MSW Incinerator Bottom Ash*. Waste Management & Research, 13, pp: 149-165.
- UNE 146120. (1997). *Áridos para hormigones*. Especificaciones, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.
- UNE 146508 EX. (1997). *Áridos para hormigones. Ensayo de áridos. Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice y álcali-silicato de los áridos. Método acelerado en probetas de mortero*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.
- UNE 7238. (1971). *Determinación de coeficiente de forma del árido grueso empleado en la fabricación de hormigones*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.
- UNE 83301. (1991). *Ensayos de hormigón. Fabricación y conservación de probetas*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.
- UNE 83302. Asociación española de normalización y certificación, AENOR (1984c). *Ensayos de hormigón. Extracción y conservación de probetas de testigo*, pp: 3.
- UNE 83303. (1984). *Ensayos de hormigón. Refrentado de probetas con mortero de azufre*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.
- UNE 83304. Asociación española de normalización y certificación, AENOR (1984e). *Ensayos de hormigón. Rotura por compresión*, 1984, pp: 4.
- UNE 83306. Asociación española de normalización y certificación, AENOR (1985f). *Ensayos de hormigón. Rotura por tracción indirecta (ensayo brasileño)*, 1985, pp: 3.
- UNE 83316. (1996). *Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.
- UNE 83316. (1996). *Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.
- UNE EN 196-1. (1987). *Metodos de ensayos de cemento. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.
- UNE- EN 932-2. (1999). *Ensayos para determinar las propiedades generales e los áridos*. Métodos para determinar la reducción de muestras de laboratorio.
- UNE- EN 933-5. (1999). *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos*. Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso.

UNE-EN 1097-72. (1990). *Áridos para hormigones. Determinación del coeficiente “Los Angeles”*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.

UNE-EN 1367-2. (1996). *Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos. Parte 2: Ensayo de sulfato de Magnesio*.

UNE-EN 1744 (1998). *Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico*.

UNE-EN 933-1. (1998). *Test for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution – Sieving method*.

UNE-EN 933-3. (1996). *Test for geometrical properties of aggregates. Part 3: Determination of particle shape – Flakiness index*.

Valls del Barrio, S. (1999). *Estabilización física y química de los lodos de depuradora de aguas residuales y del material de demolición para su utilización en ingeniería civil*. Tesis Doctoral. ETSECCPB-UPC.

Van der Sloot, H. A. (1991). *Systematic Leaching Behaviour of Trace Elements from Construction Materials and Waste Materials*. Waste Materials in Construction. Proceedings of International Conference on Environmental Implications of Construction with Waste Materials; Elsevier, Amsterdam.

Vázquez, E., Barra, M., Izquierdo, M. (Informe V). (2001). *Valorització i gestió integrada de escòries i altres residus inorgànics de processos tèrmics per a la seva aplicació en la construcció*. Compendio de los informes de los equipos de investigación n°1 (URC-UPC), n°2 (TEET-UPC) y n°3 (IJA-CSIC).Barcelona (España).

Vehlow, J., G. Pfrang-Stotz, T. y Schneider, J. (1992). *Rest stoffe-Charakterisierung, Behandlung, Verwertung*, KFK report 5000.

Wainwright, P.J., Quenee, B., Li, G., Siwak, J.M. y Basuyau, V. (2000). *The use of MSWI (Municipal Solid Waste Incineration) bottom ash as aggregates in hydraulic concrete*. Waste Materials in Construction. Ed. G.R. Woolley, J.M. and Goumans.

Wiles, C.C. (1994). *Municipal solid combustion ash: State of the Knowledge*. Presented before the division of environmental chemistry. American Chemical society, Washington, D.C. August 21-26, 1994.

Wiles, C.C. (1996). *Municipal solid combustion ash: State of the Knowledge*. Journal of Hazardous Materials 47, pp: 43-75.

Zevenbergen, C. y Comans, R.N. (1994). *Geochemical factors controlling the mobilization of major elements during weathering of MSWI bottom ash*. Goumans J.J.J.M., Van Der Sloot H.A., Alberts Th G., eds WASCOM 1994 Environmental Aspects of Construction with Waste Materials. Proceedings of the International Conference on the Environmental Implications of Construction and Technology Developments. The Netherlands 1-3 June 1994, Elsevier. Studies in Environmental Science 60.

ANEXO 1

A.1.- PLANTA DE INCINERACIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.

En el presente anexo se hace referencia a ciertos aspectos del estado del conocimiento, tales como los detalles de una planta de incineración y tratamiento de residuos sólidos urbanos.

A.1.1.- Planta de incineración de residuos sólidos urbanos.

En este anexo se presenta con detalle la planta de incineración de residuos sólidos urbanos de Tarragona, misma que hemos escogido como un buen referente de las plantas incineradoras de RSU que existen en Cataluña.

RESIDUA'99

Madrid, 24/25 Noviembre 1.999

“Ocho años de experiencias en la gestión de una planta incineradora de RSU. El caso de Tarragona”

por Ramon Nadal Albiol
Gerente, SIRUSA

Contenido

1. Introducción
2. Experiencia técnica
3. Experiencia medioambiental
4. Experiencia económica
5. Experiencias de controversia pública
6. Experiencia en política de comunicación
7. Experiencias con grupos ecologistas
8. Experiencias de investigación científica
9. Balance global

BIBLIOGRAFIA

1. Introducción

La Planta Incineradora de Residuos Sólidos Urbanos de Tarragona fue un proyecto pensado inicialmente para resolver la problemática de la ciudad de Tarragona (115.000 habitantes), al cual se unieron rápidamente otros municipios vecinos, deseosos de resolver, por un largo tiempo, la gestión de sus residuos.

Con este objetivo, en el año 1.987 se creó una mancomunidad de 6 municipios (Tarragona, Reus, Valls, Vilaseca-Salou, Cambrils y Constantí), que posteriormente quedó en 7, al independizarse de Vilaseca el municipio de Salou. Esta mancomunidad promovió el proyecto, contrató una empresa de ingeniería para el diseño básico y la supervisión técnica, y fue adjudicando uno a uno los paquetes de obra. Como resultado se tuvo una Planta para dar tratamiento a 145.000 t/a de residuos urbanos, a un precio realmente muy favorable (inversión total 3.422 millones de pesetas, incluyendo una moderna depuración de gases).

La Planta está situada a pocos km. de la ciudad de Tarragona, en un polígono industrial muy bien comunicado; su capacidad actual de incineración es de 430 t/d de residuos urbanos, disponiendo de dos hornos de 9,6 t/h. (calculados para un PCI real de 1.800 kcal/kg). Estos hornos son de tecnología alemana (Deutsche Babcock Anlagen, Oberhausen), de parrilla rotatoria, y la depuración de gases se realiza mediante un sistema semi-seco, formado por un reactor GSA con recirculación de lechada de cal, adición de carbón activo y filtro de mangas, todo el equipamiento de tecnología danesa (FLS Miljo, Copenhagen). Por otra parte, la Planta es productora de electricidad, con una potencia generadora de 7.400 kW, aprovechando la energía térmica contenida en los residuos. Aproximadamente un 20% de la producción se utiliza como autoconsumo, exportándose a la red eléctrica el 80% restante.

La empresa explotadora, SIRUSA, pertenece mayoritariamente a la misma mancomunidad de municipios, titular de un 60% de las acciones, mientras que el 40% restante corresponde al Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético (IDAE), organismo estatal del Ministerio de Industria y Energía.

El hecho de que tanto el propietario, la mancomunidad de municipios, como los usuarios más importantes y la empresa explotadora compartan órganos de dirección, es a la vez una ventaja y un inconveniente:

La ventaja estriba en que los municipios usuarios, que son a la vez propietarios y gestores, tienen un único objetivo, el de obtener un buen servicio al mínimo coste posible, con lo no caben las discrepancias que se originan en ocasiones si el operador de la Planta es una empresa privada, diferente del ente público propietario.

El inconveniente radica en que, en ocasiones, los criterios de una gestión eficaz y un control basado en las leyes de la economía general, quedan supeditados a decisiones de oportunismo electoral (por ejemplo, fijación de precios del servicio por debajo del coste)

En el Anexo se incluye un esquema de la Planta y se listan las características técnicas más importantes.

2. **Experiencia técnica**

Esta instalación inició su marcha a principios de 1.991. Dispone, pues de más de 8 años de experiencias, tanto por lo que se refiere al funcionamiento técnico como a otros aspectos también importantes, como el coste de explotación, el impacto medioambiental, e incluso su relación con el entorno social que la rodea.

Inicialmente se daba servicio únicamente a los 7 municipios componentes de la mancomunidad, así como a unos pocos, geográficamente cercanos, que decidieron aprovechar la ventaja que representaba la ubicación de la Planta como instalación de gestión moderna de residuos.

Con el paso del tiempo se fueron integrando muchos otros municipios, hasta el punto de que actualmente se gestionan, vía incineración o vía vertedero, la totalidad de los residuos sólidos urbanos de 4 comarcas de la provincia de Tarragona, integrando más de 80 municipios con una población superior a los 350.000 habitantes.

Tras una etapa inicial de ajuste el año 1.991, en 1.992 la Planta entró en una fase de funcionamiento regular, habiéndose obtenido los siguientes resultados técnicos:

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA ACTIVIDAD (1.992-1.998)

<u>Año</u>	<u>Residuos gestionados (toneladas)</u>	<u>Residuos incinerados (toneladas)</u>	<u>Residuos a vertedero (toneladas)</u>	<u>Producción eléctrica (MWh)</u>	<u>Energía vendida a la red (MWh)</u>
1.992	136.825	134.951	1.874	41.000	35.294
1.993	150.223	147.453	2.770	47.018	40.769
1.994	153.887	147.410	6.577	50.917	44.444
1.995	161.794	153.938	7.856	52.440	45.693
1.996	168.980	156.345	12.635	51.898	45.269
1.997	175.122	147.392	27.730	51.986	43.751
1.998	174.344	144.712	29.632	51.261	40.676

Como se observa, ha habido un incremento continuo de los residuos gestionados, aumentando año a año la cantidad de residuos excedentes, que, por falta de capacidad de incineración, han tenido que ser enviados a vertedero. El motivo de este aumento radica, en parte, por la política de cierre de vertederos incontrolados, llevada a cabo por la Generalitat de Cataluña en los últimos años, lo que ha llevado a una situación en la que la Planta de SIRUSA ha quedado como la única opción posible (o económicamente válida), para una gran multitud de municipios, la que ha convertido a SIRUSA en un auténtico gestor de residuos, más allá de la simple explotación de la Planta Incineradora.

Otro aspecto a comentar de la tabla anterior es la disminución en la cantidad de energía exportada a la red eléctrica, lo que ha sido causado por la instalación, el año 1.997, de un sistema más perfeccionado de depuración de gases, con el consiguiente incremento en el consumo energético. Por otra parte, hay que enfatizar el incremento pertinaz y realmente notable, experimentado estos últimos años, en cuanto a generación de residuos, y ello a pesar de las intensas campañas de recogida selectiva, fuertemente impulsadas por los municipios más poblados. Cabe apuntar el significativo desarrollo económico de estos años como la causa fundamental del crecimiento en la cantidad de residuos generados por habitante y año. Si se compara la generación de residuos de los municipios mancomunados, se observa que de 1.992 a 1.998 la misma creció un 9,1%, y para el año actual ya se están observando incrementos del 4-5%, con relación a las cifras de 1.998.

3. Experiencia medioambiental

La autorización concedida por la Generalitat de Cataluña para el funcionamiento de la Planta, tras el correspondiente estudio de impacto ambiental positivo, impuso un severo Programa de Vigilancia Ambiental que incluía tanto autocontroles por parte del explotador, como periódicos análisis y controles exteriores. Estos controles han sido, y sigan siendo, realizados directamente por las propias administraciones públicas, como la Generalitat de Cataluña y el Ayuntamiento de Tarragona, o bien por empresas y laboratorios oficiales, homologados para la realización de análisis de emisiones, residuos y aguas. Como resultado de este Programa de Vigilancia Ambiental, tras ocho años de funcionamiento de la Planta, la cantidad de información de que se dispone es, lógicamente, muy abundante. La tabla siguiente presenta los que se han obtenido en las determinaciones de los últimos meses:

EMISIONES NORMALES DE LA PLANTA (AÑO 1.999)

<u>Parámetro</u>	<u>Valor normal en emisión (mg/Nm³)</u>	<u>Límite máximo RD 1088/92</u>
Partículas	2 - 5	30
Acido fluorhídrico	1 - 2	2
Dióxido de azufre	20 - 30	300
Pb+Cr+Cu+Mn	0,01 - 0,06	5
Ni+As	0,007 - 0,01	1
Cd+Hg	0,001 - 0,01	0,2
CO	10 - 20	100
Acido clorhídrico	20 - 30	50
Dioxinas	0,002 - 0,004	0,1 (recomendado)
Oxido de nitrógeno	100 - 110 (ppm)	300 Decret Generalitat

Como se observa, los valores de las emisiones se mantienen dentro de un intervalo homogéneo, y generalmente muy por debajo de los límites máximos legales, que son aplicables (RD 1088/1992, RD 1217/1997 y Decret 323/1994 de la Generalitat de Cataluña)

Más importante que el aspecto concreto de las emisiones es la constatación de que, tras varios años de funcionamiento, no se ha producido ningún impacto negativo sobre el entorno, lo que ha podido demostrarse mediante diversos estudios científicos:

- Impacto de las emisiones de ácido clorhídrico.

Por una parte, se encargó un estudio de los valores de inmisión existentes alrededor de la Planta, trabajo realizado por la Universidad Rovira y Virgili de Tarragona, y por otra, la Universidad Politécnica de Cataluña, así como otras empresas especializadas en temática medioambiental, efectuaron estudios y cálculos teóricos, aplicando modelos conocidos de dispersión, y operando con los datos meteorológicos aplicables y los valores de las emisiones reales. En todos los casos, los valores obtenidos fueron muy inferiores a los que se pudieran considerar como peligrosos, preocupantes o anormales.

- Impacto de las emisiones de metales pesados

Este estudio fue realizado por el Departamento de Toxicología y Salud Medioambiental de la Facultad de Medicina de la Universidad Rovira y Virgili (Reus). El detalle de la metodología y las conclusiones de la investigación dieron origen a un artículo publicado en la prestigiosa revista *Toxicological and Environmental Chemistry* (1), así como a una tesis doctoral (2). Por lo que respecta a estos contaminantes, tampoco se apreciaron valores que pudieran sugerir un impacto negativo de la Planta sobre el entorno ambiental.

- Impacto de las emisiones de dioxinas y furanos.

Otro relevante trabajo científico, realizado por el citado Departamento de Toxicología y Salud Medioambiental de la Universidad Rovira y Virgili, se centró en el posible impacto de las dioxinas y furanos sobre la vegetación y los suelos de la vecindad de la Planta. Los resultados de los análisis y estudios, que siguen efectuándose de manera periódica, han dado origen a la publicación de resúmenes en diversas revistas de prestigio científico, como *Toxicological and Environmental Chemistry*, *The Science of the Total Environment*, *Chemospher* y *Organohalogen Compounds* (3, 4, 5, 6, 7). De la lectura de estos trabajos se concluye una ausencia total de impacto en el entorno, a causa de la actividad de la Planta, respecto de la emisión de este tipo de contaminantes.

4. Experiencia económica

El bajo coste de inversión que representó la Planta (3.422 millones de ptas., incluyendo 955 correspondientes a la construcción del sistema de depuración de gases), la cantidad recibida por subvenciones a fondo perdido (un total de 1.824 millones), la muy reducida estructura de personal de la empresa explotadora (28 empleados en la actualidad), y los ingresos derivados de la generación energética, han originado unos costes totales, entre financieros y de explotación, muy moderados. Esto se ha traducido en una tasa a pagar por los usuarios, no excesivamente elevada,

actualmente cifrada en 4.500 pts/t. Hay que significar, además, que la financiación de la Planta se programó a sólo 10 años, por lo que a partir del año 2001 va a desaparecer una importante carga financiera.

La tabla siguiente presenta la evolución histórica del precio de incineración, año a año.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL PRECIO DE INCINERACION (ptas/t)

1.992	1.993	1.994	1.995	1.996	1.997	1.998	1.999
2,800	3.000	3.100	3.100	3.200	3.200	4.400	4.500

Debe de significarse que el incremento producido el año 1.998, respecto a 1.997, fue debido al cambio de tendencia de los resultados de la empresa en 1.997, por la entrada en funcionamiento del nuevo sistema de depuración de gases, con el consiguiente incremento de costes de operación.

