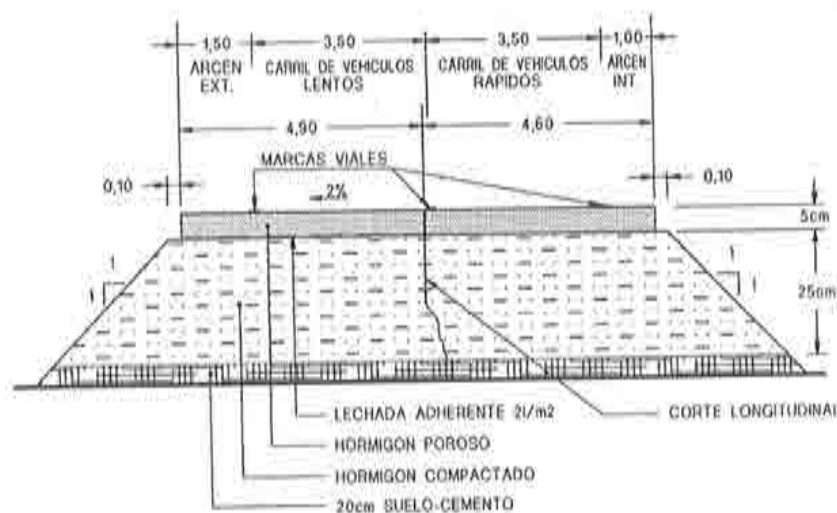


# Caracterización experimental y numérica de hormigones porosos modificados con polímeros

A. Aguado  
A. Josa  
M.A. Pindado



# **Caracterización experimental y numérica de hormigones porosos modificados con polímeros**

**A. Aguado  
A. Josa  
M.A. Pindado**

*Trabajo integrado en el proyecto Brite-Euram BE-3415  
financiado por el IECA*

**Monografía CIMNE Nº 37, Enero 1997**

**Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería**  
Gran Capitán s/n, 08034 Barcelona, Spain

Diseño de la cubierta: Jordi Pallí

Primera Edición, Enero 1997

@ Los autores

Edita:

Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería

Edificio C1, Campus Norte UPC

Gran Capitán, s/n

08034 Barcelona, España

ISBN: 84-87867-91-X

Deposito Legal: B-8145-97

## Prólogo

*El Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), con objeto de desarrollar nuevas alternativas para el empleo del cemento, se planteó hace varios años la conveniencia de estudiar el hormigón poroso en capas de rodadura de firmes como alternativa a las mezclas abiertas de tipo bituminoso.*

*Por otro lado, en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña existía un grupo de investigación, dirigido por el Prof. Antonio Aguado, que desde el año 1983 venía trabajando en el campo del hormigón poroso, desde distintos puntos de vista y en diferentes aplicaciones.*

*En la primavera de 1989, como consecuencia de una reunión en la Dirección General de Carreteras de la Generalitat de Cataluña, se consideró oportuno el establecimiento de un convenio de investigación entre el IECA y el equipo de investigación citado con el fin de abordar la viabilidad de la aplicación del hormigón poroso en capas de rodadura de firmes. Este convenio quedó registrado en el Centro de Transferencia de Tecnología de la U.P.C. con el número CO-855.*

*Pocos meses después, ambas partes (IECA y U.P.C.) se integraron en una propuesta de un proyecto europeo titulado "Optimization of the surface properties of concrete roads in accordance with environmental acceptance and traffic safety", el cual fue aprobado en 1990 con la referencia BRITE-EURAM BE-3415. Dicho proyecto ha tenido una duración de 42 meses, y finalizó en junio de 1994. Al respecto los autores desean agradecer al IECA toda su colaboración y, en particular, su aceptación de la publicación de este trabajo.*

*En el citado proyecto han participado, por parte española, equipos de las siguientes empresas e instituciones: DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES, S.A., GEOCISA, INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES y UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA. Asimismo, han intervenido otras entidades holandesas y alemanas.*



*En el contexto del citado proyecto europeo, los trabajos se han dividido entre los distintos equipos participantes. En este informe se presentan los trabajos realizados fundamentalmente por el equipo de trabajo de la U.P.C. Dado el carácter finalista de este documento, la presentación se realiza de una forma global, para dar una unidad al mismo, y, simultáneamente, descriptiva de la labor realizada y de las opciones existentes con este material. En los informes específicos que se han ido presentando a lo largo del desarrollo del trabajo puede encontrarse una información más detallada. Dichos informes y trabajos se referencian en el capítulo 8 de este documento.*

*Los trabajos realizados por la U.P.C. se han realizado tanto en el contexto del material, como de las especificaciones de la realización en obra, o bien, por otro lado, desde los puntos de vista más experimentales a las vertientes más numéricas y teóricas del tema. Algunos de los logros más significativos del trabajo se han presentado a la comunidad nacional e internacional en distintos artículos y comunicaciones que se referencian, asimismo, en el capítulo 8.*

*En el desarrollo del proyecto se han realizado distintos tramos experimentales con hormigón poroso modificado con polímeros como capa de rodadura. En el caso de España, DYCSA ejecutó un tramo experimental en unos ramales de enlace de la M-50 de Madrid, dentro del tramo denominado Arroyo del Culebro. Este tramo ha constituido una experiencia pionera en España para este tipo de material y aplicación.*

*Este documento pretende realizar una revisión completa de la experiencia obtenida tanto en gabinete como en obra, mostrando las conclusiones de las mismas. Estas, como se podrá observar, fueron muy significativas tanto por su nivel científico y técnico como por su cantidad.*

*Un trabajo de estas características no es labor de una persona aislada sino de un equipo de técnicos que han participado tanto en el desarrollo del proyecto como en los trabajos anteriores, que en conjunto han permitido llegar al nivel hoy en día alcanzado. Dado que, asimismo, con este documento se pretende cerrar una etapa de trabajo, es necesario recordar y agradecer aquí a aquellos que, por parte de la U.P.C., lo han hecho posible. Entre ellos está la gran contribución y experiencia profesional de J.J. Rosell, los profesores A. Vives, J. Dolz y M. Gómez; los tesinandos A. Tortajada, J. Armengou y J.J. Oliva; y los técnicos de laboratorio M.A. Martín y C. Hurtado.*

*Evidentemente, siempre quedarán en el anonimato distintas personas y entidades que con su contribución también han hecho posible tanto los estudios en laboratorio como las realizaciones de obra. A todos, incluido el esforzado lector de este documento, que ayudará a divulgar estas experiencias, muchas gracias.*

*Barcelona, Enero de 1997*

*Antonio Aguado*

*Alejandro Josa*

*Miguel Angel Pindado*

# INDICE

<b>Prólogo</b>	v
<b>CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN</b>	2
1.1.- ANTECEDENTES	3
1.2.- EL HORMIGÓN POROSO EN LOS FIRMES DE CARRETERAS	4
1.3.- MARCO DEL TRABAJO Y OBJETO DEL DOCUMENTO	10
1.4.- METODOLOGÍA	11
<b>CAPITULO 2: MATERIALES COMPONENTES Y ESTUDIO DE DOSIFICACIONES</b>	13
2.1.- INTRODUCCIÓN	13
2.2.- INFLUENCIA DE LA ESTRUCTURA GRANULAR Y DE LA NATURALEZA DEL POLÍMERO MODIFICANTE	14
2.2.1.- Objeto del estudio	14
2.2.2.- Materiales utilizados	15
2.2.3.- Dosificaciones y procedimientos de ensayo	17
2.2.4.- Resultados obtenidos	19
2.2.5.- Conclusiones	28
2.3.- DOSIFICACIONES ÓPTIMAS	28

<b>CAPITULO 3: ACTUACIONES RELATIVAS AL TRAMO EXPERIMENTAL DEL CULEBRO</b>	<b>37</b>
3.1.- INTRODUCCIÓN	37
3.2.- ESTUDIO Nº 1	38
3.2.1.- Objeto del estudio	38
3.2.2.- Materiales utilizados	39
3.2.2.- Dosificaciones	40
3.2.3.- Tipos de series fabricadas	41
3.2.4.- Procedimientos de ensayo y propiedades estudiadas	41
3.2.5.- Resultados obtenidos y análisis de los mismos	43
3.3.- ESTUDIO Nº 2	49
3.3.1.- Objeto del estudio	49
3.3.2.- Dosificaciones	49
3.3.3.- Resultados obtenidos y análisis de los mismos	51
3.4.- ESTUDIO Nº 3	54
3.4.1.- Objeto	54
3.4.2.- Resultados obtenidos y análisis de los mismos	54
3.5.- ESTUDIO Nº 4	55
3.5.1.- Objeto del estudio	55
3.5.2.- Materiales utilizados	55
3.5.3.- Dosificaciones	56
3.5.4.- Resultados obtenidos	56
3.6.- ESTUDIO Nº 5	59
3.6.1.- Objetivo de los trabajos	59
3.6.2.- Dosificación del tramo experimental del Culebro	59
3.6.3.- Resultados correspondientes a probetas testigos	60
3.6.4.- Resultados correspondientes a probetas moldeadas	61
3.6.4.1.- Caracterización mecánica y física	61
3.6.4.2.- Caracterización térmica	64
<b>CAPITULO 4: CONSIDERACIONES SOBRE EJECUCIÓN. TRAMO EXPERIMENTAL DEL CULEBRO</b>	<b>69</b>
4.1.- INTRODUCCIÓN	69
4.2.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA EJECUCIÓN	70