A lo largo de estos años los fondos de la empresa explotadora se han incrementado en 231 millones de pesetas, por lo que los resultados económicos pueden calificarse de satisfactorios.

5. Experiencias de controversia pública

La Planta, desde el inicio del proyecto allá por el año 1.987 hasta la actualidad, sólo ha tenido que hacer frente a dos períodos de polémica a nivel de opinión pública: uno de ellos, durante la fase de construcción de la Planta (1.990) tuvo su origen en el rechazo de dos colectivos ecologistas (Aedenat-Foe y Greenpeace), del cual la prensa local se hizo amplio eco. Una fulminante y muy eficaz campaña informativa, de la cual se han publicado los detalles técnicos (7), cambió en el tiempo récord de un mes el estado de la opinión pública, que pasó a apoyar la construcción de la Planta.

Otra campaña de descrédito a la cual tuvo que hacerse frente, empezó a finales del año 1994, y tuvo su origen en un problema interno de índole laboral. Esta campaña, basada en la tergiversación y en la manipulación de informaciones, representó un fuerte impacto sobre la opinión pública, ya que se presentaron a la misma diversas informaciones sobre una aparente gestión incorrecta de residuos, además de sugerir un supuesta contaminación del entorno. La controversia fue más virulenta que la vez anterior, debido a la caja de resonancia que representaba la coincidencia en el tiempo con un período electoral. Una vez pasadas la elecciones, y demostrada fehacientemente la falsedad de las informaciones publicadas, la polémica desapareció rápidamente.

En general puede decirse que la Planta, desde un punto de vista social, está plenamente integrada con su entorno, y más específicamente, con los municipios a los que presta el servicio.

A finales de 1.998, una encuesta realizada entre los ciudadanos de Tarragona relativa a la problemática medioambiental, puso de relieve el relativamente alto nivel de conocimiento que tenían los ciudadanos respecto a la Planta, así como el estado de opinión respecto a la incineración como sistema de tratamiento de residuos y de recuperación energética, e incluso sobre la gestión y funcionamiento de la propia Planta de Tarragona. La tabla siguiente resume los resultados del estado de opinión, ciertamente positivos:

ENCUESTA SOBRE CALIDAD AMBIENTAL EN TARRAGONA

<u>Base de la pregunta</u>	<u>Resultado obtenido</u>
Nombre de la empresa encargada de la gestión de la Planta (SIRUSA)	39% responden correctamente 46% responden otros nombre
Grado de acuerdo sobre la eliminación de residuos por incineración	75% están de acuerdo o muy de acuerdo 15% en desacuerdo o muy en desacuerdo
Grado de acuerdo sobre la recuperación energética mediante incineración	83% están de acuerdo o muy de acuerdo 7% en desacuerdo o muy en desacuerdo
Grado de acuerdo sobre la gestión y el funcionamiento de la Planta Incineradora	41% están de acuerdo o muy de acuerdo 11% en desacuerdo o muy en desacuerdo

Fuente: Informe CERES (Octubre 1.998)

Como dato anecdótico cabe citar que, en relación a la última cuestión (la gestión y el funcionamiento de la Planta Incineradora), el informe de CERES indica que los barrios en los que destacan más las opiniones “de acuerdo/muy de acuerdo”, son de Torreforta, Bonavista, La Canonja y San Salvador, los cuales están próximos a la Planta Incineradora.

Esta opinión favorable de un 75% de ciudadanos a favor de la incineración de residuos (en la ciudad de Tarragona, que es donde se realizó la encuesta), no deja de ser destacable, especialmente tratándose de una comunidad autónoma (Cataluña) en donde, por iniciativa popular, se encuentra en trámite de discusión parlamentaria, una proposición a favor del cierre de las plantas de incineración.

6. Experiencias en política de comunicación

Desde que la Planta empezó a funcionar el año 1.991, la política seguida ha sido la de una total transparencia informativa respecto a facilitar, de manera libre y generalizada, los resultados de los numerosos controles que se realizan en la Planta. Esta información no sólo se comunica a las diferentes administraciones, competentes o no, sino también a otros colectivos representativos de la sociedad como asociaciones de vecinos, colegios y centros de enseñanza, e incluso a la prensa cuando así lo solicita, sin excluir a los grupos ecologistas de la zona, interesados en el funcionamiento de la Planta.

En segundo lugar, se sigue una política de puertas abiertas, autorizando todo tipo de visitas (grupos de estudiantes, profesionales y todo tipo de colectivos interesados en el tema). Aunque en cierta forma ello representa una distorsión para el desarrollo de la actividad normal de la Planta (anualmente se recibe la visita de cerca de millar y medio de escolares), la empresa siempre ha entendido que la transparencia en la información, aparte de la contribución a la educación medioambiental, es una obligación inherente al hecho de tratarse de una empresa pública que está al servicio de los municipios.

Finalmente, otro de los aspectos complementarios de la transparencia informativa, y como parte de la actividad formativa en educación medioambiental, es que SIRUSA, ha colaborado en la elaboración de publicaciones y comunicaciones sobre temas de naturaleza y medio ambiente, entendiendo que la resolución de la problemática de los residuos, trátase de urbanos o del tipo que sea, es un aspecto más de una actuación positiva y global respecto al entorno.

7. Experiencias con grupos ecologistas

La política de transparencia informativa ha facilitado, asimismo, el contacto con los grupos ecologistas de la zona, especialmente con aquellos que se han distinguido por una actitud más racional, los cuales han pasado de una postura de oposición, tanto al sistema de incineración en general como a la Planta en particular, a otra de mantener el rechazo al sistema, pero demostrando una cierta aceptación de la Planta, siempre y cuando ésta sea capaz de funcionar con las mejores garantías posibles. La filosofía de actuación sería "Ya que está aquí, al menos que funcione lo mejor posible".

Por otra parte, como consecuencia de esta filosofía de mutuo entendimiento y respeto, se ha llegado a colaborar directamente con los programas de educación ambiental de estos colectivos ecologistas, de manera que se promueven y facilitan visitas de escolares a la Planta, y los monitores

de estos colectivos, debidamente documentados, se encargan de acompañar a los escolares y dar las explicaciones pertinentes sobre el funcionamiento de la instalación.

8. Experiencias de investigación científica

Independientemente de la actividad diaria de prestar el servicio de tratamiento de los RSU, y con objeto de mejorar en lo posible, se han establecido convenios con varias Universidades y centros de investigación, para el desarrollo de trabajos científicos sobre la actividad de la Planta, tanto con un objetivo puramente científico, como con vistas al desarrollo de mejoras técnicas. Entre estos trabajos podemos citar los siguientes:

- El Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Rovira y Virgili (Tarragona) ha realizado un Análisis del Ciclo de Vida aplicado a la electricidad generada por la Planta, en comparación con la electricidad producida en una planta térmica convencional, y ello tanto antes como después de instalar un nuevo sistema de depuración de gases. Los resultados se presentaron en un Congreso Internacional sobre Análisis del Ciclo de Vida (9).
- La Cátedra de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Barcelona lleva años realizando estudios científicos sobre posible recuperación de materiales, valorización y aprovechamiento de escorias, y tratamiento de cenizas. De algunos de estos estudios se han realizado publicaciones en revistas científicas internacionales (10, 11).
- Con el Consejo Superior de Investigaciones Científicas se está desarrollando un estudio científico, relativo al balance de dioxinas y furanos en la Planta, comparando “inputs” i “outputs”. Los resultados de que se dispone hasta el momento confirman que, al igual que se demostró en países como Suecia y Alemania, las modernas plantas incineradoras de residuos urbanos son destructoras netas de estos contaminantes, ya que el “output” total es muy inferior al “input” total.

9. Balance global

Después de más de 8 años de funcionamiento, el balance global de la actividad de esta Planta se puede calificar, sin falsa modestia, de francamente positivo: Incinera unas 145.000 t/año de residuos municipales y gestiona, vía vertedero, unas 35.000 t/a. adicionales, prestando servicio a más de ochenta municipios englobados en cuatro comarcas vecinas, lo que representa más de 350.000 habitantes. Además, está socialmente aceptada por la comunidad que la rodea, y, habiendo

demostrado científicamente que no ha producido impacto negativo en el medio ambiente, afronta a corto plazo una etapa de ampliación de su actividad, con los siguientes temas de futuro:

- Instalación de una planta de transferencia y prensado de residuos sólidos, para gestionar los excedentes que se producen cada año y que, hoy por hoy, deben enviarse a vertedero.
- Instalación de una planta de purificación y clasificación de las escorias, al objeto de poder valorizar estos subproductos, de acuerdo con la legislación administrativa que, no sólo lo permite, sino que lo favorece en cuanto se trata de minimizar la producción de los propios residuos.
- Posibilidad de ampliación de la planta con una tercera línea, dadas los valores absolutos de generación de residuos en las comarcas cercanas, y las numerosas solicitudes y expectativas reales de que este tratamiento se realice en las instalaciones de SIRUSA.

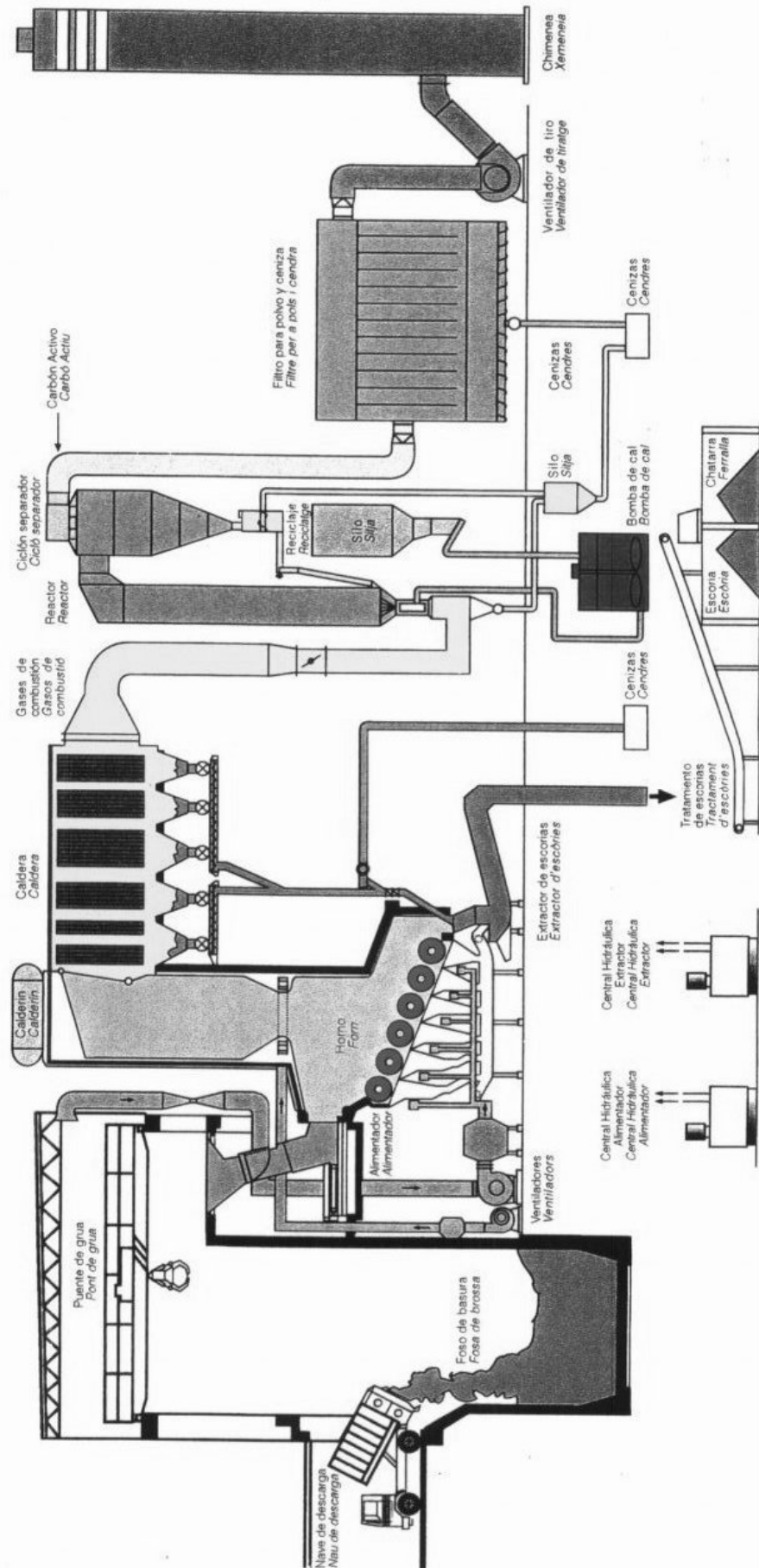
Esta valoración positiva, y hecha desde la mayor ecuanimidad posible, debería ser una satisfacción para los representantes políticos que, en su momento, optaron por este sistema para dar tratamiento a los residuos urbanos generados en sus respectivas ciudades y pueblos.

BIBLIOGRAFIA

1. Schumacher & al. "Levels of metals in soils and vegetation in the vicinity of a municipal solid waste incinerator (Toxicological & Environmental Chemistry Vol. 56 pag.. 119-132, 1.996).
2. Granero, Salvador: "Presencia y distribución medioambiental de metales pesados en las proximidades de una planta incineradora de residuos sólidos urbanos. Exposición y riesgo para la población" (Tesis Doctoral U. Rovira y Virgili, 1.997).
3. Schumacher & al. "Levels of PCDDs and PCDFs in grasses and weed collected near a municipal solid waste incinerator" (The Science of the Total Environment Vol. 201 pag. 53-62, 1.997).
4. Schumacher & al. "Temporal variation of PCDD/F concentrations in vegetation samples collected in the vicinity of a municipal solid waste incinerator" (The Science of the Total Environment Vol 218 pag. 175-183, 1.998).
5. Domingo & al. "Vegetation as a biomonitor of PCDD/PCDFs in the vicinity of a municipal solid waste incinerator" (Organohalogen compounds Vol. 36 pag. 157-160, 1.998).
6. Schumacher & al. "Soil monitoring in the vicinity of a municipal solid waste incinerator: Temporal variation of PCDD/Fs" (Chemosphere Vol. 39 N. 3, pag. 419-429, 1.999).

7. Domingo & al. "Profiles of PCDD/Fs in Soil and Vegetation Samples Collected near to a Municipal Waste Incinerator" DIOXIN'99 Organohalogen Compounds Vol. 41 pag. 149-152 (1.999).
8. Martín, A: El por qué de la campaña publicitaria de la incineradora de residuos sólidos urbanos de Tarragona (Seminario Europeo sobre Tecnologías Eficientes de Energía para la incineración de residuos sólidos urbanos, Tarragona, 1992).
9. Sonnemann & al. "LCA of the electricity produced by the municipal waste incinerator of Tarragona" (6th LCA Case Studies Symposium SETAC-Europe, Brussels, December 2, 1.998).
10. Chimenos & al. "Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator" (J. of Hazardous Materials Vol. A-64 pag. 211-222, 1.999).
11. Chimenos & al. "Natural weathering of MSWI bottom ash during short-term stage" (J. of Hazardous Materials, pendiente de publicación)

ESQUEMA FUNCIONAMIENTO DE PLANTA ESQUEMA FUNCIONAMENT DE PLANTA



PLANTA INCINERADORA DE RSU DE TARRAGONA (ESPAÑA)

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

1. Báscula

Fabricante:	Crypesa
Capacidad:	80 Tn

2. Foso

Longitud:	34 m
Altura:	11,5 m
Anchura:	9 m
Capacidad:	3.500 m ³

3. Puentes Grúa

Fabricante:	Mannesmam Demag
Cantidad:	2
Carga max.	4,5 Tn
Volumen de carga:	2,5 m ³

4. Horno

Fabricante:	DBA
Nº de hornos:	2
Capacidad:	9,6 Tn / h (PCI 1800 Kcal / Kgr)
Nº de rodillos:	6
Tª de combustión:	1000 °C (850 °C - 1050 °C)

5 Caldera.

Fabricante:	Vulcano
Licencia:	Eckrohrkessel
Nº calderas:	2
Presión:	40 Bar
Tª Vapor:	360 °C
Caudal de vapor:	23,5 Tn / h

6 Depuración de gases.

Fabricante:	FLS Miljo
Nº reactores:	2 Semi secos
Caudal gases:	50000 Nm ³ /h
Velocidad gases:	18 m/s
Tª entrada gases:	265 °C
Tª salida gases:	144 °C
Inyección carbón activo:	Si (en la entrada al filtro de mangas)
Filtro de mangas :	Si

7 Turbina.

Fabricante:	Gec-Alsthom
Potencia:	7,4 MW
Etapas:	2
Velocidad de giro 1ª etapa:	21000 rpm
Velocidad de giro 2ª etapa:	10500 rpm
Caudal de vapor:	47 Tn / h
Tª Vapor de admisión:	360 °C
Presión de admisión:	36 Bar
Tª Vapor de salida:	70 °C
Presión de salida:	-0,75 Bar

8 Alternador.

Fabricante:	Ansaldo
Potencia:	9260 KVA
Tensión:	6000 V
Frecuencia:	50 Hz
Cos fi:	0,8

A.1.2.- Planta de tratamiento y valorización de EIRSU.

Este anexo corresponde a la planta de tratamiento de EIRSU. En esta instalación se separan las escorias en tres fracciones, el retenido superior a 40mm, la fracción entre 20 y 40 mm y la inferior a 20mm. Para las dos primeras se separa la parte férrica magnéticamente y la parte más gruesa mediante corrientes de aire, de esta forma se llega a generar lo que hemos nominado como EIRSU.

El presente anexo tiene como finalidad mostrar una planta de tratamiento de EIRSU, que en este caso hemos escogido la planta de tratamiento de EIRSU con la tecnología exclusiva de Pedreres Rusc, la cual dio origen a las EIRSU de Mataro utilizadas en esta tesis.

Planta de Tratamiento y valorización de escorias

La comarca del Maresme produce, anualmente, cerca de 180.000 toneladas de escombros que van a parar al Centro Integral de Valorización de Residuos Sólidos del Maresme, propiedad del Consorcio para el Tratamiento de los Residuos Sólidos urbanos del Maresme, que acoge todos los municipios de la comarca. Después del tratamiento al que son sometidos los residuos sólidos urbanos, se obtienen con otros productos reciclados 40.000 toneladas de escorias.

Estos residuos son tratados en la Planta de Tratamiento y Valorización de escorias con la tecnología exclusiva de Rusc, hasta obtener un árido artificial, Escograva (EIRSU), apto para ser usado como sub-base en la construcción de calles y carreteras.

Planta de tratamiento y Valorización de escorias



El proceso al que son sometidos los residuos de la Planta de Tratamiento y Valorización de escorias con la tecnología exclusiva de Rusc, hasta obtener un árido artificial, se indican de forma esquemática en el siguiente gráfico.

Gráfico: Proceso de producción de escograva.

Fuente: (pág. web) <http://www.escograva.com>



En Rusc Pedreres Maresme vienen trabajando desde 1995 en el reciclaje de Áridos. Entre ellos destaca la Escograva.

ESCOGRAVA

Escograva es un producto valorizado, fruto de una actividad ecológica. Escograva es un producto obtenido a partir de las escorias de la planta incineradora de Mataró, el uso de Escograva reduce la extracción de áridos, aligerando el gasto energético y atenuado, en el paisaje, el impacto negativo de las extracciones.

En la producción de Escograva, se recupera y facilita la recuperación de los metales contenidos en los residuos sólidos urbanos.

La comercialización de Escograva reduce los costos del tratamiento térmico de los desechos.

Características geotécnicas de la escograva

Equivalente de Arena.....	41.00
Densidad seca sin compactar.....	1.15
Densidad seca compactada.....	1.70
Los Ángeles.....	35 a 50
Plasticidad.....	No plásticas
Índice CBR	
%PM 95.....	110
%PM 98.....	138
%PM 100.....	153
Hinchamiento.....	No existe
Materia orgánica.....	< 3%
Análisis granulométrico.....	máx. < 40
Tamizado a 2 mm.....	30-60%
Tamizado a 80 mm.....	5-15%

Aplicaciones técnicas de escograva

- *Ingenierías (Aplicación en nuevos proyectos)
- *Ayuntamientos (Obras, Servicios y Mantenimientos)
- *Excavaciones y Rebajos (Rellenos, Sub-bases, Terraplenes, etc)
- *Obras Públicas (Carreteras, Parques, Parquings, Calles, etc.)



Utilización de Escograva

- La escograva puede ser similar a los materiales de cantera utilizados para rellenos y sub-bases
- Es un "todo-uno" entre 0 y 40 mm con características geotécnicas que normalmente superan las de los áridos naturales y los del "sauló".
- Es un árido económicamente barato y ecológicamente recomendable y de capacidad portante elevada.
- Es fácil de manipular y de colocar. No presenta ningún problema para su aplicación. Se recomienda extenderlo en capas de 25 a 50 cm para conseguir una buena compactación.
- Esta compactación se consigue más fácilmente si escograva tiene un grado de humedad entre el 10 y el 15 %. Si tiene más, ésta humedad se pierde fácilmente al aire libre.
- Estabiliza muy bien los terrenos arcillosos dejando una capa compactada sin movimientos.
- Es poco sensible a las heladas y se puede trabajar bien con temperaturas de -5° C. Con tiempo frío y húmedo desprende una nube superficial de vapor.
- Tiene un comportamiento excelente en tiempo de lluvia ya que se puede utilizar y de inmediato pasar por encima, mientras que con otros materiales sería necesario parar la obra.
- Es un buen material para rellenos, terraplenes y sub-bases de parkings, calles y carreteras. Pero no es apto para base.

ANEXO 2

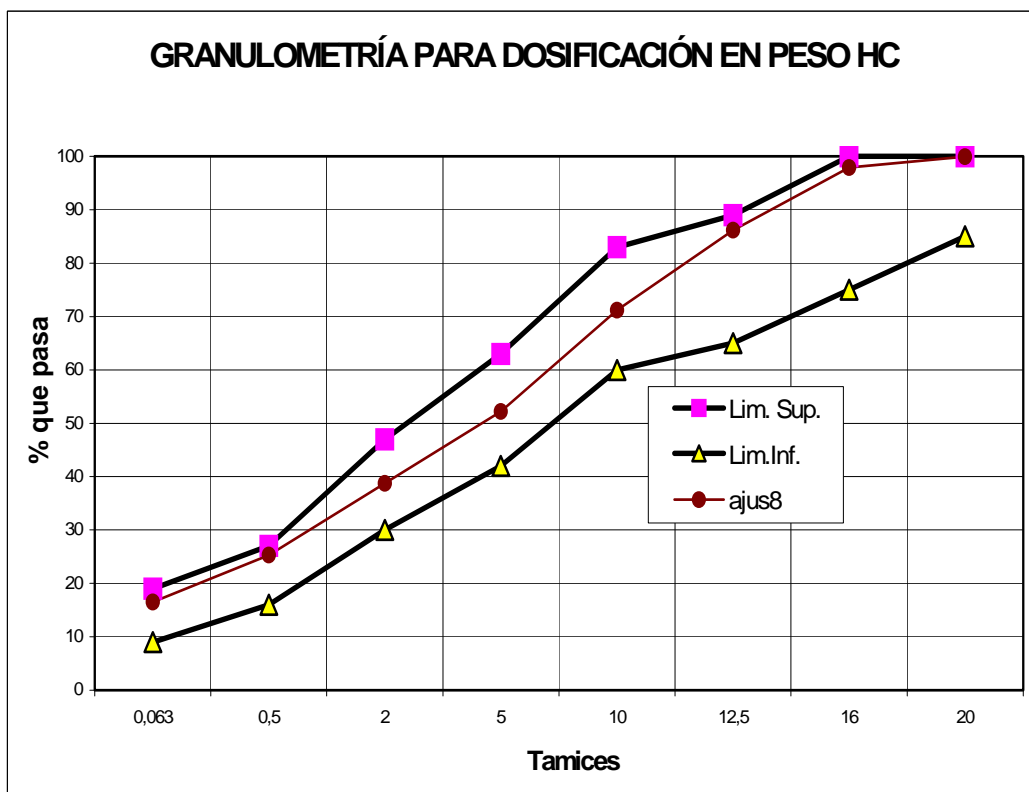
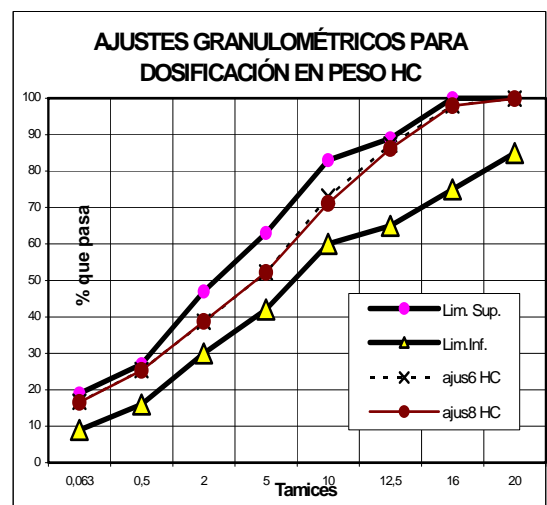
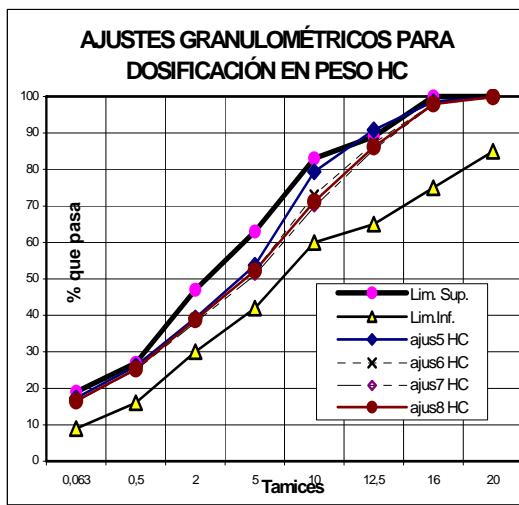
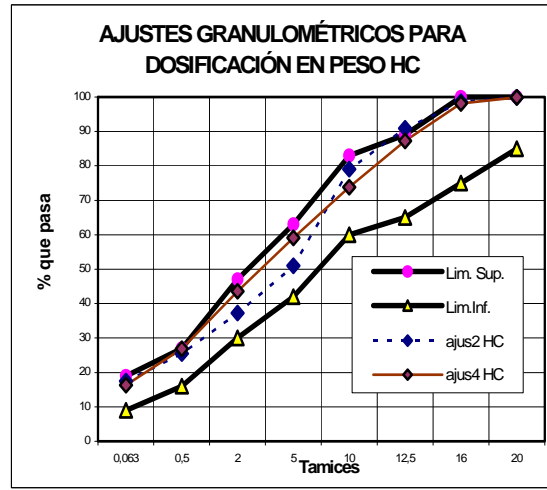
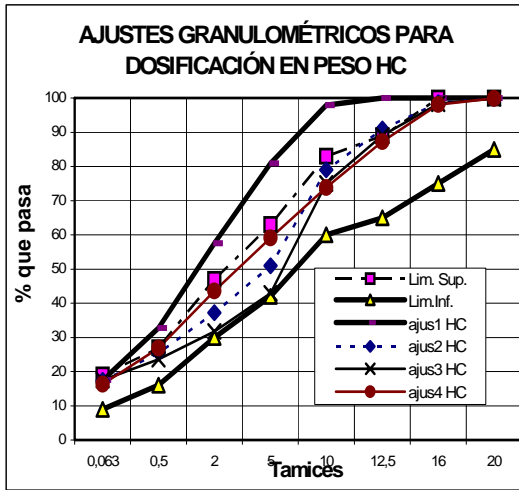
2.1.- TANTEOS DE LAS DOSIFICACIONES DEL HORMIGÓN COMPACTADO (HC) Y GRAVA-CEMENTO (G-C), CON ÁRIDOS NATURALES Y ESCORIAS DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (EIRSU) DE MATARÓ DEL MES DE MARZO DEL 2001.

El anexo dos, esta ligado con el capítulo 4, correspondiente al estudio de los HC y la G-C con mezclas de áridos de EIRSU y arena natural, en diferentes porcentajes. Para lo cual se realizó un estudio teórico de las dosificaciones.

A.2.1.- Diferentes tanteos de dosificación para el hormigón compactado.

En este anexo se indican los diferentes tanteos (ajustes granulométricos) de dosificación para el hormigón compactado. Para este método, se mantuvo fijo el porcentaje de cemento recomendado en el PG-3/2002, y se varió los porcentajes de áridos, describiendo nuevas curvas granulométricas, que también se incluye en el mismo anexo.

METODO DE DOSIFICACION DEL HC											
EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL											
AJUSTES GRANULOMETRICOS											
Ajuste: H.C.1 (CEMENTO =14% ; EM12-20 = 40% ; EM5-12 = 25% ; AN1/0-5 = 21%)											
Tamiz	AN1/0-5	EM	EM	cem	PG-3/2002: HC		Cemento	EM12-20	EM5-12	AN1-0/5	HCEM14
(mm)	0-5	5-12	12-20	C	Lim. Sup.	Lim.Inf.	0,14	0,4	0,25	0,21	1
20	100	100	100	100	100	85	14	40	25	21	100
16	100	100	95	100	100	75	14	40	25	21	100
12,5	100	100	64	100	89	65	14	40	25	21	100
10	100	92	28	100	83	60	14	40	23	21	98
5	98	29	6	100	63	42	14	39	7	21	81
2	65	15	4	100	47	30	14	26	4	14	57
0,5	26	11	3	100	27	16	14	10	3	5	33
0,063	3	7	1	100	19	9	14	1	2	1	18
Ajuste: H.C.2 (CEMENTO =14% ; EM12-20 = 25% ; EM5-12 = 35% ; AN1-0/5= 26%)											
Tamiz	AN1/0-5	EM	EM	cem	PG-3/2002: HC		Cemento	EM12-20	EM5-12	AN1-0/5	HCEM14
(mm)	0-5	5-12	12-20	C	Lim. Sup.	Lim.Inf.	0,14	0,25	0,35	0,26	1
20	100	100	100	100	100	85	14	25	35	26	100
16	100	100	95	100	100	75	14	24	35	26	99
12,5	100	100	64	100	89	65	14	16	35	26	91
10	100	92	28	100	83	60	14	7	32	26	79
5	98	29	6	100	63	42	14	2	10	25	51
2	65	15	4	100	47	30	14	1	5	17	37
0,5	26	11	3	100	27	16	14	1	4	7	26
0,063	3	7	1	100	19	9	14	0	2	1	17
Ajuste: H.C.3 (CEMENTO =14% ; EM12-20 = 30% ; EM5-12 = 40% ; AN1-0/5= 16%)											
Tamiz	AN1/0-5	EM	EM	cem	PG-3/2002: HC		Cemento	EM12-20	EM5-12	AN1-0/5	HCEM14
(mm)	0-5	5-12	12-20	C	Lim. Sup.	Lim.Inf.	0,14	0,3	0,4	0,16	1
20	100	100	100	100	100	85	14	30	40	16	100
16	100	100	95	100	100	75	14	28	40	16	98
12,5	100	100	64	100	89	65	14	19	40	16	89
10	100	92	28	100	83	60	14	8	37	16	75
5	98	29	6	100	63	42	14	2	11	16	43
2	65	15	4	100	47	30	14	1	6	10	32
0,5	26	11	3	100	27	16	14	1	5	4	24
0,063	3	7	1	100	19	9	14	0	3	0	18
Ajuste: H.C.4 (CEMENTO =14% ; EM12-20 = 35% ; EM5-12 = 10% ; AN1-0/5= 41%)											
Tamiz	AN1/0-5	EM	EM	cem	PG-3/2002: HC		Cemento	EM12-20	EM5-12	AN1-0/5	HCEM14
(mm)	0-5	5-12	12-20	C	Lim. Sup.	Lim.Inf.	0,14	0,35	0,1	0,41	1
20	100	100	100	100	100	85	14	35	10	41	100
16	100	100	95	100	100	75	14	33	10	41	98
12,5	100	100	64	100	89	65	14	22	10	41	87
10	100	92	28	100	83	60	14	10	9	41	74
5	98	29	6	100	63	42	14	2	3	40	59
2	65	15	4	100	47	30	14	1	2	27	44
0,5	26	11	3	100	27	16	14	1	1	11	27
0,063	3	7	1	100	19	9	14	0	1	1	16



**METODO DE DOSIFICACION DEL HORMIGON COMPACTADO
EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL
AJUSTES GRANULOMETRICOS**