4.2.1.- Condiciones de la central	70
4.2.2.- Transporte	71
4.2.3.- Extendido y compactación	72
4.2.4.- Curado y conservación	73
4.3.- TRAMO EXPERIMENTAL DEL CULEBRO	74
4.3.1.- Localización y descripción del tramo experimental	74
4.3.2.- Materiales y dosificación empleada	74
4.3.3.- Tramo de prueba	76
4.3.4.- Planificación y esquema de trabajo	76
4.3.5.- Equipos empleados	78
4.3.6.- Ejecución del hormigón poroso	78
4.3.7.- Control de calidad	83
<b>CAPITULO 5: COMPORTAMIENTO A FATIGA</b>	<b>88</b>
5.1.- INTRODUCCIÓN	88
5.2.- PLANTEAMIENTO GENERAL DE LOS ENSAYOS	89
5.3.- DOSIFICACIONES DE HORMIGÓN POROSO	91
5.3.1.- Materiales	91
5.3.2.- Dosificaciones	91
5.3.3.- Fabricación y curado	92
5.4.- PROGRAMA DE ENSAYOS	93
5.5.- RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS	94
5.5.1.- Resultados ensayos	94
5.5.2.- Expresiones analíticas	98
5.6.- COMPORTAMIENTO TERMO-DEFORMACIONAL	103
<b>CAPITULO 6: CONSIDERACIONES DE DISEÑO</b>	<b>110</b>
6.1.- INTRODUCCIÓN	110
6.2.- PROPIEDADES REQUERIDAS Y PARÁMETROS QUE INCIDEN	112
6.2.1.- Requisitos mecánicos	112
6.2.2.- Funcionalidad	113
6.2.3.- Durabilidad	114
6.2.4.- Estética	115
6.2.5.- Adecuación ambiental	116

6.2.6.- Aspectos económicos	117
6.3.- ANÁLISIS CONJUNTO	117
<b>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES</b>	<b>112</b>
7.1.- CONCLUSIONES GENERALES	112
7.2.- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS	114
7.3.- RECOMENDACIONES	116
<b>CAPITULO 8: BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>118</b>
8.1.- REFERENCIAS EXTERNAS CITADAS	118
8.2.- DOCUMENTACIÓN PROPIA GENERADA EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO BE-3415-89	120
8.3.- DOCUMENTACIÓN PROPIA GENERADA POR EL EQUIPO DE TRABAJO DE LA U.P.C. CON ANTERIORIDAD AL PROYECTO BE-3415-89	123
<b>ANEJO 1: ESTUDIO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA JUNTA DE UNIÓN ENTRE HORMIGONES</b>	<b>125</b>
A1.1.- RAZÓN DE SER	125
A1.2.- ESTUDIO NUMÉRICO	127
A1.3.- INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES	130
<b>ANEJO 2: PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO</b>	<b>133</b>

## Prólogo

*El Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), con objeto de desarrollar nuevas alternativas para el empleo del cemento, se planteó hace varios años la conveniencia de estudiar el hormigón poroso en capas de rodadura de firmes como alternativa a las mezclas abiertas de tipo bituminoso.*

*Por otro lado, en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña existía un grupo de investigación, dirigido por el Prof. Antonio Aguado, que desde el año 1983 venía trabajando en el campo del hormigón poroso, desde distintos puntos de vista y en diferentes aplicaciones.*

*En la primavera de 1989, como consecuencia de una reunión en la Dirección General de Carreteras de la Generalitat de Cataluña, se consideró oportuno el establecimiento de un convenio de investigación entre el IECA y el equipo de investigación citado con el fin de abordar la viabilidad de la aplicación del hormigón poroso en capas de rodadura de firmes. Este convenio quedó registrado en el Centro de Transferencia de Tecnología de la U.P.C. con el número CO-855.*

*Pocos meses después, ambas partes (IECA y U.P.C.) se integraron en una propuesta de un proyecto europeo titulado "Optimization of the surface properties of concrete roads in accordance with environmental acceptance and traffic safety", el cual fue aprobado en 1990 con la referencia BRITE-EURAM BE-3415. Dicho proyecto ha tenido una duración de 42 meses, y finalizó en junio de 1994.*

*En el citado proyecto han participado, por parte española, equipos de las siguientes empresas e instituciones: DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES, S.A., GEOCISA, INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES y UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA. Asimismo, han intervenido otras entidades holandesas y alemanas.*



*En el contexto del citado proyecto europeo, los trabajos se han dividido entre los distintos equipos participantes. En este informe se presentan los trabajos realizados fundamentalmente por el equipo de trabajo de la U.P.C. Dado el carácter finalista de este documento, la presentación se realiza de una forma global, para dar una unidad al mismo, y, simultáneamente, descriptiva de la labor realizada y de las opciones existentes con este material. En los informes específicos que se han ido presentando a lo largo del desarrollo del trabajo puede encontrarse una información más detallada. Dichos informes y trabajos se referencian en el capítulo 8 de este documento.*

*Los trabajos realizados por la U.P.C. se han realizado tanto en el contexto del material, como de las especificaciones de la realización en obra, o bien, por otro lado, desde los puntos de vista más experimentales a las vertientes más numéricas y teóricas del tema. Algunos de los logros más significativos del trabajo se han presentado a la comunidad nacional e internacional en distintos artículos y comunicaciones que se referencian, asimismo, en el capítulo 8.*

*En el desarrollo del proyecto se han realizado distintos tramos experimentales con hormigón poroso modificado con polímeros como capa de rodadura. En el caso de España, DYCSA ejecutó un tramo experimental en unos ramales de enlace de la M-50 de Madrid, dentro del tramo denominado Arroyo del Culebro. Este tramo ha constituido una experiencia pionera en España para este tipo de material y aplicación.*

*Este documento pretende realizar una revisión completa de la experiencia obtenida tanto en gabinete como en obra, mostrando las conclusiones de las mismas. Éstas, como se podrá observar, fueron muy significativas tanto por su nivel científico y técnico como por su cantidad.*

*Un trabajo de estas características no es labor de una persona aislada sino de un equipo de técnicos que han participado tanto en el desarrollo del proyecto como en los trabajos anteriores, que en conjunto han permitido llegar al nivel hoy en día alcanzado. Dado que, asimismo, con este documento se pretende cerrar una etapa de trabajo, es necesario recordar y agradecer aquí a aquellos que, por parte de la U.P.C., lo han hecho posible. Entre ellos está la gran contribución y experiencia profesional de J.J. Rosell, los profesores A. Vives, J. Dolz y M. Gómez; los tesinandos A. Tortajada, J. Armengou y J.J. Oliva; y los técnicos de laboratorio M.A. Martín y C. Hurtado.*

*Evidentemente, siempre quedarán en el anonimato distintas personas y entidades que con su contribución también han hecho posible tanto los estudios en laboratorio como las realizaciones de obra. A todos, incluido el esforzado lector de este documento, que ayudará a divulgar estas experiencias, muchas gracias.*

*Barcelona, Enero de 1995*

*Fdo: Antonio Aguado*

*Fdo: Alejandro Josa*

*Fdo: Miguel Ángel Pindado*

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1.- ANTECEDENTES<sup>1</sup>

El hormigón poroso es un material con los mismos componentes básicos que un hormigón convencional pero que se proyecta intencionalmente con un índice de poros muy superior al de un hormigón convencional. Este alto índice de poros proporciona una serie de características al hormigón (capacidad de drenaje, absorción de ruido y otras) que puede ser de gran interés en determinadas aplicaciones. La porosidad del mismo se consigue mediante una curva granulométrica discontinua en la que se disminuyen los áridos finos en relación a las curvas granulométricas usuales en hormigones convencionales. Esta porosidad es en su mayor parte accesible lo que la diferenciaría de la porosidad no accesible de un hormigón ligero con arcillas expandidas. Ambos hormigones tienen un peso específico del mismo orden (entre 1700 y 2000 Kg/m<sup>3</sup>).

A medida que a este hormigón poroso se le aumentan las exigencias requeridas es necesario, tal como se señala con posterioridad, variar o añadir otros componentes que den respuesta satisfactoria a dichas exigencias. Entre estos nuevos componentes está el humo de sílice (microsílice) o bien los polímeros (debiendo ser estos compatibles con el cemento y el agua). Esta última aportación daría lugar a los hormigones porosos modificados con polímeros, terminología ésta, adoptada en el presente trabajo.