Ajuste: H.C.5 (CEMENTO =14% ; EM12-20 = 25% ; EM5-12 = 31% ; AN1/0-5= 30%)

Tamiz (mm)	AN1-0/5	EM	EM	cem C	PG-3/2002: HC		Cemento 0,14	EM12-20 0,25	EM5-12 0,31	AN1-0/5 0,3	HC14 1
	0-5	5-12	12-20		Lim. Sup.	Lim.Inf.					
20	100	100	100	100	100	85	14	25	31	30	100
16	100	100	95	100	100	75	14	24	31	30	99
12,5	100	100	64	100	89	65	14	16	31	30	91
10	100	92	28	100	83	60	14	7	28	30	79
5	98	29	6	100	63	42	14	2	9	29	54
2	65	15	4	100	47	30	14	1	5	20	39
0,5	26	11	3	100	27	16	14	1	4	8	26
0,063	3	7	1	100	19	9	14	0	2	1	17

Ajuste: H.C.6 (CEMENTO =14% ; EM12-20 = 35% ; EM5-12 = 20% ; AN1-0/5= 31%)

Tamiz (mm)	AN1-0/5	EM	EM	cem C	PG-3/2002: HC		Cemento 0,14	EM12-20 0,35	EM5-12 0,2	AN1-0/5 0,31	HC14 1
	0-5	5-12	12-20		Lim. Sup.	Lim.Inf.					
20	100	100	100	100	100	85	14	35	20	31	100
16	100	100	95	100	100	75	14	33	20	31	98
12,5	100	100	64	100	89	65	14	22	20	31	87
10	100	92	28	100	83	60	14	10	18	31	73
5	98	29	6	100	63	42	14	2	6	30	52
2	65	15	4	100	47	30	14	1	3	20	39
0,5	26	11	3	100	27	16	14	1	2	8	25
0,063	3	7	1	100	19	9	14	0	1	1	17

Ajuste: H.C.7 (CEMENTO =14% ; EM12-20 = 40% ; EM5-12 = 15% ; AN1/0-5= 31%)

Tamiz (mm)	AN1-0/5	EM	EM	cem C	PG-3/2002: HC		Cemento 0,14	EM12-20 0,4	EM5-12 0,15	AN1-0/5 0,31	HC14 1
	0-5	5-12	12-20		Lim. Sup.	Lim.Inf.					
20	100	100	100	100	100	85	14	40	15	31	100
16	100	100	95	100	100	75	14	38	15	31	98
12,5	100	100	64	100	89	65	14	25	15	31	85
10	100	92	28	100	83	60	14	11	14	31	70
5	98	29	6	100	63	42	14	2	4	30	51
2	65	15	4	100	47	30	14	2	2	20	38
0,5	26	11	3	100	27	16	14	1	2	8	25
0,063	3	7	1	100	19	9	14	0	1	1	16

Ajuste: H.C.8 (CEMENTO =14% ; EM12-20 = 38% ; EM5-12 = 16% ; AN1-0/5= 32%)

Tamiz (mm)	AN1-0/5	EM	EM	cem C	PG-3/2002: HC		Cemento 0,14	EM12-20 0,38	EM5-12 0,16	AN1-0/5 0,32	HC14 1
	0-5	5-12	12-20		Lim. Sup.	Lim.Inf.					
20	100	100	100	100	100	85	14	38	16	32	100
16	100	100	95	100	100	75	14	36	16	32	98
12,5	100	100	64	100	89	65	14	24	16	32	86
10	100	92	28	100	83	60	14	10	15	32	71
5	98	29	6	100	63	42	14	2	5	31	52
2	65	15	4	100	47	30	14	2	2	21	39
0,5	26	11	3	100	27	16	14	1	2	8	25
0,063	3	7	1	100	19	9	14	0	1	1	17

**METODO DE DOSIFICACION DEL HORMIGON COMPACTADO
EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL
AJUSTES GRANULOMETRICOS**

Resumen

Tamiz	PG-3/2002		ajus1	ajus2	ajus3	ajus4	ajus5	ajus6	ajus7	ajus8
(mm)	Lim.Sup.	Lim.Inf.	HC	HC	HC	HC	HC	HC	HC	HC
20	100	85	100	100	100	100	100	100	100	100
16	100	75	100	99	98	98	99	98	98	98
12,5	89	65	100	91	89	87	91	87	85	86
10	83	60	98	79	75	74	79	73	70	71
5	63	42	81	51	43	59	54	52	51	52
2	47	30	57	37	32	44	39	39	38	39
0,5	27	16	33	26	24	27	26	25	25	25
0,063	19	9	18	17	18	16	17	17	16	17

Ajuste: H.C.8 (CEMENTO =14% ; ESCORIA 12-20 = 38% ; ESCORIA 5-12 = 16% ; ARENA NATURAL 0-5 = 32%)

Tamiz (mm)	AN1-0/5	EM	EM	cem	PG-3/2002		14% cem	EM12-20	EM5-12	AN1-0/5	ajus8 HC
	0-5	5-12	12-20	C	Lim. Sup.	Lim.Inf.	0,14	0,38	0,16	0,32	1
20	100	100	100	100	100	85	14	38	16	32	100
16	100	100	95	100	100	75	14	36	16	32	98
12,5	100	100	64	100	89	65	14	24	16	32	86
10	100	92	28	100	83	60	14	10	15	32	71
5	98	29	6	100	63	42	14	2	5	31	52
2	65	15	4	100	47	30	14	2	2	21	39
0,5	26	11	3	100	27	16	14	1	2	8	25
0,063	3	7	1	100	19	9	14	0	1	1	17

ALTERNATIVA 1 HC con 14% de Cemento

**METODO DE DOSIFICACION DEL HORMIGÓN
EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL
AJUSTES GRANULOMETRICO SELECCIONADO.**

Ajuste 8 H.C.

H.C. (CEMENTO = 14% ; EM12-20 = 38% ; EM5-12% = 16% ; AN1-0/5= 32%)

Tamiz (mm)	C: 14%	EM12-20	EM5-12	AN1-0/5	ajus8.H.C.
	0,14	0,38	0,16	0,32	HC
20	14	38	16	32	100
16	14	36	16	32	98
12,5	14	24	16	32	86
10	14	10	15	32	71
5	14	2	5	31	52
2	14	2	2	21	39
0,5	14	1	2	8	25
0,063	14	0	1	1	17

A.2.2.- Diferentes tanteos de dosificación para la grava-cemento.

En este anexo se indican los diferentes tanteos (ajustes granulométricos) de dosificación para la grava-cemento. Para este método, se mantuvo fijo el porcentaje de cemento recomendado en el PG-3/2002, y se varió los porcentajes de áridos, describiendo nuevas curvas granulométricas, que también se incluye en el mismo anexo.

**METODO DE DOSIFICACION DE LA GRAVA CEMENTO COMPACTADA
EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL
AJUSTES GRANULOMETRICOS**

Ajuste: GC1 (CEMENTO = 4% ; EM12-20 =40% ; EM5-12 = 25% ; AN1-0/5= 31%)

Tamiz (mm)	AN1-0/5	EM 5-12	EM 12-20	cem C	PG-3/2002		4% cem 0,04	EM12-20 0,4	EM5-12 0,25	AN1-0/5 0,31	ajuste1 1
					Lim.Sup.	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	40	25	31	100
16	100	100	95	100	92	65	4	38	25	31	98
12,5	100	100	64	100	86	55	4	25	25	31	85
10	100	92	28	100	80	50	4	11	23	31	69
5	98	29	6	100	60	35	4	2	7	30	44
2	65	15	4	100	45	25	4	2	4	20	30
0,5	26	11	3	100	24	10	4	1	3	8	16
0,063	3	7	1	100	8	1	4	0	2	1	7

Ajuste: GC2 (CEMENTO = 4% ; EM12-20 = 20% ; EM5-12 = 45% ; AN1-0/5= 31%)

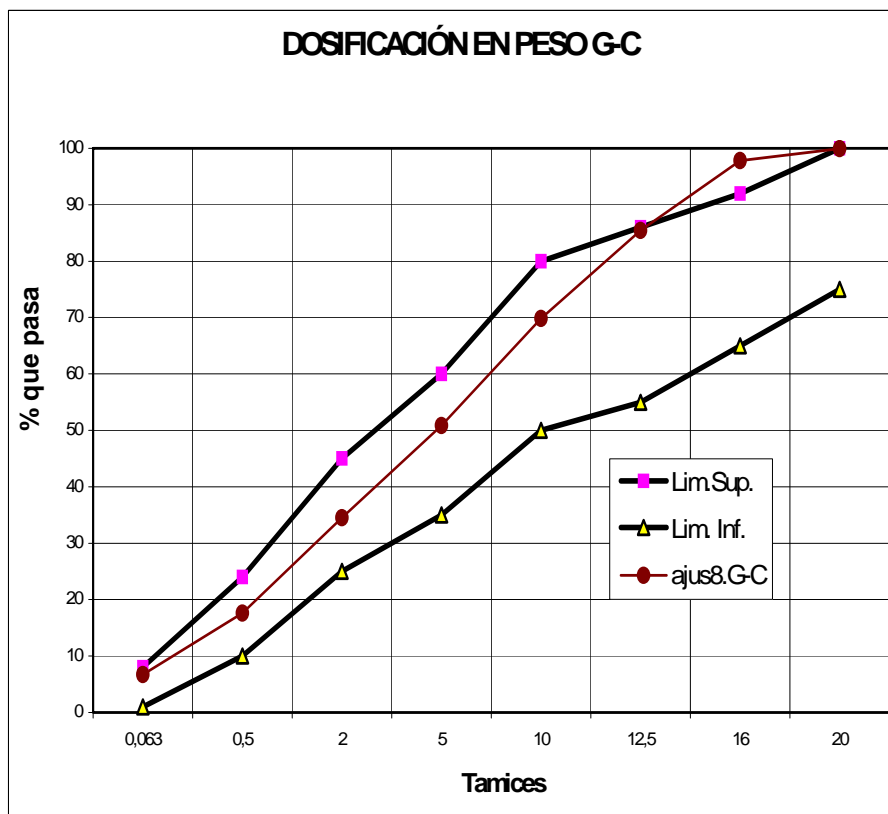
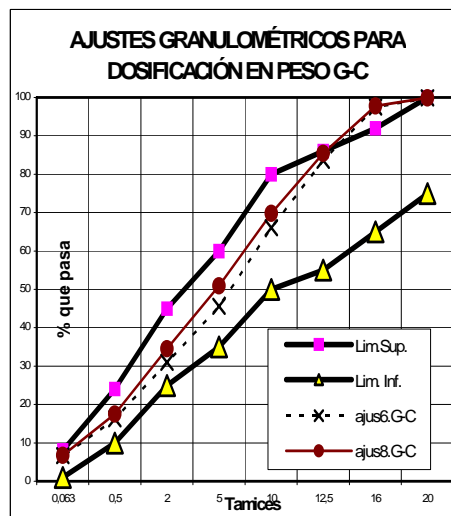
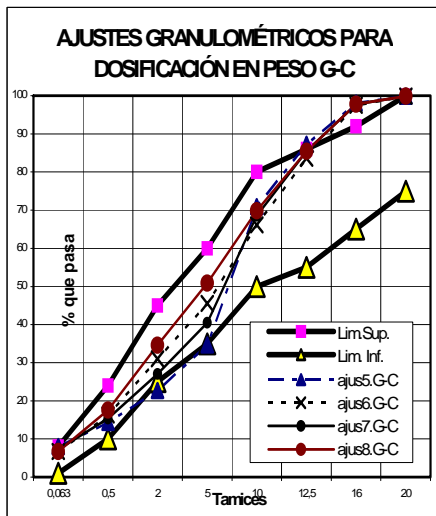
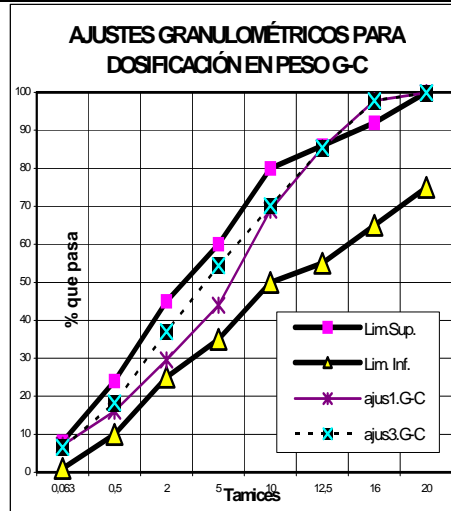
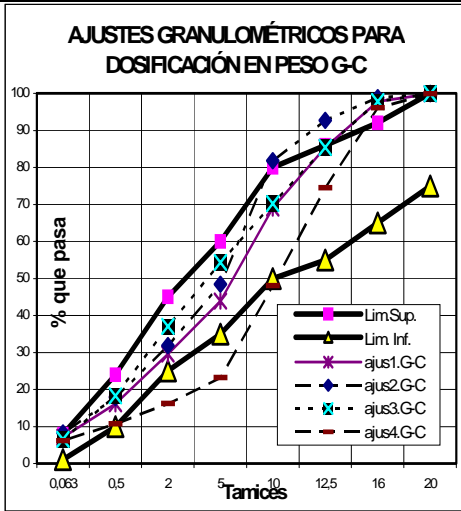
Tamiz (mm)	AN1-0/5	EM 5-12	EM 12-20	cem C	PG-3/2002		4% cem 0,04	EM12-20 0,2	EM5-12 0,45	AN1-0/5 0,31	ajuste2 1
					Lim.Sup.	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	20	45	31	100
16	100	100	95	100	92	65	4	19	45	31	99
12,5	100	100	64	100	86	55	4	13	45	31	93
10	100	92	28	100	80	50	4	6	41	31	82
5	98	29	6	100	60	35	4	1	13	30	48
2	65	15	4	100	45	25	4	1	7	20	32
0,5	26	11	3	100	24	10	4	1	5	8	18
0,063	3	7	1	100	8	1	4	0	3	1	8

Ajuste: GC3 (CEMENTO = 4% ; EM12-20 = 40% ; EM5-12 = 10% ; AN1-0/5= 46%)

Tamiz (mm)	AN1-0/5	EM 5-12	EM 12-20	cem C	PG-3/2002		4% cem 0,04	EM12-20 0,4	EM5-12 0,1	AN1-0/5 0,46	ajuste 3 1
					Lim.Sup.	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	40	10	46	100
16	100	100	95	100	92	65	4	38	10	46	98
12,5	100	100	64	100	86	55	4	25	10	46	85
10	100	92	28	100	80	50	4	11	9	46	70
5	98	29	6	100	60	35	4	2	3	45	54
2	65	15	4	100	45	25	4	2	2	30	37
0,5	26	11	3	100	24	10	4	1	1	12	18
0,063	3	7	1	100	8	1	4	0	1	1	7

Ajuste: GC4 (CEMENTO = 4% ; EM12-20 = 70% ; EM5-12 = 15% ; AN1-0/5= 11%)

Tamiz (mm)	AN1-0/5	EM 5-12	EM 12-20	cem C	PG-3/2002		4% cem 0,04	EM12-20 0,7	EM5-12 0,15	AN1-0/5 0,11	ajuste 4 1
					Lim.Sup.	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	70	15	11	100
16	100	100	95	100	92	65	4	66	15	11	96
12,5	100	100	64	100	86	55	4	45	15	11	75
10	100	92	28	100	80	50	4	19	14	11	48
5	98	29	6	100	60	35	4	4	4	11	23
2	65	15	4	100	45	25	4	3	2	7	16
0,5	26	11	3	100	24	10	4	2	2	3	11
0,063	3	7	1	100	8	1	4	1	1	0	6



Ajuste: GC5 (CEMENTO = 4% ; EM12-20 = 35% ; EM5-12 = 45% ; AN1-0/5= 16%)

Tamiz (mm)	AN1-0/5 0-5	EM 5-12	EM 12-20	cem C	PG-3/2002		4% cem 0,04	EM12-20 0,35	EM5-12 0,45	AN1/0-5 0,16	ajuste 5 1
					Lim.Sup.	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	35	45	16	100
16	100	100	95	100	92	65	4	33	45	16	98
12,5	100	100	64	100	86	55	4	22	45	16	87
10	100	92	28	100	80	50	4	10	41	16	71
5	98	29	6	100	60	35	4	2	13	16	35
2	65	15	4	100	45	25	4	1	7	10	23
0,5	26	11	3	100	24	10	4	1	5	4	14
0,063	3	7	1	100	8	1	4	0	3	0	8

ajuste: GC6 (CEMENTO = 4% ; EM12-20 = 45% ; EM5-12 = 16% ; AN1-0/5= 35%)

Tamiz (mm)	AN1-0/5 0-5	EM 5-12	EM 12-20	cem C	PG-3/2002		4% cem 0,04	EM12-20 0,45	EM5-12 0,16	AN1/0-5 0,35	ajuste 6 1
					Lim.Sup.	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	45	16	35	100
16	100	100	95	100	92	65	4	43	16	35	98
12,5	100	100	64	100	86	55	4	29	16	35	84
10	100	92	28	100	80	50	4	12	15	35	66
5	98	29	6	100	60	35	4	3	5	34	46
2	65	15	4	100	45	25	4	2	2	23	31
0,5	26	11	3	100	24	10	4	1	2	9	16
0,063	3	7	1	100	8	1	4	1	1	1	7

Ajuste: GC7 (CEMENTO = 4% ; EM12-20 = 40% ; EM5-12 = 30% ; AN1-0/5= 26%)

Tamiz (mm)	AN1-0/5 0-5	EM 5-12	EM 12-20	cem C	PG-3/2002		4% cem 0,04	EM12-20 0,4	EM5-12 0,3	AN1/0-5 0,26	ajuste 7 1
					Lim.Sup.	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	40	30	26	100
16	100	100	95	100	92	65	4	38	30	26	98
12,5	100	100	64	100	86	55	4	25	30	26	85
10	100	92	28	100	80	50	4	11	28	26	69
5	98	29	6	100	60	35	4	2	9	25	40
2	65	15	4	100	45	25	4	2	5	17	27
0,5	26	11	3	100	24	10	4	1	3	7	15
0,063	3	7	1	100	8	1	4	0	2	1	7

Ajuste: GC8 (CEMENTO = 4% ; EM12-20 = 40% ; EM5-12 = 15% ; AN1-0/5= 41%)

Tamiz (mm)	AN1-0/5 0-5	EM 5-12	EM 12-20	cem C	PG-3/2002		4% cem 0,04	EM12-20 0,4	EM5-12 0,15	AN1/0-5 0,41	ajuste 8 1
					Lim.Sup.	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	40	15	41	100
16	100	100	95	100	92	65	4	38	15	41	98
12,5	100	100	64	100	86	55	4	25	15	41	85
10	100	92	28	100	80	50	4	11	14	41	70
5	98	29	6	100	60	35	4	2	4	40	51
2	65	15	4	100	45	25	4	2	2	27	35
0,5	26	11	3	100	24	10	4	1	2	11	18
0,063	3	7	1	100	8	1	4	0	1	1	7

**METODO DE DOSIFICACION DE LA GRAVA CEMENTO COMPACTADA
EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL
AJUSTES GRANULOMETRICOS**

RESUMEN DE TANTEOS PARA AJUSTAR LA GRANULOMETRIA DE LOS ARIDOS A LOS LIMITES del PG-3/2002

Tamiz (mm)	PG-3/2002		ajus1	ajus2	ajus3	ajus4	ajus5	ajus6	ajus7	ajus8
	Lim.Sup.	Lim.Inf.	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C
20	100	75	100	100	100	100	100	100	100	100
16	92	65	98	99	98	96	98	98	98	98
12,5	86	55	85	93	85	75	87	84	85	85
10	80	50	69	82	70	48	71	66	69	70
5	60	35	44	48	54	23	35	46	40	51
2	45	25	30	32	37	16	23	31	27	35
0,5	24	10	16	18	18	11	14	16	15	18
0,063	8	1	7	8	7	6	8	7	7	7

GC8 (CEMENTO = 4% ; EM12-20 = 40% ; EM5-12 = 15% ; AN1-0/5= 41%)

Tamiz (mm)	AN1-0/5 0-5	EM 5-12	EM 12-20	cem C	PG-3/2002		4% cem 0,04	12-20 0,4	5-12 0,15	0-5 0,41	ajuste 8 1
					Lim.Sup	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	40	15	41	100
16	100	100	95	100	92	65	4	38	15	41	98
12,5	100	100	64	100	86	55	4	25	15	41	85
10	100	92	28	100	80	50	4	11	14	41	70
5	98	29	6	100	60	35	4	2	4	40	51
2	65	15	4	100	45	25	4	2	2	27	35
0,5	26	11	3	100	24	10	4	1	2	11	18
0,063	3	7	1	100	8	1	4	0	1	1	7

ALTERNATIVA 1 G-C con 4% de cemento

**METODO DE DOSIFICACION DE LA GRAVA CEMENTO COMPACTADA
EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL
AJUSTE GRANULOMETRICO SELECCIONADO.**

Ajuste 8 G-C

GC (CEMENTO = 4% ; EM12-20 = 40% ; EM5-12% = 15% ; AN1-0/5 = 41%)

Tamiz (mm)	C: 4% 0,04	EM12-20 0,4	EM5-12 0,15	AN1-0/50-5 0,41	ajuste 8 GC
20	4	40	15	41	100
16	4	38	15	41	98
12,5	4	25	15	41	85
10	4	11	14	41	70
5	4	2	4	40	51
2	4	2	2	27	35
0,5	4	1	2	11	18
0,063	4	0	1	1	7

A.2.3.- Correcciones de las dosificaciones por densidades del HC.

Este anexo corresponde a las correcciones de las dosificaciones por densidades del HC, ya que la dosificación utilizada para la fabricación del hormigón compactado y G-C, son válidas cuando sus componentes son solo de origen natural, en el caso del HC y de la G-C fabricadas con árido natural y EIRSU, las densidades de los áridos son muy diferentes, por lo tanto se ha hecho una corrección de las dosificaciones en volumen.

CORRECCIÓN DE LOS PORCENTAJES DE MATERIALES DE DOSIFICACIÓN

Antecedentes.

2) Los husos granulométricos del PG-3/2002, se refieren a agregados naturales.

3) En el caso presente, la arena está considerada dentro de los husos.

Por lo que la utilización de áridos de EIRSU (con densidades más bajas) obliga a realizar la corrección de este árido.

Corrección: Hormigón compactado 14%C

Datos previos:

Densidad del Cemento (Dc)	3 kg/cm ³
Densidad de La Arena Natural (AN)	2,7 kg/cm ³
Densidad de la Escoria 5-12 (Desc5-12)	2,46 kg/cm ³
Densidad de la Escoria 12-20 (Desc12-20)	2,42 kg/cm ³

Según los husos para la curva granulométrica:

C	14%
AN	32%
EM5-12	16%
EM12-20	38%
Suma	100%

Si hacemos la corrección para 100 kg del total de peso de los materiales, entonces:

C (kg)	14
AN1-0/5 (kg)	32
EM5-12 (kg)	16
EM12-20 (kg)	38
Peso total (kg)	<u>100</u>

a) El volumen de un árido natural es igual a la masa sobre la densidad del árido natural ($D=2,7 \text{ kg/cm}^3$)

$$\text{Volúmen (V)} \quad V=M/2,7$$

Esc5-12

$$V \text{ EM5-12} \quad = 16/2,7 \quad 5,93 \text{ cm}^3$$

Este es el volumen de Esc5-12 si fuese natural, pero como tiene una diferente densidad, entonces:

Se debe encontrar la masa que se ha de necesitar para obtener este volúmen de árido natural

$$\text{Masa} \quad M=D*V$$

$$\text{Masa (M EM5-12)} \quad = 2,46*5,93 \quad \mathbf{14,58 \text{ kg}}$$

b) El mismo procedimiento con la escoria 12-20. En el caso de la arena natural (AN) y el cemento no se realizan las correcciones.

Esc12-20

$$V \text{ EM12-20} \quad = 38/2,7 \quad 37,04 \text{ cm}^3$$

Este es el volumen de Esc12-20 si fuese natural, pero como tiene una diferente densidad, entonces:

Se debe encontrar la masa que se ha de necesitar para obtener este volúmen de árido natural

$$\text{Masa} \quad M=D*V$$

$$\text{Masa (M EM12-20)} \quad = 2,42*14,58 \quad \mathbf{34,06 \text{ kg}}$$

c) Se suma el nuevo peso total de los materiales y se encuentra los porcentajes con una regla de tres.

C (Kg)	14
AN1-0/5 (Kg)	32
EM5-12 (Kg)	14,58
EM12-20 (Kg)	34,06
Peso total (Kg)	94,64

Cemento

94,64 --- 100%	
14 --- X =	14,79%

Arena

94,64 --- 100%	
32 --- X =	33,81%

Esc5-12

94,64 --- 100%	
14,58 --- X =	15,40%

Esc12-20

94,64 --- 100%	
34,06 --- X =	35,99%

Conclusiones de las correcciones

Para obtener el mismo volumen de un árido natural, debemos trabajar con los porcentajes corregidos.

Comparemos los porcentajes sin corregir y los corregidos

Material	%sin corregir	% corregidos
Cemento	14%	14,79%
AN1-0/5	32%	33,81%
EM5-12	16%	15,40%
EM12-20	38%	35,99%
Total %	100%	100,00%

Se nota claramente que la cantidad de cemento necesaria para cubrir todos los granos es mayor que la dada por los husos correspondientes; consideración que se recomienda tener en cuenta a la hora de realizar el tramo experimental de carretera

A.2.4.- Correcciones de las dosificaciones por densidades de la G-C.

Este anexo corresponde a las correcciones de las dosificaciones por densidades de la grava-cemento, ya que la dosificación utilizada para la fabricación del hormigón compactado y G-C, son válidas cuando sus componentes son solo de origen natural, en el caso del HC y de la G-C fabricadas con árido natural y EIRSU, las densidades de los áridos son muy diferentes, por lo tanto se ha hecho una corrección de las dosificaciones en volumen.

CORRECCIÓN DE LOS PORCENTAJES DE MATERIALES DE DOSIFICACIÓN

Datos previos:

Densidad del Cemento (Dc)	3 kg/cm ³
Densidad de La Arena Natural (AN)	2,7 kg/cm ³
Densidad de la Escoria 5-12 (Desc5-12)	2,46 kg/cm ³
Densidad de la Escoria 12-20 (Desc12-20)	2,42 kg/cm ³

Corrección:

Grava - Cemento 4%C

Según la curva granulométrica de los usos:

C	4%
AN1-0/5	41%
EM5-12	15%
EM12-20	40%
Suma	<u>100%</u>

Si hacemos la corrección para 100Kg del total de peso de los materiales, entonces:

C (Kg)	4
AN1-0/5 (Kg)	41
EM5-12 (Kg)	15
EM12-20 (Kg)	40
Peso total (Kg)	<u>100</u>

a) El volumen de un árido natural es igual a la masa sobre la densidad del árido natural ($D=2,7 \text{ kg/cm}^3$)

$$\text{Volúmen (V)} \quad V=M/2,7$$

Esc5-12

$$V \text{ EM5-12} \quad = 15/2,7 \quad 5,56 \text{ cm}^3$$

Este es el volumen de Esc5-12 si fuese natural, pero como tiene una diferente densidad, entonces:

Se debe encontrar la masa que se ha de necesitar para obtener este volúmen de árido natural

$$\text{Masa} \quad M=D*V$$

$$\text{Masa (M EM5-12)} \quad = 2,46*5,56 \quad \mathbf{13,67 \text{ kg}}$$

b) El mismo procedimiento con la escoria 12-20. En el caso de la arena natural (AN) y el cemento no se realizan las correcciones.

Esc12-20

$$V \text{ EM12-20} \quad = 40/2,7 \quad 14,81 \text{ cm}^3$$

Este es el volumen de Esc12-20 si fuese natural, pero como tiene una diferente densidad, entonces:

Se debe encontrar la masa que se ha de necesitar para obtener este volúmen de árido natural

$$\text{Masa} \quad M=D*V$$

$$\text{Masa (M EM12-20)} \quad = 2,42*14,81 \quad \mathbf{35,85 \text{ kg}}$$

c) Se suma el nuevo peso total de los materiales y se encuentra los porcentajes con una regla de tres.

C (Kg)	4
AN1-0/5 (Kg)	41
EM5-12 (Kg)	13,67
EM12-20 (Kg)	35,85
Peso total (Kg)	<u>94,52</u>

Cemento

$$\begin{array}{l} 94,52 \text{ --- } 100\% \\ 4 \text{ --- } X = \end{array} \quad \mathbf{4,23\%}$$

Arena

$$\begin{array}{l} 94,52 \text{ --- } 100\% \\ 41 \text{ --- } X = \end{array} \quad \mathbf{43,38\%}$$

Esc5-12

$$\begin{array}{l} 94,52 \text{ --- } 100\% \\ 13,67 \text{ --- } X = \end{array} \quad \mathbf{14,46\%}$$

Esc12-20

$$\begin{array}{l} 94,52 \text{ --- } 100\% \\ 35,85 \text{ --- } X = \end{array} \quad \mathbf{37,93\%}$$

Conclusiones de las correcciones

Si comparamos las densidades, podemos apreciar que los áridos naturales tienen mayor densidad que los áridos artificiales

$$2,7\text{g/cm}^3 > 2,46\text{g/cm}^3 \quad \text{EM5-12}$$

$$2,7\text{g/cm}^3 > 2,42\text{g/cm}^3 \quad \text{EM12-20}$$

Esto implica que El volumen de un árido natural será menor que el volumen de un artificial.

$$V_n < V_{artifi}$$

Para obtener el mismo volumen de un árido natural, debemos trabajar con los porcentajes corregidos.

Comparemos los porcentajes sin corregir y los corregidos

Grava - Cemento con 4% de Cemento

Material	sin corregir	% corregidos
Cemento	4%	4,23%
AN1-0/5	41%	43,38%
EM5-12	15%	14,46%
EM12-20	40%	37,93%
Total %	100%	100,00%

Se nota claramente que la cantidad de cemento necesaria para cubrir todos los granos es mayor que la dada por los husos correspondientes; consideración que se recomienda tener en cuenta a la hora de realizar el tramo experimental de carretera

A.2.5.- Nuevas dosificaciones del hormigón compactado.

En el presente anexo se indican las nuevas dosificaciones del hormigón compactado. Esto se realizó con la intención de determinar la dosificación más económica y cuyo comportamiento cumpla con las recomendaciones del PG-3/2002 para hormigón compactado. Así pues, se probó la fabricación de probetas con diferentes dosificaciones, variando la cantidad de cemento. Los nuevos porcentajes de cemento para el hormigón compactado fueron de 12% y de 15%.