---

<sup>1</sup> Este capítulo se basa, fundamentalmente, en los trabajos previos de Aguado et al. (1992) y Jofré (1993) citados en la bibliografía (Capítulo 8).



El hormigón poroso modificado con polímeros o sin modificar es objeto de un creciente interés tanto en el ámbito de la investigación como en el ámbito de las aplicaciones prácticas. Desde el punto de vista de investigación hay que resaltar el importante esfuerzo realizado por diferentes equipos a nivel nacional. Los autores de este documento tienen constancia de trabajos realizados en:

- Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Equipo de pavimentos rígidos. (Bollati, 1992).
- E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. Cátedra de Materiales. (Fernández Cánovas, 1992).
- E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Barcelona.

Los trabajos en esta última Escuela se han integrado desde hace más de una década en distintos proyectos de investigación nacionales e internacionales así como en distintas colaboraciones de asistencia técnica. Entre los proyectos de investigación están:

- Estudio del comportamiento hidráulico y resistente del hormigón poroso de cemento. Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica. MEC. CAICYT 2628/83.
- Estudio teórico y experimental del comportamiento a fatiga de hormigones empleados en firmes de carreteras. Dirección General de Investigación Científica y Técnica. DGICYT-PA 86-0195.
- Optimization of the surface properties of concrete roads in accordance with environmental acceptance and travel safety. BRITE-EURAM-3415. C.E.

Las aplicaciones del hormigón poroso se situarán, lógicamente en todos aquellos campos en que, por distintas causas, se requiera la existencia de elementos drenantes capaces de evacuar volúmenes importantes de agua en un plazo relativamente reducido de tiempo manteniendo, al mismo tiempo, unas determinadas condiciones resistentes. Dejando aparte las aplicaciones en carreteras, sobre las que se incide con posterioridad, una relación no exhaustiva de experiencias previas son: tubos de drenaje, muros de drenaje a fin de reducir las presiones en el trasdós de muros de fábrica, etc. En esta aplicación hay que destacar el muro de drenaje existente en el embalse de salvaguarda de la Central Nuclear de Asco; el cual es una experiencia pionera en España en este campo, (Aguado et al. 1986).

Aparte de las condiciones drenantes y resistentes, los hormigones porosos, por su textura abierta, resultan adecuados para absorber ruido. Por ello, estos hormigones están teniendo un creciente auge en carreteras, tanto en pantallas anti-ruido como en capas de rodadura. En esta aplicación, debida a los condicionantes del tráfico, las prestaciones que se le requieren a estos hormigones son superiores necesitándose el empleo de polímeros, microsílíce, etc. Ello da lugar a la necesidad del estudio de otras propiedades del material no contempladas en otras aplicaciones, por ejemplo, fatiga del hormigón. En todos los casos habrá que verificar que las propiedades del material se mantienen durante la vida útil de la estructura. El riesgo más común de reducción de la durabilidad, es la colmatación del hormigón, lo cual no sólo debe ser evitado, sino que debe analizarse la posibilidad de regeneración de la porosidad en el caso de que se produzca.

## 1.2.- EL HORMIGÓN POROSO EN LOS FIRMES DE CARRETERAS

El empleo del hormigón poroso en los firmes de carreteras puede obedecer a distintas razones que conducen a su utilización en distintas partes del mismo: **arcenes, bases y/o sub-bases, calzadas-embalse, capas de rodadura.**

Una de estas razones se deriva del hecho de que los firmes contruidos hasta hace unos años adolecían del defecto de que, al tener la base y los arcenes contruidos por materiales impermeables, no evacuaban el agua que penetraba dentro de la estructura, Jofré (1993). En los pavimentos rígidos, en los que las juntas constituyen una vía preferente de entrada del agua, esta imposibilidad de eliminación de la misma traía como resultado final una de las principales causas de deterioro de aquéllos sometidos a tráfico pesado: el escalonamiento de las juntas, provocado por la acumulación de finos procedentes de la abrasión de la capa de base o del arcén por el agua acumulada bajo las losas. Como consecuencia de ello se planteó la necesidad de disponer elementos drenantes que facilitasen la evacuación del agua infiltrada.

Otra de las razones de su empleo obedece a la creciente sensibilización de los usuarios, que exigen cada vez más carreteras con una superficie segura y al mismo tiempo silenciosa. Los materiales porosos son quizás los que mejor cumplen con estos requisitos; por una parte, al no acumularse agua encima de los mismos, se eliminan las posibilidades de **aquaplaning**, así como otros efectos molestos (salpicaduras, reflejo de los faros); y por otra parte, la estructura abierta de estos materiales favorece la absorción de las ondas sonoras, dando lugar a una rodadura menos ruidosa.

Una variante de los campos de aplicación citados se sitúa en lo que podríamos denominar pavimentos-embalse. Estos obedecen a que al ir aumentando progresivamente las superficies urbanizadas, los coeficientes de escorrentía de los terrenos que ocupan sufren un gran incremento con respecto a los que tenían antes de construirse sobre los mismos. En muchos casos, ello trae consigo el que las redes de saneamiento, que en principio eran capaces de evacuar sin problemas el agua que llegaba a las mismas, resulten al final insuficientes, pudiendo llegar a provocar inundaciones. En consecuencia, ha surgido la necesidad de utilizar calzadas con una cierta capacidad de embalse, realizando una laminación de forma que los caudales evacuados por la red sean similares a los que tenían con los primitivos coeficientes de escorrentía. En buena lógica, dichas calzadas tienen que estar contruidas en todo (o parte) por materiales porosos que permitan almacenar agua.

Las aplicaciones citadas reflejan la evolución seguida en este campo. Así, al principio, cuando el conocimiento era menor, menor era la responsabilidad estructural que se le daba (arcenes); mientras que a medida que el grado de conocimiento ha aumentado, las exigencias del material también han aumentado superando las condicionantes básicos de permeabilidad y resistencia. Existe toda una gama de materiales porosos que han sido utilizados en firmes de carreteras: materiales granulares sin finos, mezclas bituminosas drenantes y hormigones porosos. Mientras que los primeros prácticamente sólo se han utilizado en arcenes, las mezclas bituminosas drenantes han tenido su campo de aplicación privilegiado como superficies de rodadura, aunque también se han empleado en ocasiones en capas de base.

Por su parte los hormigones porosos se han empleado en todas las variantes enunciadas anteriormente: como elemento drenante en arcenes y base; como constituyente de un pavimento-embalse; y como capa de rodadura, tanto en zonas urbanas como en carreteras sometidas a tráfico pesado si bien en este caso en plan experimental. Para esta aplicación, en general se requiere el empleo de polímeros u otros materiales tanto por razones de resistencias mecánicas, resistencia al arrancamiento o durabilidad.

### Arcenes de firmes rígidos

Esta técnica, muy experimentada en Francia, (M.T.F, 1977), aprovecha las propiedades que presenta el hormigón poroso para evacuar con rapidez el agua que, tal como se ha dicho, puede acumularse en la zona situada entre el pavimento de hormigón, la base de grava cemento y el arcén (Ver fig. 1.1). Como es sabido el agua en dicha zona tiene una gran influencia en el deterioro de la losas por el posible bombeo de finos y descalce de las losas, sobre todo cuando éstas se disponen sin pasadores.

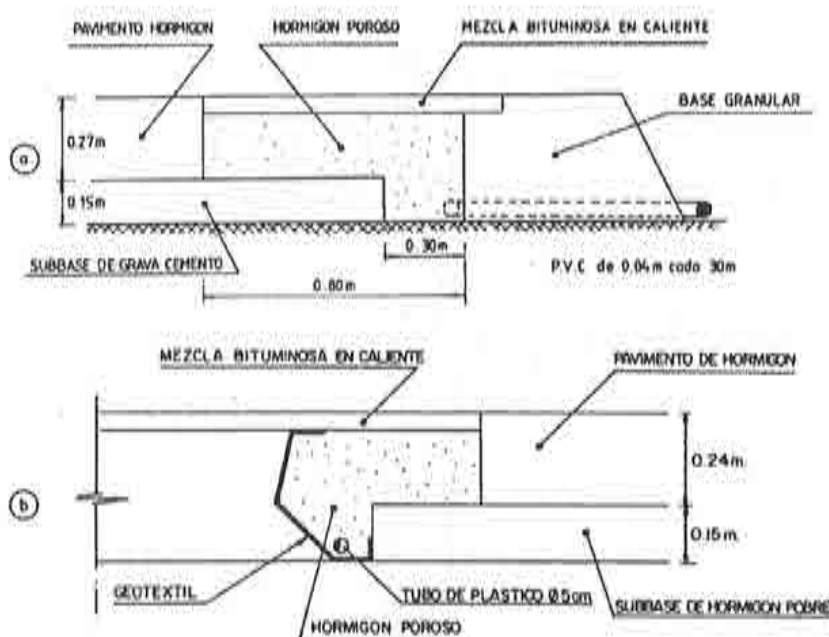


Figura 1.1.- Arcenes de firmes rígidos empleados en la variante de Despeñaperros (a) y en el tramo Jeresa-Ondara de la autopista del Mediterráneo (b).