ALTERNATIVA 2 METODO DE DOSIFICACION DEL HORMIGÓN COMPACTADA

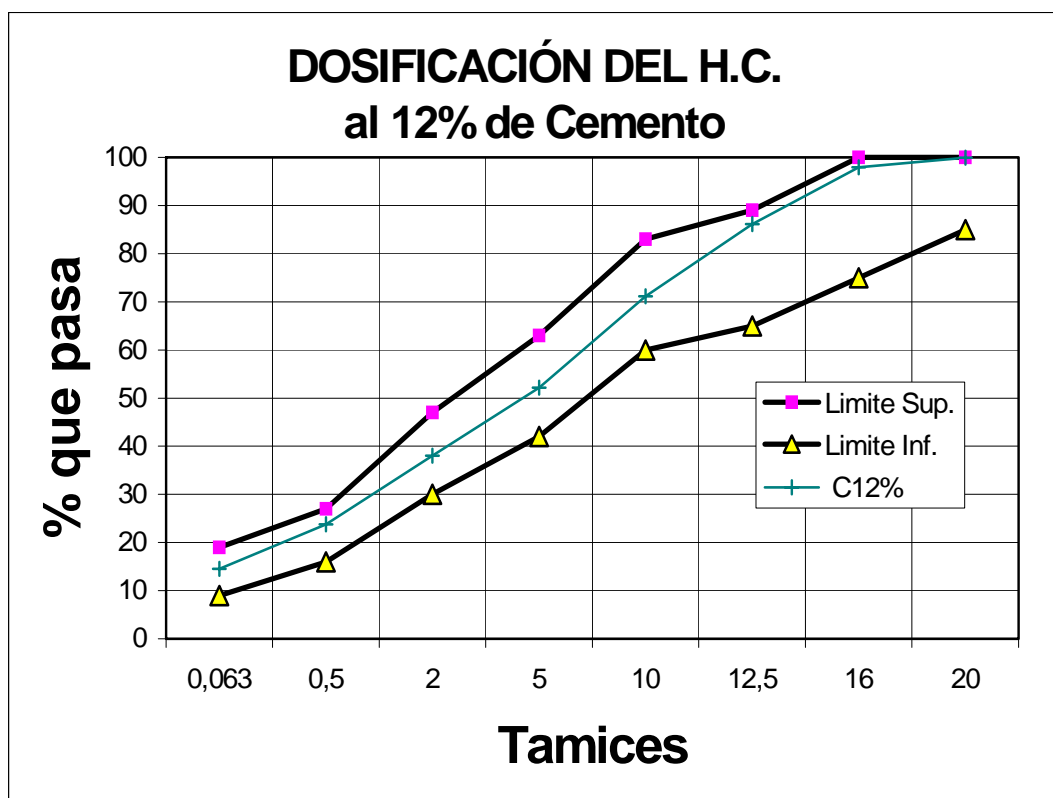
EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL
AJUSTES GRANULOMETRICOS CON DISMINUCIÓN DEL PORCENTAJE DE CEMENTO AL 12%

Ajuster: H.C.2 (CEMENTO =12% ; EM5-12 = 16% ; EM12-20 = 38% ; AN1-0/5= 34%

Tamiz (mm)	AN1/0-5	EM	EM	cem C	PG-3/2002		12% cem	EM12-20	EM 5-12	AN1-0/5	C12%
	0-5	5-12	12-20		Lim.Sup.	Lim.Inf.	0,12	0,38	0,16	0,34	HC
20	100	100	100	100	100	85	12	38	16	34	100
16	100	100	95	100	100	75	12	36	16	34	98
12,5	100	100	64	100	89	65	12	24	16	34	86
10	100	92	28	100	83	60	12	10	15	34	71
5	98	29	6	100	63	42	12	2	5	33	52
2	65	15	4	100	47	30	12	2	2	22	38
0,5	26	11	3	100	27	16	12	1	2	9	24
0,063	3	7	1	100	19	9	12	0	1	1	15

Resumen

Tamiz mm	PG-3/2002		Opción 2
	Lim. Sup.	Lim Inf.	C12%
20	100	85	100
16	100	75	98
12,5	89	65	86
10	83	60	71
5	63	42	52
2	47	30	38
0,5	27	16	24
0,063	19	9	15



ALTERNATIVA 3

METODO DE DOSIFICACION DEL HORMIGÓN COMPACTADA

EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL

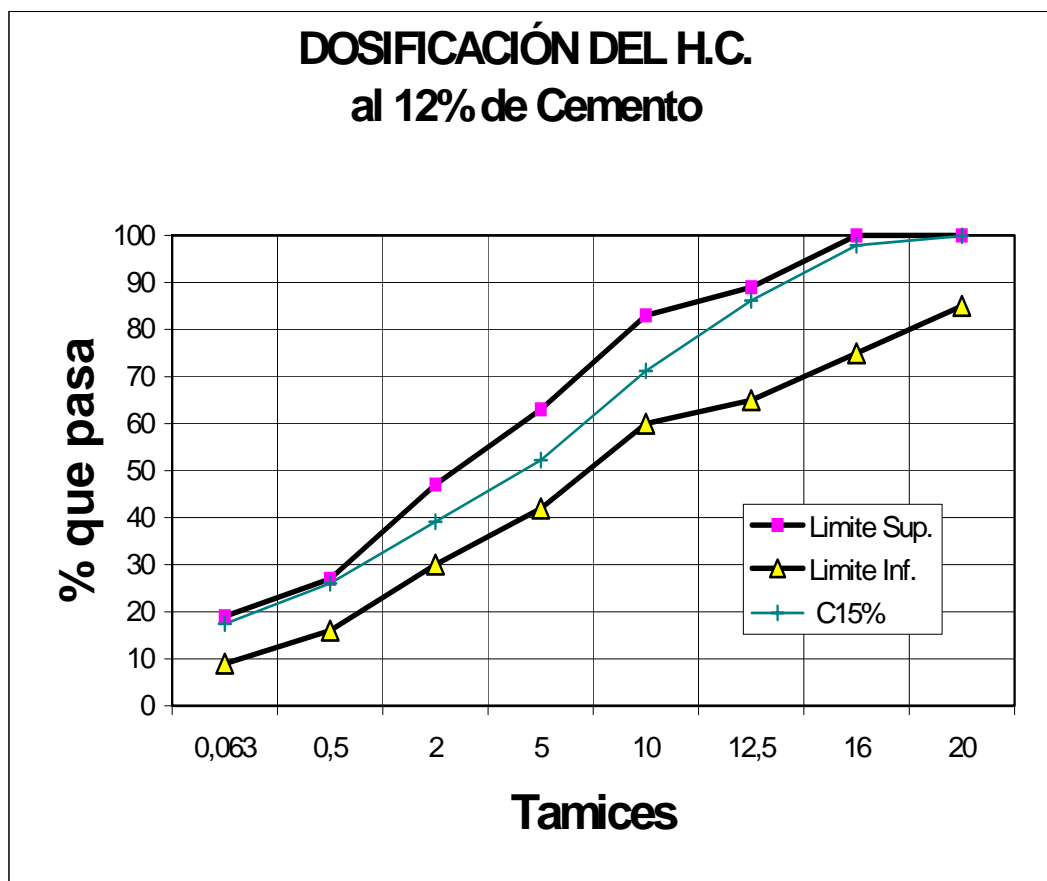
AJUSTES GRANULOMETRICOS CON AUMENTO DEL PORCENTAJE DE CEMENTO AL 15%

ajuste: H.C.3 (CEMENTO =15% ; EM5-12 = 16% ; EM12-20 = 38% ; AN1-0/5= 31%

Tamiz (mm)	AN1-0/5	EM	EM	cem	PG-3/2002		15% cem	EM12-20	EM5-12	AN1-0/5	C15%
	0-5	5-12	12-20	C	Lim.Sup.	Lim.Inf.	0,15	0,38	0,16	0,31	HC
20	100	100	100	100	100	85	15	38	16	31	100
16	100	100	95	100	100	75	15	36	16	31	98
12,5	100	100	64	100	89	65	15	24	16	31	86
10	100	92	28	100	83	60	15	10	15	31	71
5	98	29	6	100	63	42	15	2	5	30	52
2	65	15	4	100	47	30	15	2	2	20	39
0,5	26	11	3	100	27	16	15	1	2	8	26
0,063	3	7	1	100	19	9	15	0	1	1	17

Resumen

Tamiz	PG3/2002		Opción 3
	Lim Sup.	Lim.Inf.	C15%
20	100	85	100
16	100	75	98
12,5	89	65	86
10	83	60	71
5	63	42	52
2	47	30	39
0,5	27	16	26
0,063	19	9	17



A.2.6.- Nuevas dosificaciones de la grava-cemento.

En el presente anexo se indican las nuevas dosificaciones de la grava-cemento. Esto se realizó con la intención de determinar la dosificación más económica y cuyo comportamiento cumpla con las recomendaciones del PG-3/2002 para la grava-cemento. Así pues, se probó la fabricación de probetas con diferentes dosificaciones, variando la cantidad de cemento. Los nuevos porcentajes de cemento fueron de 3.5% y 5.5%.

ALTERNATIVA 2

METODO DE DOSIFICACION DE LA GRAVA CEMENTO COMPACTADA

EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL

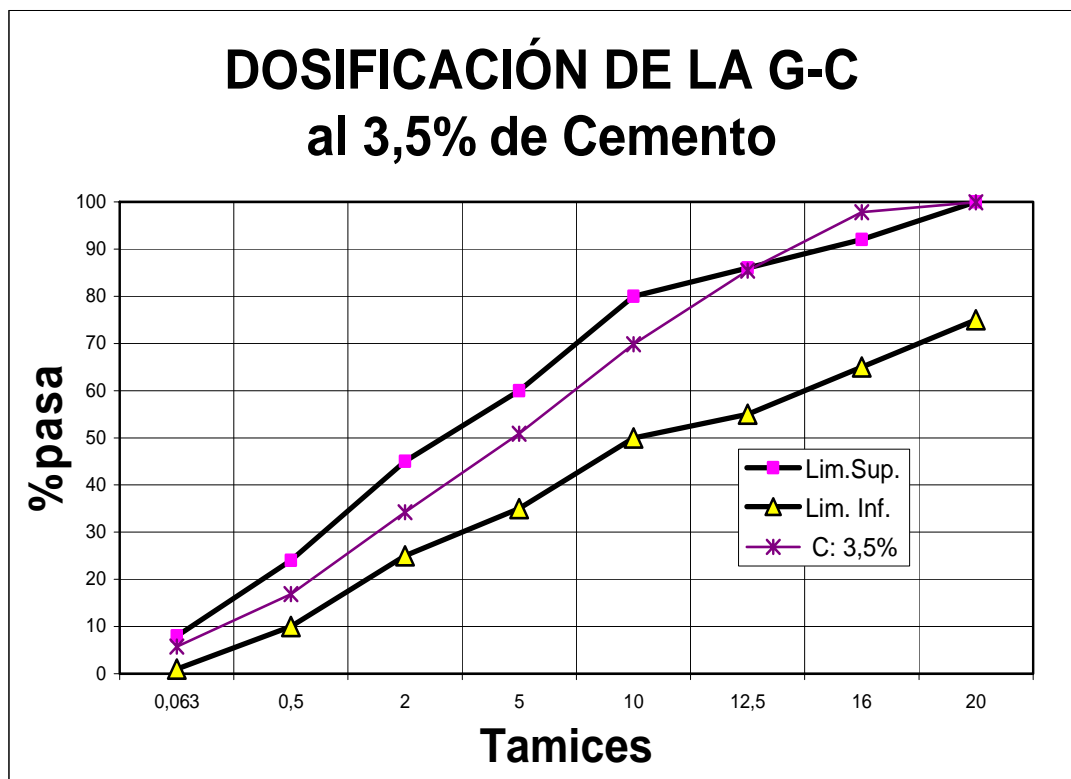
AJUSTES GRANULOMETRICOS CON DISMINUCION DEL PORCENTAJE DE CEMENTO AL 3,5%

Ajuste: GC2 (CEMENTO = 3,5% ; EM-12 = 15% ; EM12-20 = 40% ; AN2-0/5 = 41,5%)

Tamiz (mm)	AN1-0/5 0-5	Em 5-12	Em 12-20	cem C	PG-3/2002		3,5% cem 0,035	Ec12-20 0,4	Ec5-12 0,15	AN1-0/5 0,415	C 3,5% 1
					Lim.Sup.	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	40	15	42	100
16	100	100	95	100	92	65	4	38	15	42	98
12,5	100	100	64	100	86	55	4	25	15	42	85
10	100	92	28	100	80	50	4	11	14	42	70
5	98	29	6	100	60	35	4	2	4	41	51
2	65	15	4	100	45	25	4	2	2	27	34
0,5	26	11	3	100	24	10	4	1	2	11	17
0,063	3	7	1	100	8	1	4	0	1	1	6

Resumen

Tamiz (mm)	PG-3/2002		Opción 2
	Lim.Sup	Lim.Inf.	C: 3,5%
20	100	75	100
16	92	65	98
12,5	86	55	85
10	80	50	70
5	60	35	51
2	45	25	34
0,5	24	10	17
0,063	8	1	6

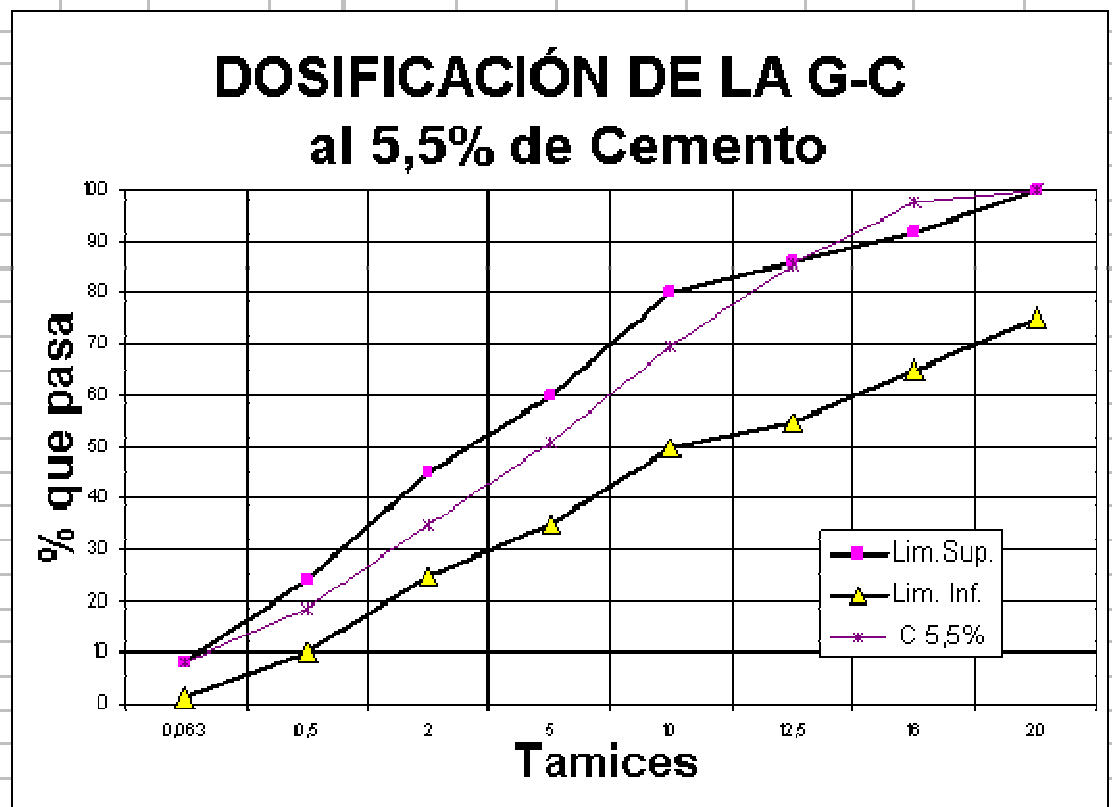


ALTERNATIVA 3**METODO DE DOSIFICACION DE LA GRAVA CEMENTO COMPACTADA
EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL****AJUSTES GRANULOMETRICOS CON AUMENTO DEL PORCENTAJE DE CEMENTO AL 5,5%****Ajuste: GC3 (CEMENTO = 5,5% ; EM5-12 = 15% ; EM12-20 = 40% ; AN-0/5 = 39,5%**

Tamiz (mm)	AN1-0/5	EM	EM	cem	PG-3/2002		5,5% cem	EM12-20	EM5-12	AN1-0/5	C 5,5%
	0-5	5-12	12-20	C	Lim. Sup.	Lim. Inf.	0,055	0,4	0,15	0,395	1
20	100	100	100	100	100	75	6	40	15	40	100
16	100	100	95	100	92	65	6	38	15	40	98
12,5	100	100	64	100	86	55	6	25	15	40	85
10	100	92	28	100	80	50	6	11	14	40	70
5	98	29	6	100	60	35	6	2	4	39	51
2	65	15	4	100	45	25	6	2	2	26	35
0,5	26	11	3	100	24	10	6	1	2	10	19
0,063	3	7	1	100	8	1	6	0	1	1	8

Resumen

Tamiz (mm)	PG-3/2002		Opción 3
	Lim. Sup.	Lim. Inf.	C 5,5%
20	100	75	100
16	92	65	98
12,5	86	55	85
10	80	50	70
5	60	35	51
2	45	25	35
0,5	24	10	19
0,063	8	1	8



ANEXO 3

A.3.- TANTEOS DE LAS DOSIFICACIONES DEL TRAMO EXPERIMENTAL DE CARRETERA EN LOS SUBTRAMOS DE HORMIGÓN COMPACTADO Y GRAVA-CEMENTO, CON ÁRIDOS NATURALES Y ESCORIAS DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (EIRSU) DE MATARÓ DEL MES DE NOVIEMBRE DE 2001, REFERENTE AL CAPÍTULO 5.

Este anexo, esta ligado con el capítulo 5 del tramo experimental de carretera, y que corresponde al estudio de los hormigones compactados y la grava-cemento con mezclas de áridos de EIRSU y áridos naturales, en diferentes porcentajes, Para lo cual se realizó un estudio teórico de las dosificaciones.

A.3.1.- Diferentes tanteos de dosificación para la grava-cemento de la carretera.

En este anexo se indican los tanteos para la grava-cemento carretera, donde se incluyen los 8 ajustes realizados para llegar a la determinar la dosificación seleccionada, la cual se aplicó en el tramo experimental de carretera.

METODO DE DOSIFICACION DE LA GRAVA CEMENTO PARA LA CARRETERA

METODO DE DOSIFICACION DE LA GRAVA CEMENTO COMPACTADA EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL AJUSTES GRANULOMETRICOS

Ajuste: GC1 (CEMENTO = 4% ; Ec12-20 =40% ; Ec5-12 = 25% ; AN2-0/5= 31%)

Tamiz (mm)	AN2/05 0-5	Ec 5-12	Ec 12-20	cem C	G-3/2002		4% cem 0,04	Ec12-20 0,4	Ec5-12 0,25	AN2-0/5 0,31	ajuste 1 1
					Lim.Sup	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	40	25	31	100
16	100	100	95	100	92	65	4	38	25	31	98
12,5	100	100	64	100	86	55	4	25	25	31	85
10	100	92	28	100	80	50	4	11	23	31	69
5	98	29	6	100	60	35	4	2	7	30	44
2	65	15	4	100	45	25	4	2	4	20	30
0,5	26	11	3	100	24	10	4	1	3	8	16
0,063	3	7	1	100	8	1	4	0	2	1	7

Ajuste: GC2 (CEMENTO = 4% ; Ec12-20 = 20% ; Ec5-12 = 45% ; AN2-0/5= 31%)

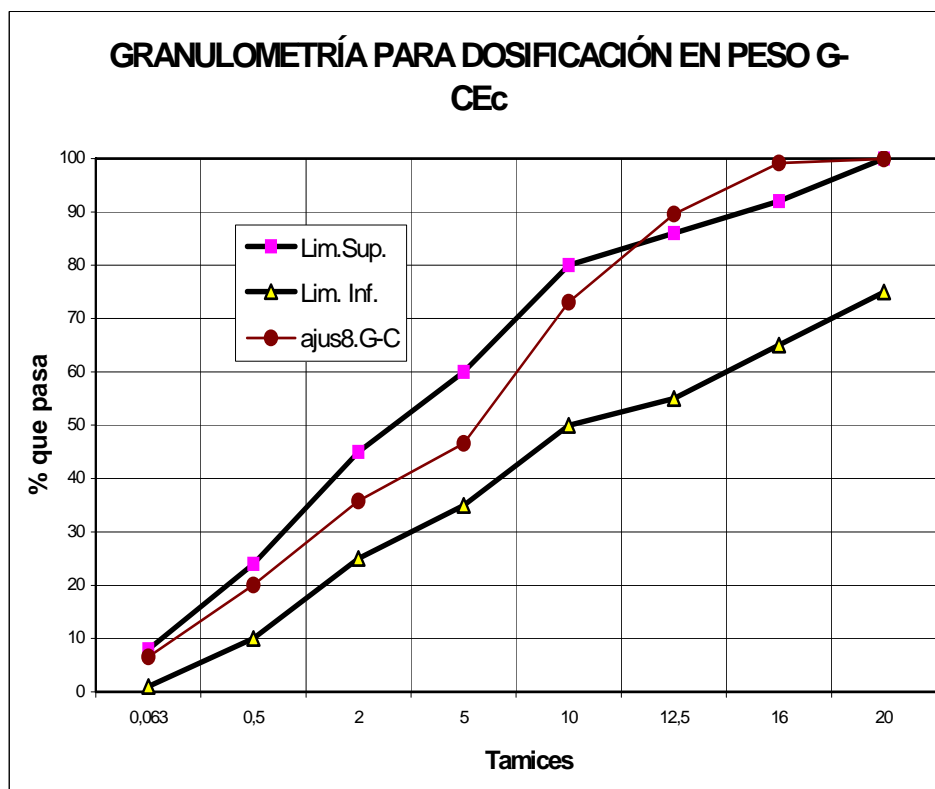
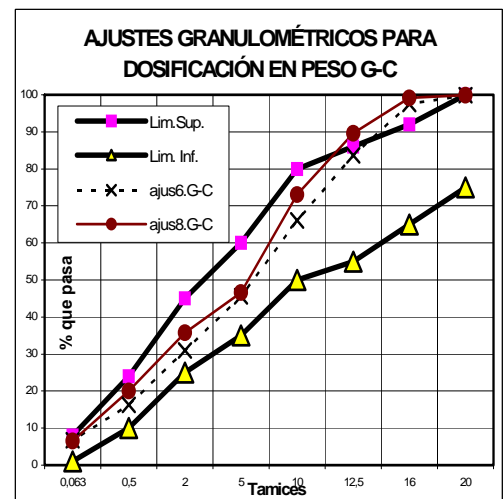
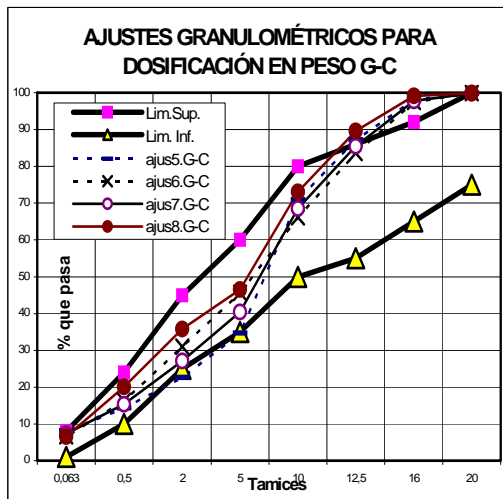
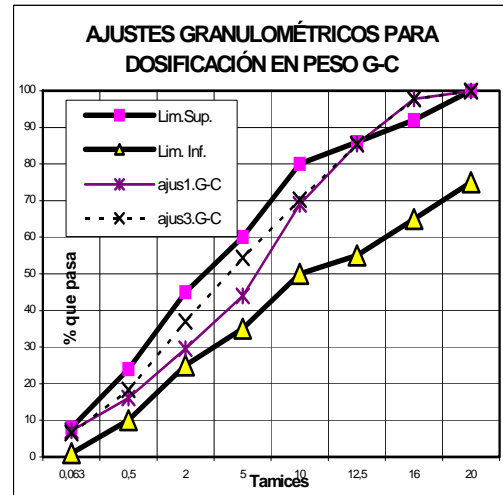
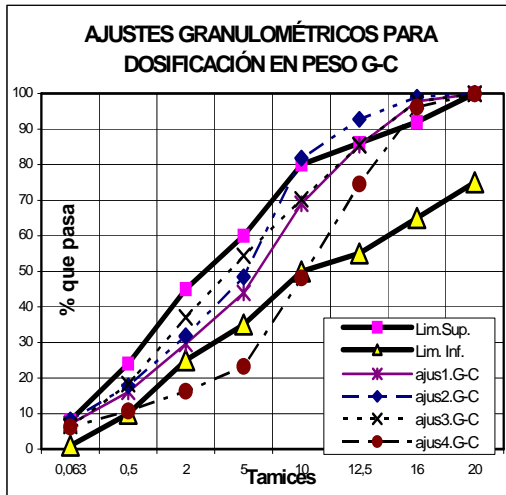
Tamiz (mm)	AN2/05 0-5	Ec 5-12	Ec 12-20	cem C	G-3/2002		4% cem 0,04	Ec12-20 0,2	Ec5-12 0,45	AN2-0/5 0,31	ajuste 2 1
					Lim.Sup	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	20	45	31	100
16	100	100	95	100	92	65	4	19	45	31	99
12,5	100	100	64	100	86	55	4	13	45	31	93
10	100	92	28	100	80	50	4	6	41	31	82
5	98	29	6	100	60	35	4	1	13	30	48
2	65	15	4	100	45	25	4	1	7	20	32
0,5	26	11	3	100	24	10	4	1	5	8	18
0,063	3	7	1	100	8	1	4	0	3	1	8

Ajuste: GC3 (CEMENTO = 4% ; Ec12-20 = 40% ; Ec5-12 = 10% ; AN2-0/5= 46%)

Tamiz (mm)	AN2/05 0-5	Ec 5-12	Ec 12-20	cem C	G-3/2002		4% cem 0,04	Ec12-20 0,4	Ec5-12 0,1	AN2-0/5 0,46	ajuste 3 1
					Lim.Sup	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	40	10	46	100
16	100	100	95	100	92	65	4	38	10	46	98
12,5	100	100	64	100	86	55	4	25	10	46	85
10	100	92	28	100	80	50	4	11	9	46	70
5	98	29	6	100	60	35	4	2	3	45	54
2	65	15	4	100	45	25	4	2	2	30	37
0,5	26	11	3	100	24	10	4	1	1	12	18
0,063	3	7	1	100	8	1	4	0	1	1	7

Ajuste: GC4 (CEMENTO = 4% ; Ec12-20 = 70% ; Ec5-12 = 15% ; AN2-0/5= 11%)

Tamiz (mm)	AN2/05 0-5	Ec 5-12	Ec 12-20	cem C	G-3/2002		4% cem 0,04	Ec12-20 0,7	Ec5-12 0,15	AN2-0/5 0,11	ajuste4 1
					Lim.Sup	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	70	15	11	100
16	100	100	95	100	92	65	4	66	15	11	96
12,5	100	100	64	100	86	55	4	45	15	11	75
10	100	92	28	100	80	50	4	19	14	11	48
5	98	29	6	100	60	35	4	4	4	11	23
2	65	15	4	100	45	25	4	3	2	7	16
0,5	26	11	3	100	24	10	4	2	2	3	11
0,063	3	7	1	100	8	1	4	1	1	0	6



**METODO DE DOSIFICACION DE LA GRAVA CEMENTO COMPACTADA
EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL
AJUSTES GRANULOMETRICOS**

Ajuste: GC5 (CEMENTO = 4% ; Ec12-20 = 35% ; Ec5-12 = 45% ; AN2-0/5= 16%)

Tamiz (mm)	AN2-0/5 0-5	Ec 5-12	Ec 12-20	cem C	PG-3/2002		4% cem 0,04	Ec12-20 0,35	Ec5-12 0,45	AN2-0/5 0,16	ajus5 1
					Lim.Sup.	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	35	45	16	100
16	100	100	95	100	92	65	4	33	45	16	98
12,5	100	100	64	100	86	55	4	22	45	16	87
10	100	92	28	100	80	50	4	10	41	16	71
5	98	29	6	100	60	35	4	2	13	16	35
2	65	15	4	100	45	25	4	1	7	10	23
0,5	26	11	3	100	24	10	4	1	5	4	14
0,063	3	7	1	100	8	1	4	0	3	0	8

Ajuste: GC6 (CEMENTO = 4% ; Ec12-20 = 45% ; Ec 5-12 = 16% ; AN2-0/5= 35%)

Tamiz (mm)	AN2-0/5 0-5	Ec 5-12	Ec 12-20	cem C	PG-3/2002		4% cem 0,04	Ec12-20 0,45	Ec5-12 0,16	AN2-0/5 0,35	ajus6 1
					Lim.Sup.	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	45	16	35	100
16	100	100	95	100	92	65	4	43	16	35	98
12,5	100	100	64	100	86	55	4	29	16	35	84
10	100	92	28	100	80	50	4	12	15	35	66
5	98	29	6	100	60	35	4	3	5	34	46
2	65	15	4	100	45	25	4	2	2	23	31
0,5	26	11	3	100	24	10	4	1	2	9	16
0,063	3	7	1	100	8	1	4	1	1	1	7

Ajuste: GC7 (CEMENTO = 4% ; Ec12-20 = 40% ; Ec5-12 = 30% ; AN2-0/5= 26%)

Tamiz (mm)	AN2-0/5 0-5	Ec 5-12	Ec 12-20	cem C	PG-3/2002		4% cem 0,04	Ec12-20 0,4	Ec5-12 0,3	AN2-0/5 0,26	ajus7 1
					Lim.Sup.	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	40	30	26	100
16	100	100	95	100	92	65	4	38	30	26	98
12,5	100	100	64	100	86	55	4	25	30	26	85
10	100	92	28	100	80	50	4	11	28	26	69
5	98	29	6	100	60	35	4	2	9	25	40
2	65	15	4	100	45	25	4	2	5	17	27
0,5	26	11	3	100	24	10	4	1	3	7	15
0,063	3	7	1	100	8	1	4	0	2	1	7

Ajuste: GC8 (CEMENTO = 4% ; Ec12-20 = 40% ; Ec5-12 = 15% ; AN2-0/5= 41%)

Tamiz (mm)	AN2-0/5 0-5	Ec 5-12	Ec 12-20	cem	PG-3/2002		4% cem 0,04	Ec12-20 0,4	Ec5-12 0,15	AN2-0/5 0,41	ajus8 1
					Lim.Sup.	Lim. Inf.					
20	100	100	100	100	100	75	4	40	15	41	100
16	100	100	98	100	92	65	4	39	15	41	99
12,5	100	100	74	100	86	55	4	30	15	41	90
10	100	94	35	100	80	50	4	14	14	41	73
5	97	8	4	100	60	35	4	2	1	40	47
2	72	7	3	100	45	25	4	1	1	30	36
0,5	34	6	3	100	24	10	4	1	1	14	20
0,063	4	3	1	100	8	1	4	0	0	2	7

DOSIFICACION DE LA GRAVA CEMENTO PARA LA CARRETERA

METODO DE DOSIFICACION DE LA GRAVA CEMENTO COMPACTADA EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL AJUSTES GRANULOMETRICOS

RESUMEN DE TANTEOS PARA AJUSTAR LA GRANULOMETRIA DE LOS ARIDOS A LOS LIMITES DEL PG-3/2002

Tamiz (mm)	PG-3/2002: G-C		ajus1	ajus2	ajus3	ajus4	ajus5	ajus6	ajus7	ajus8
	Lim.Sup.	Lim.Inf.	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C	G-C
20	100	75	100	100	100	100	100	100	100	100
16	92	65	98	99	98	96	98	98	98	99
12,5	86	55	85	93	85	75	87	84	85	90
10	80	50	69	82	70	48	71	66	69	73
5	60	35	44	48	54	23	35	46	40	47
2	45	25	30	32	37	16	23	31	27	36
0,5	24	10	16	18	18	11	14	16	15	20
0,063	8	1	7	8	7	6	8	7	7	7

Ajuste: GC8 (CEMENTO = 4% ; Ec12-20 = 40% ; Ec5-12 = 15% ; AN2-0/5= 41%)

Tamiz (mm)	AN2-0/5	Ec	Ec	cem C	PG-3/2002		4% cem	Ec12-20	Ec 5-12	AN2-0/5	ajus8
	0-5	5-12	12-20		Lim.Sup	Lim. Inf.	0,04	0,4	0,15	0,41	1
20	100	100	100	100	100	75	4	40	15	41	100
16	100	100	98	100	92	65	4	39	15	41	99
12,5	100	100	74	100	86	55	4	30	15	41	90
10	100	94	35	100	80	50	4	14	14	41	73
5	97	8	4	100	60	35	4	2	1	40	47
2	72	7	3	100	45	25	4	1	1	30	36
0,5	34	6	3	100	24	10	4	1	1	14	20
0,063	4	3	1	100	8	1	4	0	0	2	7

ALTERNATIVA 1: G-CEc

METODO DE DOSIFICACION DE LA GRAVA CEMENTO COMPACTADA EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL AJUSTES GRANULOMETRICO SELECCIONADO.

Ajuste 8 G-C

GCEc (CEMENTO = 4% ; Ec12-20 = 40% ; Ec5-12% = 15% ; AN2-0/5= 41%)

Tamiz (mm)	4% cem	Ec12-20	Ec 5-12	An2-0/5	ajus8
	0,04	0,4	0,15	0,41	GC
20	4	40	15	41	100
16	4	39	15	41	99
12,5	4	30	15	41	90
10	4	14	14	41	73
5	4	2	1	40	47
2	4	1	1	30	36
0,5	4	1	1	14	20
0,063	4	0	0	2	7

A.3.2.- Diferentes tanteos de dosificación para el hormigón compactado de la carretera.

En este anexo se indican los tanteos para el hormigón compactado de la carretera, donde se incluyen los 8 ajustes realizados para llegar a la determinar la dosificación seleccionada, la cual se aplicó en el tramo experimental de carretera.