Los hormigones porosos utilizados en arcenes son en realidad hormigones pobres porosos, con contenidos de cemento del orden de 150 a 160 kg/m<sup>3</sup>. La relación agua/cemento suele estar comprendida entre 0,5 y 0,6. La resistencia a compresión requerida a los 28 días es de unos 10 Mpa, valor con el que se tiene un cierto coeficiente de seguridad frente a una posible disminución de resistencias debidas a los ataques químicos, originados, por ejemplo, por la eventual presencia de elementos contaminantes en las aguas evacuadas.

A este respecto puede indicarse que cuanto menor sea el contenido de arena de estos hormigones, tanto mejores serán sus cualidades drenantes, y que en consecuencia, podría prescindirse de la misma. A través de las distintas experiencias realizada y recogidas en la literatura puede observarse que es preciso añadir una cierta cantidad de arena, entre 100 y 300 kg/m<sup>3</sup>, a fin de que los puentes de mortero entre los granos gruesos puedan resistir los ataques de las aguas puras. Desde este punto de vista de durabilidad, también es interesante, que el cemento tenga un cierto contenido de adiciones activas.

En España esta solución se ha utilizado, entre otros, en la variante de Despeñaperros (Cánovas, 1984) y en algunos tramos de la Autopista Tarragona-Valencia-Alicante. (Fernández Sánchez, 1987). En la citada figura 1.1 se muestra un esquema de estas soluciones.

### **Bases y/o subbases**

En esta solución, al hormigón poroso, aparte de la función drenante, se le requieren unas características mecánicas mínimas para ser capaz de absorber las tensiones originadas por el tráfico, sin producirse la rotura. Como capa de rodadura en este caso se puede emplear mezclas bituminosas porosas, tal como señalan (Raimbault et al., 1985), sobre distintas experiencias francesas o bien, el empleo de hormigón poroso. Así, si bien algunos catálogos de firme, como el del Estado de California (USA), admiten entre otras alternativas las de bases permeables tratadas con cemento, éstas sólo se han utilizado esporádicamente (Mathis, 1989). Su empleo aparece más justificado en el caso de superficies muy anchas, como las pistas de aeropuertos, en las que puede haber dificultades para que el agua infiltrada en la parte central de la misma alcance los elementos drenantes situados en los extremos. Este es el caso del empleo de hormigón poroso en las bases de los pavimentos de hormigón del aeropuerto de París (Lorin y Michel, 1983).

En las capas de base de carreteras, los contenidos de cemento deben ser algo superiores a los referenciados con anterioridad para la aplicación en arcenes. En España, en las recomendaciones de la Dirección General de Carreteras se indica un valor mínimo de 170 kg/m<sup>3</sup>, similar al prescrito en las especificaciones del Estado de California (USA). Ello viene motivado por los mayores requerimientos estructurales exigidos. En esta aplicación, los espesores de hormigón habitualmente utilizados oscilan entre 10 y 15 cm.

Para los hormigones porosos utilizados en bases drenantes de aeropuertos, las dosificaciones de cemento son similares o algo superiores a las empleadas en carreteras. Como ejemplo, puede citarse la solución adoptada en la prolongación de la pista nº 2 del aeropuerto Charles de Gaulle (París), Jofré (1993). En ella, la dotación de cemento del hormigón poroso fue de 200 kg/m<sup>3</sup>.

### **Calzadas-embalse**

Esta solución puede ser de gran interés en zonas urbanas (medianas, aparcamientos, etc.) especialmente en aquellos terrenos planos de difícil drenaje, lo cual puede ser muy útil en ciudades en crecimiento en las que no es posible aumentar las dimensiones de los conductos de alcantarillado para absorber los caudales adicionales procedentes de las nuevas



zonas desarrolladas. Éste fue el considerando utilizado para un estudio de soluciones, entre ellas, el hormigón poroso, para bases en distintos pavimentos de la Villa Olímpica de Barcelona. (Rosell et al. 1990). Estas capas porosas pueden servir de pequeño embalse regulador, laminando los grandes aguaceros. Hay que tener presente que la propia estructura porosa favorece la evaporación posterior del agua almacenada.

La experiencia francesa en este campo, que data de 1979, utiliza una estructura de firme compuesta por dos capas: una más superficial de unos 6 cm de mezcla bituminosa porosa y una capa inferior de 20 a 25 cm de hormigón pobre poroso con un contenido de cemento del orden de 200 kg/m<sup>3</sup> y tamaño máximo del árido de 16 ó 20 cm. Entre el hormigón poroso y la explanada de las capas inferiores del firme se coloca o no, una lámina de impermeabilización de plástico para evitar infiltraciones del agua, en función de las circunstancias específicas del pavimento y del terreno sobre el que se apoya.

### **Capa de rodadura**

En esta aplicación el hormigón poroso está sometido a la acción directa de las cargas de tráfico y las condiciones ambientales. Ahora bien, si estas últimas son extremas, por ejemplo, climas con heladas frecuentes, requerirán el empleo de sales de deshielo que pueden provocar problemas de durabilidad. En consecuencia, es fácil ver que en esta aplicación, los requisitos de proyecto serán más numerosos y exigentes que en las anteriores, añadiéndose a los requisitos mecánicos e hidráulicos ya señalados, otros requisitos tales como: resistencia al arrancamiento, absorción acústica, regularidad superficial, etc.

Para dar respuesta satisfactoria a estos requisitos puede ser necesario la adición de diferentes materiales que modifican la composición del hormigón poroso usual. Entre estos materiales se pueden citar el humo de sílice (microsílice) y los polímeros de distintas familias, lo cual significa un aumento de coste. Para limitar el mismo, suele acotarse el espesor de esta capa de rodadura exigiendo, en consecuencia la construcción en dos capas con una problemática asociada a la construcción y a la adherencia entre las mismas.

En el cumplimiento de los requisitos especificados para este tipo de aplicación, aparte del material y su composición, adquiere una gran importancia la puesta en obra, especialmente la compactación. Asimismo, puede ser determinante el espesor de la capa de rodadura, tanto para las características mecánicas como para las características de absorción acústica. En cualquier caso se debe tener muy presente que el nivel de los requisitos varía en función del tipo de carretera donde se utilice la capa de rodadura: así, evidentemente, no son iguales las características de resistencia mecánica ó de regularidad superficial a exigir en una autopista o en una zona peatonal. Las exigencias en cuanto absorción de ruido son también diferentes en una calle urbana que en una carretera a campo abierto atravesando una zona sin edificar.

En relación al material, la composición del mismo es diferente al utilizado en las aplicaciones anteriormente citadas. Así, en este caso, aparte de la incorporación de polímeros o microsílíce, se suele emplear mayores contenidos de cemento (oscilando entre 200 y 300 kg/m<sup>3</sup>) y tamaños máximos del árido más reducido, no superándose los 12 mm.

Hasta la fecha, y difícilmente más adelante, no existe una solución unánimemente aceptada. Ello obedece a la diversidad de circunstancias de cada aplicación concreta (ubicación, tipo de tráfico, etc.) que, en consecuencia, conducen a diferentes soluciones óptimas no sólo asociadas al material sino también a otras etapas del proceso constructivo. Jofré (1993) recoge diferentes referencias de soluciones utilizadas en Japón, Francia y otros países europeos.

A manera de **resumen**, en la tabla 1.1 se presentan ejemplos de distintas dosificaciones de hormigones porosos empleados en los diferentes campos de aplicación presentados. Como ejemplo de empleo en **arcenes** se presentan las realizaciones de la variante de Despeñaperros, en el tramo Jeresa-Ondara de la autopista del Mediterráneo y en la autopista A1 (Francia).

APLICACIÓN	OBRA	ÁRIDO GRUESO (en kg)	ÁRIDO FINO (en kg)	CEMENTO (en kg)	AGUA (en l)	POLÍMERO (en l)
Arcenes	Variante Despeñaperros	5/20 1620	0/5 540	PUZ II-350 150	90	-
	Autop. del Mediterráneo	6/12 12/35 1000 600	0/5 320	P-450 90	42	-
	Autopista A1 (Francia)	5/20 20/40 675 675	0/5 300	CLK 150	70	-
Bases	C.D. 44.F Marsella	7/16 1700	0/3 200	CPJ-45 200	85	-
	Aeropuerto de París	6,3/20 1350	0/5 250	CPJ-45 200	85	-
	California (U.S.A.)	5/25 1500	0/5 100	--- 165	60	-
Capa de rodadura	North Brabant Holanda	8/11 1350	0/2 50	PC 375	145	1,3
	El Culebro Madrid	5/12 1456	0/5 104	V-35 260	60 (a)	20 (b)
	Japón (Tráfico reducido)	0/13,2 1520	---	--- 260	110 (c)	(d)
	Avda de Vitry (París)	6/10 1360	0/ 0,5 /5 25 95	CPJ 400	100	32 (e)

(a) Incluida la del polímero dosificado en solución al 50 % (b) Peso del material sólido (c) Incluido el polímero (d) Se añade un polímero para mejorar la viscosidad del material (e) Microsilica incluida en el cemento (en Kg)

Tabla 1.1.- Ejemplos de dosificaciones empleadas en distintas aplicaciones de hormigones porosos en carreteras.

Como experiencias en **bases** se han tomado dos obras francesas, una de ellas en el Chemin Departamental 44F cerca de Marsella, construidas en el 1983 y la otra, en la ampliación del aeropuerto Charles de Gaulle en París (Lorin et Michel, 1983) y una obra del estado de California en U.S.A. Por último para ilustrar el empleo en **capas de rodadura** delegadas adheridas, se toman diferentes ejemplos de la experiencia internacional: holandesa (Kellersmann y Smits, 1989), española (Oleaga, 1992), japonesa y francesa.

### 1.3.- MARCO DEL TRABAJO Y OBJETO DEL DOCUMENTO

Tras la breve revisión realizada sobre la aplicación del hormigón poroso en carreteras especialmente en capas de rodadura puede observarse la escasez de experiencias existentes a nivel internacional así como el potencial interés de dicha aplicación. En otros campos de aplicación, tal como se ha dicho en el apartado 1.1. el Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña ha venido trabajando en diferentes temas de investigación dentro de esta temática.

Por su parte, el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) interesado en potenciar el empleo de cemento en firmes rígidos de carreteras se planteó, en el año 1989, la necesidad de investigar en el empleo de hormigón poroso modificado con polímeros para capas de rodadura, abordando la posibilidad de la realización de un tramo experimental en el eje del Ebro en colaboración con la Generalitat de Catalunya.

Para la realización de esta actividad investigadora el IECA se puso en contacto con el citado departamento universitario, firmándose a tal fin, en la primavera de 1989, un convenio con el Centro de Transferencia de Tecnología de la UPC (CTT.CO-0855). Con posterioridad, surgió la posibilidad de integrar los trabajos que se desarrollaban en el marco del citado convenio dentro de un proyecto europeo de análoga temática.

El proyecto titulado "Optimization of the Surface Properties of Concrete Roads in Accordance with Environmental Acceptance and Traffic Safety" ha sido parcialmente financiado por la Comunidad Europea dentro del programa BRITE-EURAM (BE nº 3415) con un periodo de vigencia de 42 meses comprendidos entre enero de 1991 a junio de 1994. En el mismo han participado entidades de tres países diferentes (Holanda, Alemania y España). La composición de los participantes holandeses y alemanes son: una empresa constructora (Hochtief en Alemania y Cobeton en Holanda), varios centro de investigación y/o control (CUR e Intron en Holanda, la Universidad Técnica de Berlín y BAST en Alemania) y representantes de la industria del cemento VNC en Holanda y VDZ en Alemania). Por parte española se ha seguido la misma estructuración participando Dragados y Construcciones S.A., Geocisa, el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) y la Universidad Politécnica de Cataluña.

El **objeto** del presente documento es presentar las actuaciones y resultados obtenidos por parte de la UPC durante el desarrollo del citado proyecto de investigación, si bien teniendo en cuenta que el proyecto se ha hecho en un marco más amplio no estanco, por lo cual se tendrán en cuenta algunas de las reflexiones realizadas por otros miembros del equipo

investigador del citado proyecto. Esta presentación incluye un análisis de los resultados de cara a obtener el mejor rendimiento de las experiencias pioneras desarrolladas en el contexto del proyecto.

Este documento tiene un carácter finalista de cierre del proyecto, ya que incluye los trabajos realizados en las distintas etapas, de los que existen informes parciales, tal y como se refleja en el capítulo 8. Asimismo como complemento de este documento puede consultarse los diferentes informes realizados por los otros equipos participantes en el proyecto.

#### **1.4.- METODOLOGÍA**

En el desarrollo del proyecto se han contemplado aspectos relacionados tanto con el material como con la puesta en obra, habiéndose construido, en el transcurso del mismo, un tramo experimental en unas rampas de aceleración y desaceleración de la variante del Culebro en la M-50 de Madrid. La necesidad de dar respuesta para la ejecución de dicho tramo experimental ha sido un factor a tener presente en la dinámica de trabajo del proyecto.

Otro aspecto a resaltar es el carácter pionero no sólo de la obra citada sino de todo el proyecto en su conjunto. Ello ha requerido iniciar la investigación desde etapas muy iniciales tales como: elección del tipo de polímero a emplear, dosificaciones óptimas, condicionantes de la puesta en obra, problemática asociada a la construcción por capas, etc. Ello hace, lógicamente que los logros del proyecto se queden en una fase precompetitiva dejando distintos aspectos sin profundizar que requerirían de estudios posteriores.

Con el fin de facilitar la comprensión del trabajo realizado, presentado en este documento, el mismo se ha estructurado en capítulos, con una estructura similar a la de un libro. Con ello se pretende cubrir las diferentes etapas del proceso constructivo de una capa de rodadura con hormigón poroso modificado con polímeros que van desde la concepción del mismo hasta la construcción y el mantenimiento. Ahora bien esa revisión se hace a partir de las experiencias propias por lo que la estructuración de los capítulos responde más a la secuencia temporal de los trabajos realizados. La estructuración realizada es la siguiente:

- Presentación del marco del hormigón poroso y del proyecto en el que se han realizado los trabajos (Capítulo 1).
- Materiales componentes y estudios de dosificaciones encaminados a la búsqueda de la dosificación óptima (Capítulo 2).
- Estudios de profundización en relación a las características del hormigón resultante de la dosificación óptima (Capítulo 3).
- Aspectos relacionados con la puesta en obra, revisando el seguimiento de los mismos en el tramo experimental citado (Capítulo 4).
- Comportamiento a fatiga de estos hormigones (Capítulo 5).



- Consideraciones de proyecto cara a futuras realizaciones con este tipo de hormigón (Capítulo 6).
- Conclusiones generales y específicas de los trabajos desarrollados (Capítulo 7).
- Bibliografía citada en el documento, así como referencias de los otros informes complementarios y de las publicaciones fruto del proyecto (Capítulo 8).

Asimismo se incluyen dos Anejos que completan la información. En el primero de ellos, se muestra el estudio realizado con elementos finitos en dos dimensiones para analizar el comportamiento en el ensayo de corte, mediante un ensayo de compresión. En el segundo anejo se muestra la relación de ensayos tipos utilizados así como las características principales de los mismos.

## **CAPÍTULO 2**

# **MATERIALES COMPONENTES Y ESTUDIO DE DOSIFICACIONES**

### **2.1.- INTRODUCCIÓN**

Un hormigón poroso modificado con polímeros no sólo representa un material avanzado sino también un proceso constructivo avanzado. En este capítulo se incide en los aspectos relativos al material dejando para capítulos posteriores aquellos aspectos relativos al proceso constructivo.

Con respecto al hormigón, en primer lugar, se estudian los materiales constituyentes para, con posterioridad, analizar los resultados obtenidos con las dosificaciones estudiadas, explicando la razón de ser de la dosificación finalmente adoptada. Hay que llamar la atención a que el hecho de que en el desarrollo del proyecto se haya hecho un tramo experimental en Madrid frente a la ubicación del centro de investigación (Barcelona) ha condicionado, lógicamente, el estudio. Ello da lugar a la necesidad de repetir algunos ensayos para ajustarlos a las diferentes procedencias de los áridos.

Por esta razón, en la exposición de este capítulo, se presentan los aspectos más metodológicos dejando para los anejos los datos específicos de los distintos materiales y/o dosificaciones utilizadas. Con ello se pretende que exista un hilo conductor común evitando la dispersión que puede representar la multiplicidad de datos. Asimismo, en esta exposición

se sigue en gran medida la evolución temporal seguida en el proyecto BRITE citado, haciendo referencia no sólo a los resultados propios de la parte española sino también a los obtenidos por los otros equipos investigadores participantes en el proyecto.