METODO DE DOSIFICACION DEL HORMIGON COMPACTADO PARA LA CARRETERA

METODO DE DOSIFICACION DEL HORMIGON COMPACTADO EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL AJUSTES GRANULOMETRICOS

Ajuste: H.C.1 (CEMENTO =14% ; Ec12-20 = 40% ; Ec5-12 = 25% ; AN2-0/5 = 21%)

Tamiz (mm)	AN2-0/5	Ec	EC	cem	PG-3/2002:HC		14% cem	Ec12-20	Ec5-12	AN2-0/5	ajuste1
	0-5	5-12	12-20	C	Lim. Sup.	Lim.Inf.	0,14	0,4	0,25	0,21	1
20	100	100	100	100	100	85	14	40	25	21	100
16	100	100	95	100	100	75	14	40	25	21	100
12,5	100	100	64	100	89	65	14	40	25	21	100
10	100	92	28	100	83	60	14	40	23	21	98
5	98	29	6	100	63	42	14	39	7	21	81
2	65	15	4	100	47	30	14	26	4	14	57
0,5	26	11	3	100	27	16	14	10	3	5	33
0,063	3	7	1	100	19	9	14	1	2	1	18

Ajuste: H.C.2 (CEMENTO =14% ; Ec12-20 = 25% ; Ec5-12 = 35% ; AN2-0/5 = 26%)

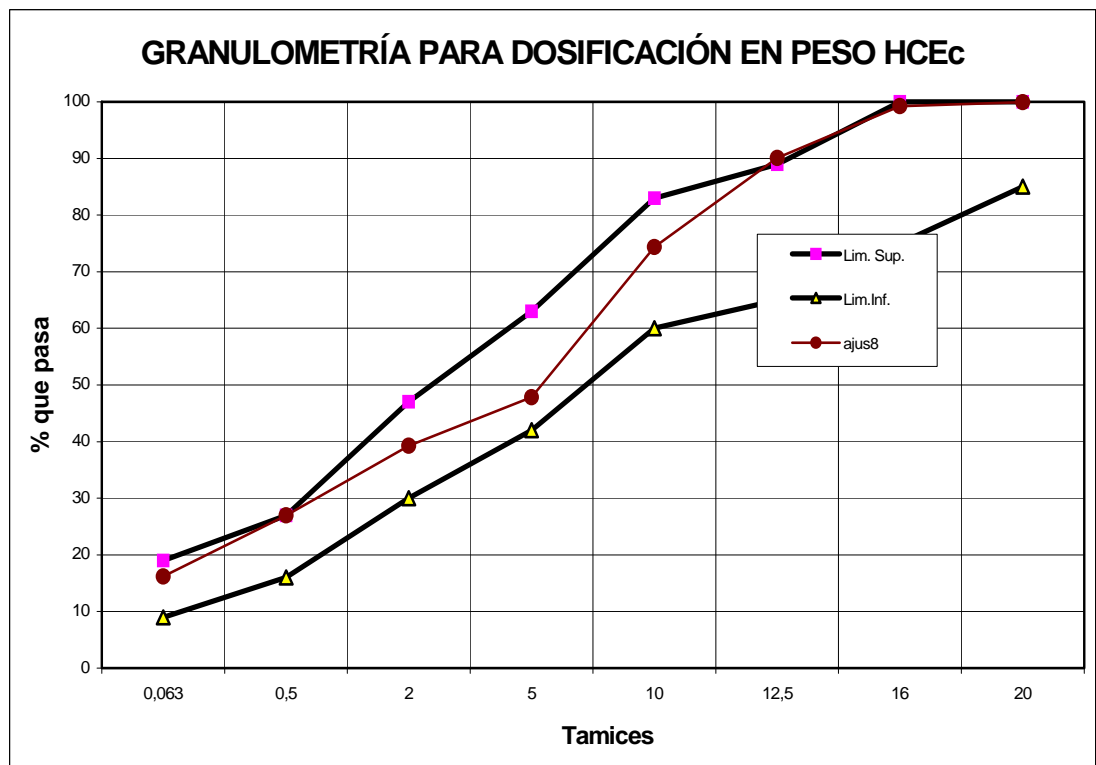
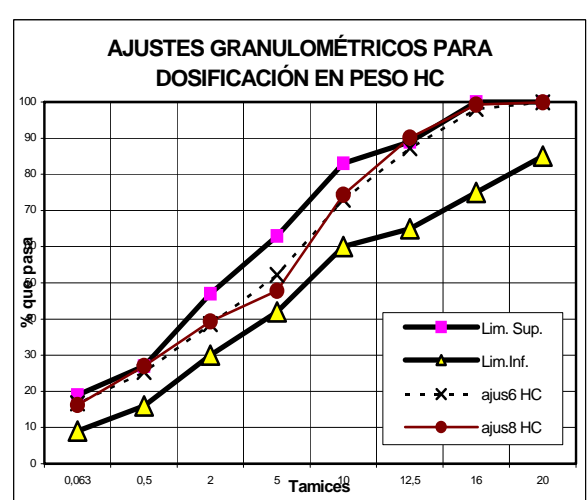
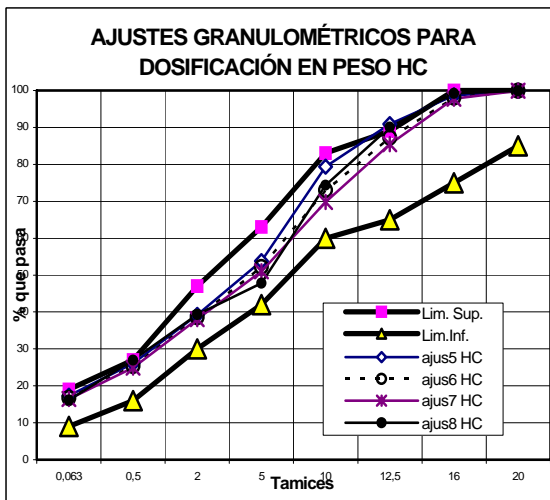
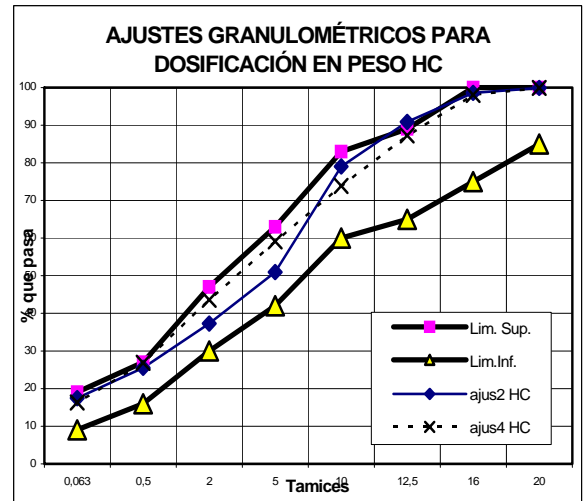
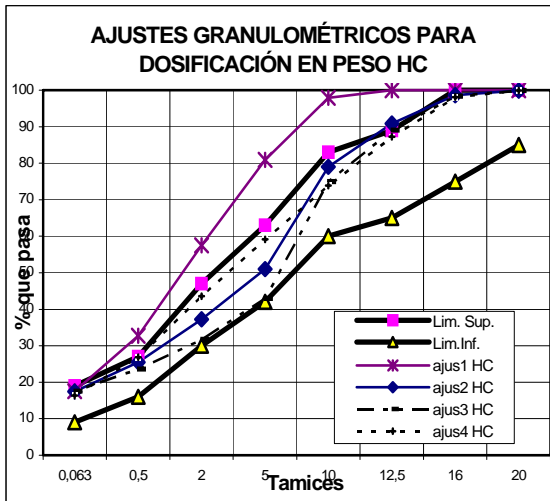
Tamiz (mm)	AN2-0/5	Ec	EC	cem	PG-3/2002:HC		14% cem	Ec12-20	Ec5-12	AN2-0/5	ajuste2
	0-5	5-12	12-20	C	Lim. Sup.	Lim.Inf.	0,14	0,25	0,35	0,26	1
20	100	100	100	100	100	85	14	25	35	26	100
16	100	100	95	100	100	75	14	24	35	26	99
12,5	100	100	64	100	89	65	14	16	35	26	91
10	100	92	28	100	83	60	14	7	32	26	79
5	98	29	6	100	63	42	14	2	10	25	51
2	65	15	4	100	47	30	14	1	5	17	37
0,5	26	11	3	100	27	16	14	1	4	7	26
0,063	3	7	1	100	19	9	14	0	2	1	17

Ajuste: H.C.3 (CEMENTO =14% ; Ec12-20 = 30% ; Ec5-12 = 40% ; AN2-0/5= 16%)

Tamiz (mm)	AN2-0/5	Ec	EC	cem	PG-3/2002:HC		14% cem	Ec12-20	Ec5-12	AN2-0/5	ajuste3
	0-5	5-12	12-20	C	Lim. Sup.	Lim.Inf.	0,14	0,3	0,4	0,16	1
20	100	100	100	100	100	85	14	30	40	16	100
16	100	100	95	100	100	75	14	28	40	16	98
12,5	100	100	64	100	89	65	14	19	40	16	89
10	100	92	28	100	83	60	14	8	37	16	75
5	98	29	6	100	63	42	14	2	11	16	43
2	65	15	4	100	47	30	14	1	6	10	32
0,5	26	11	3	100	27	16	14	1	5	4	24
0,063	3	7	1	100	19	9	14	0	3	0	18

Ajuste: H.C.4 (CEMENTO =14% ; Ec12-20 = 35% ; Ec5-12 = 10% ; AN2-0/5= 41%)

Tamiz (mm)	AN2-0/5	Ec	EC	cem	PG-3/2002:HC		14% cem	Ec12-20	Ec5-12	AN2-0/5	ajuste4
	0-5	5-12	12-20	C	Lim. Sup.	Lim.Inf.	0,14	0,35	0,1	0,41	1
20	100	100	100	100	100	85	14	35	10	41	100
16	100	100	95	100	100	75	14	33	10	41	98
12,5	100	100	64	100	89	65	14	22	10	41	87
10	100	92	28	100	83	60	14	10	9	41	74
5	98	29	6	100	63	42	14	2	3	40	59
2	65	15	4	100	47	30	14	1	2	27	44
0,5	26	11	3	100	27	16	14	1	1	11	27
0,063	3	7	1	100	19	9	14	0	1	1	16



**METODO DE DOSIFICACION DEL HORMIGON COMPACTADO
EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL
AJUSTES GRANULOMETRICOS**

Ajuste:H.C.5 (CEMENTO =14% ; Ec12-20 = 25% ; Ec5-12 = 31% ; AN2-0/5= 30%)

Tamiz (mm)	AN2-0/5	Ec	Ec	cem C	PG-3/2002: HC		14% cem	Ec12-20	Ec5-12	AN2-0/5	ajuste5
	0-5	5-12	12-20		Lim. Sup.	Lim.Inf.	0,14	0,25	0,31	0,3	
20	100	100	100	100	100	85	14	25	31	30	100
16	100	100	95	100	100	75	14	24	31	30	99
12,5	100	100	64	100	89	65	14	16	31	30	91
10	100	92	28	100	83	60	14	7	28	30	79
5	98	29	6	100	63	42	14	2	9	29	54
2	65	15	4	100	47	30	14	1	5	20	39
0,5	26	11	3	100	27	16	14	1	4	8	26
0,063	3	7	1	100	19	9	14	0	2	1	17

Ajuste: H.C.6 (CEMENTO =14% ; Ec12-20 = 35% ; Ec5-12 = 20% ; AN2-0/5= 31%)

Tamiz (mm)	AN2-0/5	Ec	Ec	cem C	PG-3/2002: HC		14% cem	Ec12-20	Ec5-12	AN2-0/5	ajuste6
	0-5	5-12	12-20		Lim. Sup.	Lim.Inf.	0,14	0,35	0,2	0,31	
20	100	100	100	100	100	85	14	35	20	31	100
16	100	100	95	100	100	75	14	33	20	31	98
12,5	100	100	64	100	89	65	14	22	20	31	87
10	100	92	28	100	83	60	14	10	18	31	73
5	98	29	6	100	63	42	14	2	6	30	52
2	65	15	4	100	47	30	14	1	3	20	39
0,5	26	11	3	100	27	16	14	1	2	8	25
0,063	3	7	1	100	19	9	14	0	1	1	17

Ajuste: H.C.7 (CEMENTO =14% ; Ec12-20 = 40% ; Ec5-12 = 15% ; AN-0/5= 31%)

Tamiz (mm)	AN2-0/5	Ec	Ec	cem C	PG-3/2002: HC		14% cem	Ec12-20	Ec5-12	AN2-0/5	ajuste7
	0-5	5-12	12-20		Lim. Sup.	Lim.Inf.	0,14	0,4	0,15	0,31	
20	100	100	100	100	100	85	14	40	15	31	100
16	100	100	95	100	100	75	14	38	15	31	98
12,5	100	100	64	100	89	65	14	25	15	31	85
10	100	92	28	100	83	60	14	11	14	31	70
5	98	29	6	100	63	42	14	2	4	30	51
2	65	15	4	100	47	30	14	2	2	20	38
0,5	26	11	3	100	27	16	14	1	2	8	25
0,063	3	7	1	100	19	9	14	0	1	1	16

Ajuste: H.C.8 (CEMENTO =14% ; Ec12-20 = 38% ; Ec5-12 = 16% ; AN2-0/5= 32%)

Tamiz (mm)	AN2-0/5	Ec	Ec	cem C	PG-3/2002: HC		14% cem	Ec12-20	Ec5-12	AN2-0/5	ajuste8
	0-5	5-12	12-20		Lim. Sup.	Lim.Inf.	0,14	0,38	0,16	0,32	
20	100	100	100	100	100	85	14	38	16	32	100
16	100	100	98	100	100	75	14	37	16	32	99
12,5	100	100	74	100	89	65	14	28	16	32	90
10	100	94	35	100	83	60	14	13	15	32	74
5	97	8	4	100	63	42	14	2	1	31	48
2	72	7	3	100	47	30	14	1	1	23	39
0,5	34	6	3	100	27	16	14	1	1	11	27
0,063	4	3	1	100	19	9	14	0	0	1	16

METODO DE DOSIFICACION DEL HORMIGON COMPACTADO PARA LA CARRETERA

METODO DE DOSIFICACION DEL HORMIGON COMPACTADO EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL AJUSTES GRANULOMETRICOS

Resumen

Tamiz (mm)	PG-3/2002:HC		ajus1	ajus2	ajus3	ajus4	ajus5	ajus6	ajus7	ajus8
	Lim.Sup.	Lim.Inf.	HC	HC	HC	HC	HC	HC	HC	HC
20	100	85	100	100	100	100	100	100	100	100
16	100	75	100	99	98	98	99	98	98	99
12,5	89	65	100	91	89	87	91	87	85	90
10	83	60	98	79	75	74	79	73	70	74
5	63	42	81	51	43	59	54	52	51	48
2	47	30	57	37	32	44	39	39	38	39
0,5	27	16	33	26	24	27	26	25	25	27
0,063	19	9	18	17	18	16	17	17	16	16

Ajuste: H.C.8 (CEMENTO =14% ; Ec12-20 = 38% ; Ec5-12 = 16% ; AN2-0/5= 32%)

Tamiz (mm)	AN2-0/5	Ec	Ec	cem	PG-3/2002: HC		14% cem	Ec12-20	Ec5-12	AN2-0/5	ajus8
	0-5	5-12	12-20	C	Lim. Sup.	Lim.Inf.	0,14	0,38	0,16	0,32	1
20	100	100	100	100	100	85	14	38	16	32	100
16	100	100	98	100	100	75	14	37	16	32	99
12,5	100	100	74	100	89	65	14	28	16	32	90
10	100	94	35	100	83	60	14	13	15	32	74
5	97	8	4	100	63	42	14	2	1	31	48
2	72	7	3	100	47	30	14	1	1	23	39
0,5	34	6	3	100	27	16	14	1	1	11	27
0,063	4	3	1	100	19	9	14	0	0	1	16

ALTERNATIVA 1 HCEc

METODO DE DOSIFICACION DEL HORMIGÓN EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DEL MATERIAL AJUSTES GRANULOMETRICO SELECCIONADO.

Ajuste 8 H.C.

Ajuste: H.C. (CEMENTO = 14% ; Ec12-20 = 38% ; Ec5-12% = 16% ; AN2-0/5= 32%)

Tamiz (mm)	14% cem	Ec12-20	Ec 5-12	AN2-0/5	ajus8.H.C.
	0,14	0,38	0,16	0,32	HC
20	14	38	16	32	100
16	14	36	16	32	99
12,5	14	24	16	32	90
10	14	10	15	32	74
5	14	2	5	31	48
2	14	2	2	21	39
0,5	14	1	2	8	27
0,063	14	0	1	1	16