Los requisitos principales exigidos a estos hormigones son numerosos, tal como se muestra en el capítulo 6. Estos requisitos deben atender tanto condiciones de fabricación (hormigón fresco) como condiciones de servicio (hormigón endurecido). Estos requisitos conducen, en término medio, al empleo de los siguientes materiales:

- Áridos de altas prestaciones frente al desgaste con dos tamaños (arena y gravilla), limitándose el tamaño máximo de la gravilla. En el cumplimiento de las especificaciones tiene una gran influencia no sólo la dosificación de ambos sino también la estructura porosa que se alcanza mediante la combinación de distintos tamaños de los áridos.
- Cemento resistente a la agresividad ambiental y características del tráfico.
- Polímeros, cara a la mejora de las resistencias mecánicas (principalmente frente al arrancamiento de los áridos como consecuencia del tráfico) y de la resistencia a la agresividad ambiental. Sin olvidar por ello la contribución a la trabajabilidad de la masa fresca de hormigón.
- Agua y/o aditivos para, manteniendo los requisitos sobre el hormigón endurecido, se pueda alcanzar un hormigón trabajable compatible con el sistema de compactación (usualmente mediante rodillos).

Este planteamiento no es excluyente de otras soluciones (combinaciones de materiales) que permitan dar respuesta satisfactoria a los requisitos exigidos. Así, se podría utilizar microsilíce (parte alemana del proyecto BRITE) o algún tipo de ceniza u otro residuo industrial. Dado que en la parte española del proyecto se ha utilizado polímero era necesario determinar que tipo de familia de polímero se ajusta mejor a los requisitos planteados.

## **2.2.- INFLUENCIA DE LA ESTRUCTURA GRANULAR Y DE LA NATURALEZA DEL POLÍMERO MODIFICANTE**

### **2.2.1.- Objeto del estudio**

Los objetivos del presente estudio son:

- Definir la granulometría más adecuada para este tipo de hormigón, siendo necesario decidir el tamaño máximo del árido grueso y, el tamaño y la proporción de la fracción de árido fino.
- Elegir la familia de polímeros que se ajusta mejor a los requisitos exigidos.

### 2.2.2.- Materiales utilizados

En la fabricación de las distintas series realizadas en este estudio, se han empleado los materiales que se relacionan a continuación, señalándose los motivos que han originado esta decisión.

#### Áridos

Como árido grueso (gravilla) se ha utilizado un árido de naturaleza granítica, procedente de machaqueo. Esta elección responde, por un lado, a las satisfactorias características antideslizantes de este tipo de árido y, por otro lado, a la disponibilidad del mismo en el área de Barcelona. Como árido fino se ha empleado uno procedente de machaqueo de piedra caliza, asimismo disponible en el área de Barcelona (Garraf).

En cuanto a los tamaños, se han utilizado los cuatro siguientes: 0/3, 0/5 para la arena y de 5/8 y 5/12 para la gravilla. La limitación del tamaño máximo del árido a 8 mm, responde a que es la tendencia europea en este tipo de hormigón y, la partición diferenciada de la arena y la gravilla (es decir, disponer por ejemplo un árido fino 0/3 y uno grueso 5/8) responde a la necesidad de crear una discontinuidad en la curva granulométrica. En la tabla 2.1 se presentan las curvas granulométricas de las cuatro fracciones de árido utilizadas.

Tamices		Arena 0-3 mm	Arena 0-5 mm	Gravilla 5-8 mm	Gravilla 5-12 mm
Nº ASTM	Abertura (mm)				
1	25,4				
3/4	19,1				100,00
1/2	12,7				93,31
3/8	9,52			100,00	50,74
Nº 4	4,76	100,00	100,00	36,46	2,72
Nº 8	2,38	92,78	73,40	2,06	0,00
Nº 16	1,19	62,88	44,92	0,00	
Nº 30	0,59	43,65	30,90		
Nº 50	0,297	33,01	23,21		
Nº 100	0,149	25,33	17,94		
Nº 200	0,074	16,11	12,64		

Tabla 2.1.- Curvas granulométricas de los áridos calizos empleados en el estudio de optimización (tanto por ciento que pasa de la muestra total)

Estos requisitos son, en principio, difíciles de cumplir en España, dadas las fracciones de áridos existentes en el mercado, en el que está muy extendido el uso de las fracciones 0/5 y 5/12. Por ello, en este estudio se pretende establecer una comparación entre el hormigón fabricado con estos tamaños y, el fabricado por holandeses y alemanes, en el que se utilizan las otras fracciones de áridos anteriormente señaladas. El objetivo práctico de este estudio es concluir si realmente la mejora de prestaciones compensa el esfuerzo necesario para la obtención de fracciones no usuales en España.

### Cemento

Para esta serie de ensayos, se eligió un único cemento, el denominado tipo V según la norma UNE 80-301/88. El empleo de este cemento se acordó, atendiendo al criterio de que este tipo es usualmente utilizado en la construcción de pavimentos de carreteras. Las características principales de la partida de cemento empleada se han presentado previamente a este documento en informes anteriores.

### Polímeros

Un hormigón modificado con polímero es el resultante de añadir, a un hormigón convencional, otro tipo de conglomerante como es el polímero. Ahora bien, es muy importante, cara al éxito de la aplicación, que exista compatibilidad entre el conglomerante hidráulico (cemento más agua) y el conglomerante orgánico (polímero) ya que no todas las familias de polímeros son compatibles con el agua.

Con el fin de cumplir el objetivo deseado sobre el polímero idóneo para esta aplicación, se han elegido cinco polímeros correspondientes a cuatro familias distintas. En la Tabla 2.2 se muestran los datos correspondientes a la familia, la denominación comercial y el fabricante de cada uno de los polímeros utilizados. Asimismo se presenta la nomenclatura utilizada con posterioridad en este trabajo.

Familia	Denominación comercial	Fabricante	Nomenclatura en este trabajo
Acrílico puro	FORTON VF 774	DSM Resina	a
Acrílico puro	M-370	Hoechst	b
Acrílico estireno	LP-3600	Hoechst	c
Epoxi emulsionable	BECKOPOX EP 122	Hoechst	d
Estireno butadieno	XZ-87555	Dow Chemical	e

Tabla 2.2.- Relación de polímeros utilizados.

Durante el desarrollo del proyecto se ha ido aportando la documentación técnica suministrada por cada empresa sobre sus productos. Dado lo prolijo de dicha información, a manera de resumen, en la tabla 2.3 se presenta un estudio comparativo elaborado en base a la misma. En ella se contemplan aquellos factores, que no habiendo sido evaluados directamente en este estudio, pueden ser importantes para la aplicación de que se trata. La influencia de los citados factores se evalúa mediante una escala que va de 1 (mejor) a 5 (peor).

Nomenclatura utilizada en este trabajo	Efecto de la trabajabilidad	Efecto en la adherencia áridomortero	Resistencia a radiaciones ultravioletas	Sensibilidad a la temperatura	Precio
a	-	-	-	3	1
b	1	1	1	5	1
c	1	1	4	4	1
d	1	4	4	1	5
e	-	1	1	2	1

Tabla 2.3.- Algunas características importantes de los polímeros utilizados, ordenados, según ellas, de mejor a peor comportamiento.

### 2.2.3.- Dosificaciones y procedimientos de ensayo

#### Dosificaciones

Para alcanzar el doble objetivo expuesto en el apartado 2.2.1 se han establecido diez dosificaciones. En cinco de ellas, **sin polímero (Serie A-SP-i)**, se combinan las diferentes fracciones de árido con el fin de comparar principalmente distintos tamaños máximos. Las otras cinco, **con polímeros (Series A-Polímero-1)**, mantienen la misma estructura granular, que corresponde a la serie A-SP-2. En la Tabla 2.4 se ofrece un cuadro resumen con las dosificaciones empleadas, expresadas en peso de cada material por metro cúbico de hormigón.

En las dosificaciones sin polímero (Series A-SP-1 a 5), el contenido de cemento fue de 325 Kg/m<sup>3</sup>. Ello responde a la necesidad de asegurar un mínimo de resistencia; en esa línea está relación árido fino / árido grueso empleada (AR/AG=1/8) la cual, ya había sido contrastada previamente en trabajos previos del equipo de investigación [Rosell y Aguado, 1988b]. En la compactación de las probetas se buscaba alcanzar una densidad aparente del orden de 1,80 a 1,90 t/m<sup>3</sup>.



En la dosificación A-SP-1, un problema surgido con el alimentador de cemento, impide conocer con suficiente precisión la cantidad de material incorporado a la mezcla. Por esta razón, se ha repetido la serie con la denominación A-SP-5.

Dosificación	Áridos (en kg)				Cemento (en kg)	Polimero (litros)	Agua (litros)
	5/12	5/8	0/5	0/3			
A-SP-1	1400	-	-	175	325	-	68
A-SP-2	1400	-	175	-	325	-	110
A-SP-3	-	1400	-	175	325	-	110
A-SP-4	-	1400	175	-	325	-	110
A-SP-5	1400	-	-	175	325	-	110
A-FT-1	1400	-	150	-	250	50	55
A-AP-1	1400	-	150	-	250	50	55
A-AS-1	1400	-	150	-	250	50	55
A-EA-1	1400	-	150	-	250	25	80
A-EB-1	1400	-	150	-	250	50	55

Tabla 2.4.- Dosificaciones empleadas.

Para ensayar los cinco polimeros elegidos, se ha partido, tal como se ha dicho, de la estructura granular de la dosificación A-SP-2, es decir, de aquella que utiliza las fracciones de árido más comunes en el mercado, y por tanto con mayores probabilidades de utilización a igualdad de otras circunstancias. En el diseño de las mezclas, se ha considerado el polimero puro como carga fina, y por tanto se ha rebajado dicha cantidad de la dotación de árido 0/5. La cantidad de polimero diluido o emulsionado (en litros) se ha establecido en el orden del 20% de la cantidad de cemento (en peso) (Ello representa adoptar un peso específico del conjunto similar al del agua, lo cual está muy próximo a la realidad). La cantidad de cemento utilizada en las series con polimeros es de 250 Kg/m<sup>3</sup>, entendiéndose que con dicha cantidad es posible conseguir similares prestaciones a las que se obtienen de las series sin polimero.

Los polimeros utilizados en las dosificaciones A-FT-1, A-AP-1, A-AS-1 y A-EB-1 (que son, respectivamente, el FORTON COMPOUND VF 774 de DSM, el M-370 y el LP-3600 de Hoechst, y el XZ-87555 de Dow Chemical), se presentan diluidos en agua al 50%

(esto es, la cantidad reflejada en la tabla 2.3 dentro de la columna de polímero, 25 litros son de agua y otros 25 litros son del polímero).

Esta cantidad de agua se descuenta de la aportada directamente (55 litros en la citada tabla). Por su parte, el polímero utilizado en la dosificación A-EA-1 (el BECKOPOX EP 122 de Hoechst), se compone, a partes iguales de resina y endurecedor, habiéndose emulsionado previamente a la incorporación a la mezcla, con una parte del agua de aportación fijada en 80 l/m<sup>3</sup>.

En general, la dotación de agua se ha fijado en base a las experiencias previas del equipo, de forma tal que se obtuviera un hormigón de consistencia adecuada para que, siendo trabajable, no presentase la segregación del mortero.

### Procedimientos de ensayo

De cada una de las dosificaciones presentadas en la tabla 2.3 se ha fabricado una serie de 20 probetas. Con dichas probetas se han realizado los ensayos que se relacionan a continuación:

- Densidad aparente, porosidad accesible y permeabilidad.
- Resistencia a compresión y a tracción indirecta.
- Pérdida por desgaste (ensayo cántabro).
- Módulo dinámico de elasticidad.

La descripción del método de ensayo utilizado en cada una de estas determinaciones se presenta en el anejo nº 2. Hay que señalar que en aquellas propiedades donde existe normativa española vigente se ha utilizado dichas normativas; mientras que en las que no existe se explicita como se hace en el citado anejo.

## **2.2.4. Resultados obtenidos**

### Densidad, porosidad, permeabilidad

En la tabla 2.5 se presentan los resultados correspondientes a las series tanto con polímeros como sin polímero. En ella se muestran los valores obtenidos de la densidad aparente (en t/m<sup>3</sup>), de la porosidad accesible (en %) y de la permeabilidad (en cm/seg).

Una primera observación muestra los resultados anómalos que arroja la serie A-SP-1 en concordancia con la imprecisión señalada respecto a la cantidad de en la cantidad de agua (Ver tabla 2.4). Como consecuencia de este error la serie A-SP-1 fue anulada, planteándose su repetición, si bien corrigiendo el error lo cual se realizó en la serie A-SP-5.



A excepción de la citada serie A-SP-1, el resto de **las series sin polímeros** presenta unos resultados similares, con la pequeña variación que introduce la A-SP-4. Las diferencias introducidas por esta serie responde muy probablemente a un exceso de compactación (reflejado en un aumento de la densidad aparente y una disminución de la porosidad y de la permeabilidad) y no es tanto una consecuencia de su propia estructura porosa.

Este resultado pone de manifiesto la fuerte incidencia de la compactación del hormigón poroso en las propiedades del mismo, a igualdad de otros factores, tales como dosificación, estructura granular, etc. Ello, aparte de la lógica consecuencia sobre un obra de este tipo de hormigón, influye asimismo en el método posterior de trabajo en laboratorio. Esto se traduce en la necesidad de trabajar con muestras de peso constante e igual grado de compactación, si bien hay que ser conscientes de la mayor laboriosidad que implica en la manipulación de las muestras.

Series	Densidad aparente (en t/m <sup>3</sup> )	Porosidad (en %)	Permeabilidad (en cm/seg)
A-SP-1	1,59	40	12,10
A-SP-2	1,90	24	1,01
A-SP-3	1,79	26	1,52
A-SP-4	2,05	14	0,83
A-SP-5	1,85	25	1,38
A-FT-1	1,89	21	1,12
A-AP-1	1,77	30	2,50
A-AS-1	1,85	20	0,78
A-EA-1	1,90	13	0,65
A-EB-1	1,95	13	0,63

Tabla 2.5.- Valores de la densidad aparente, porosidad y permeabilidad de las series sin polímero y con polímero.

En cuanto a **las series con polímero**, los resultados obtenidos son asimismo del mismo orden de magnitud entre sí, e incluso entre ellas y las series sin polímero. Asimismo se observa la influencia del grado de compactación en los resultados correspondientes a la densidad aparente, porosidad y permeabilidad. Así, la serie A-AP-1, aparte de otros factores

que existen, muestra una densidad aparente menor y, consecuentemente, una porosidad y permeabilidad mayor que el resto de las series. Desde el punto de vista del diseño de capas de rodadura interesaría obtener una densidad aparente en el entorno de  $1,9 \text{ t/m}^3$ , una porosidad próxima al 20 % y una permeabilidad del orden de  $1 \text{ cm/seg}$ . Tal como se observa en la tabla 2.5 a estas prestaciones se aproximan satisfactoriamente los resultados de la serie A-FT-1, sin poderse descartar otras a falta de más resultados.

#### Resistencia a compresión y a tracción indirecta

En la tabla 2.6 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión y a tracción indirecta de las diferentes series, tanto sin polímero como con polímero. Estos resultados corresponden a las distintas edades de ensayo, las cuales fueron de 7, 28 y 90 días para la resistencia a compresión y de 7 y 28 días para la resistencia a tracción indirecta.

Por otro lado cabe señalar que dichos resultados es el valor medio de los correspondientes a tres probetas, y que entre paréntesis se presenta el valor de las dispersiones de los valores correspondientes a las tres probetas. Estas dispersiones, tal como se observa en la citada tabla 2.6, son del orden del 10 % para la resistencia a compresión a los 28 días, lo cual se entiende como admisible dentro de la singularidad que representan estos hormigones.

Los resultados de las **series sin polímeros** muestran, en general, una resistencia a compresión algo baja para los requisitos exigidos a este tipo de hormigón en la aplicación de capa de rodadura, (la resistencia a compresión se debería situar por encima de los 15 MPa a 28 días). La resistencia a tracción indirecta constata un hecho ya observado previamente al proyecto (Rosell et al. 1987b), que es que la resistencia a tracción indirecta representa un porcentaje de la resistencia a compresión más alto que el correspondiente a hormigones convencionales (este porcentaje se sitúa en estos hormigones en el entorno del 15 al 20%).

La serie A-SP-1 da unos resultados muy bajos, tanto en la resistencia a compresión como a tracción indirecta, como consecuencia de los errores ya expuestos. Ahora bien la repetición de esta serie (Serie A-SP-5) conduce a unos resultados que, en base a los requisitos señalados, se podrían considerar satisfactorios en ambos tipos de resistencia. Hay que llamar la atención sobre el hecho de que esta serie es la más discontinua de todas las ensayadas.

La serie A-SP-2 muestra un valor algo bajo de la resistencia a compresión y un comportamiento satisfactorio de la resistencia a compresión. Ahora bien, los resultados de las otras propiedades analizadas anteriormente son muy satisfactorios. Por ello esta serie debe ser objetos de un estudio más detallado en aras a mejorar la resistencia a compresión si bien manteniendo valores similares del resto de propiedades. Una ventaja importante de esta serie es que mantiene los tamaños de árido existentes en el mercado por lo que no es preciso hacer ninguna actuación sobre ellos.

Series	Resistencia a compresión (en MPa)			Resistencia a tracción (en MPa)	
	7 días	28 días	90 días	7 días	28 días
A-SP-1	2,6 (0,09)	3,4 (0,73)	--	0,4 (0,11)	0,5 (0,02)
A-SP-2	8,8 (1,26)	11,4 (1,56)	--	1,5 (0,21)	1,8 (0,23)
A-SP-3	3,9 (0,25)	5,8 (0,49)	--	0,6 (0,05)	1,0 (0,15)
A-SP-4	9,0 (2,69)	11,7 (1,72)	--	1,5 (0,12)	1,7 (0,15)
A-SP-5	8,3 (2,88)	15,0 (1,06)	--	1,3 (0,17)	1,7 (0,22)
A-FT-1	11,1 (0,01)	14,7 (1,13)	18,1 (1,41)	2,0 (0,52)	2,2 (0,31)
A-AP-1	7,0 (0,27)	9,7 (2,71)	10,8 (1,23)	1,4 (0,16)	2,0 (0,12)
A-AS-1	4,6 (0,35)	7,4 (0,17)	8,0 (1,86)	0,8 (0,01)	1,1 (0,16)
A-EA-1	10,0 (0,65)	15,4 (0,60)	15,1 (1,37)	1,5 (0,05)	1,9 (0,19)
A-EB-1	14,3 (0,59)	17,2 (1,53)	24,9 (*)	1,6 (0,25)	2,4 (0,13)

(\*) Resultado correspondiente a una probeta rota a 275 días

Tabla 2.6.- Valores de la resistencia a compresión (en MPa) y a tracción indirecta (en MPa) de las distintas series estudiadas.

La serie A-SP-3 da unos resultados bajos, tanto en la resistencia a compresión como a tracción indirecta. Ello puede explicarse en parte, por la menor compacidad de dicha serie (Ver tabla 2.5), si bien ello no justifica por sí sólo esta disminución. Otra parte, puede ser debida a la estructura granular de la serie, la cual es bastante continua. Este resultado va en contra de los requisitos exigidos y, en consecuencia, esta serie no es elegible debiéndose ir hacia series con granulometrías más abiertas.

La serie A-SP-4, que desde un punto de vista mecánico podría dar resultados alentadores, entendemos que no son tales si se analizan conjuntamente con los resultados mostrados en la tabla 2.5, ya que la compacidad de dicha serie es alta y la porosidad y permeabilidad baja. Este comportamiento puede obedecer a que es la serie que tiene una granulometría más continua (tamaños 0/5 y 5/8). En consecuencia es una serie no elegible.

En base a los resultados presentados en las tablas 2.5 y 2.6, para las series sin polímero se entiende que se podrían alcanzar los requisitos con un serie tipo A-SP-2 si bien marcando más la discontinuidad a través de reducir la aportación de la arena.

En cuanto a las **series con polímeros**, las cuales ya recogen parcialmente esta propuesta (reducción de la arena a 150 kg), hay una valoración global que hacer inicialmente. Ésta es que la resistencia a compresión no aumenta de forma significativa con el polímero, mientras que ese aumento es más palpable en la resistencia a tracción indirecta, lo cual resulta beneficioso para la resistencia al arrancamiento que se derive de un tráfico sobre la capa de rodadura. Este comportamiento refleja por otro lado la importancia de la estructura de la matriz en la resistencia a compresión independientemente, en parte, del conglomerante.

Otro aspecto a señalar de estas series, lo mismo que pasa en las series sin polímero, es que la resistencia a tracción significa un porcentaje más alto de la resistencia a compresión que el correspondiente a un hormigón convencional. Ello es consecuencia de la estructura de la matriz rígida que constituye estos hormigones. En relación a la evolución de la resistencia a compresión con el tiempo, puede observarse que el incremento entre 7 y 28 días es similar al de un hormigón convencional, siendo poco relevantes los incrementos de 28 a 90 días (excepto los valores de la serie A-FT-1).

Analizando los resultados concretos, puede observarse que las series A-AP-1 y la A-AS-1 no presentan mejores resultados que las series sin polímero, salvo la resistencia a tracción de la primera de estas series. En consecuencia, dichas series deben desecharse ya que no supone una mejora de prestaciones y, sin embargo, significa un aumento de costes.

Las series A-EA-1 y A-EB-1 conducen a resultados satisfactorios de las propiedades mecánicas analizadas, especialmente en lo que hace referencia a la última de las series citadas. Ahora bien, las bajas porosidades y permeabilidades de estas series así como el elevado coste del polímero, especialmente el correspondiente a la familia epoxi, inclinan a pensar en la no idoneidad de este tipo de polímeros en la aplicación del hormigón poroso en capas de rodadura. Esto no debe tomarse como una conclusión excluyente de que en otro tipo de condiciones o circunstancias puedan ser válidas esas soluciones.

Del análisis que se ha hecho de las propiedades físicas y mecánicas citadas queda, por exclusión, la serie A-FT-1 como la serie óptima para este tipo de aplicación. En ella se conjugan unos resultados satisfactorios no sólo de las propiedades citadas sino también del estudio cualitativo de otras prestaciones planteadas en la tabla 2.3.

### Pérdida por desgaste (Ensayo cántabro).

El ensayo Cántabro, denominado así por los trabajos dirigidos por F.E. Pérez en la Universidad de Cantabria, se utiliza para la determinación del contenido de conglomerante óptimo en mezclas bituminosas abiertas. La descripción de dicho ensayo se presenta en el anejo 2, si bien básicamente consiste en introducir un pequeña probeta de hormigón poroso dentro del molino utilizado en el ensayo de los Ángeles, sin las bolas, y dar un número determinados de vueltas, pesando la muestra al principio y al final del ensayo (el resultado se recoge como un porcentaje de la pérdida de peso).

En este trabajo dicho ensayo se ha utilizado para medir indirectamente la respuesta de estos hormigones frente al arrancamiento. En el mismo se comparan relativamente los valores obtenidos, lo cual permite hacer una clasificación de los resultados, los cuales se presentan en la Tabla 2.7. En ella, se ha excluido la serie A-SP-1, ya que la haberse desechado previamente no se realizó este ensayo.

Serie	A-SP-2	A-SP-3	A-SP-4	A-SP-5	A-FT-1	A-AP-1	A-AS-1	A-EA-1	A-EB-1
%	24,8	48,4	22,5	23,2	19,2	29,2	80,3	24,4	20,5

Tabla 2.7.- Resultados de la pérdida en peso (en %) correspondiente al ensayo cántabro.

En ella puede apreciarse que en las **series sin polímero**, los resultados correspondientes a la serie A-SP-3 son muy elevados (pérdidas en peso del 48,4%). Ello significa un hormigón poco deseable, ya que se produce un fácil arrancamiento de los áridos. Este resultado está en concordancia con obtenidos en las otras propiedades, correspondientes a dicha serie.

Los resultados de las otras tres series sin polímeros son muy similares. Los valores obtenidos (entre el 22,5 y el 24,8%) son similares a los que se obtienen usualmente en mezclas abiertas de tipo bituminoso. Este resultado es claramente esperanzador en relación al empleo de hormigón poroso modificado con polímero en capas de rodadura. Por otro lado, las pequeñas diferencias registradas en estas tres series (A-SP-2, A-SP-4 y A-SP-5), dan validez a las mismas sin ser determinante para la elección de una de ellas.

En cuanto a las **series con polímeros**, los resultados muestran las importantes diferencias existentes. Así para la serie A-AS-1 se obtiene una pérdida en peso del 80,3% (Ver tabla 2.7), lo cual la invalida para este tipo de aplicación.

Las otras cuatro series (A-FT-1, A-AP-1, A-EA-1 y A-EB-1) dan valores comprendidos entre el 19,2 % y el 29,2 %, que se sitúan en el mismo orden de magnitud. De todas ellas es la serie A-FT-1 la que da unas menores pérdidas, lo que añadido a los



favorables resultados de las otras propiedades anteriormente presentados hace que esta sea la serie tipo sobre la que trabajar con posterioridad en este estudio.

Con el fin de investigar la influencia que en los resultados podría tener el método de ensayo, se estudiaron dos alternativas: estado de la probeta (húmeda-seca y número de vueltas). Este estudio se hizo con probetas correspondientes a la serie A-EB-1. Esta elección fue debida a que dando resultados similares a la serie A-FT-1, entraba mucho mejor por la programación del laboratorio realizarlos en dicha serie. Si normalmente se realiza el ensayo sobre probeta seca, la repetición de este ensayo sobre probetas húmedas, conduce a un incremento de las pérdidas para esta último caso. Así, para probeta húmeda se obtiene una pérdida media del 28.7 %, mientras que para probeta seca estas pérdidas son del 20.5 % (Ver tabla 2.7).

En cuanto a la influencia del número de vueltas, en la tabla 2.8 se presentan los resultados obtenidos. En ella puede observarse una progresión prácticamente lineal. Esto es, las pérdidas en peso son proporcionales al número de vueltas. Este resultado refleja una buena homogeneidad de las probetas, ya que a medida que pierde peso, el hormigón que queda tiene una estructura similar al anterior y, consecuentemente, perderá un peso análogo para un mismo número de vueltas.

Número vueltas	250	300	350	400	450	500
% pérdida en peso	17,7	20,5	23,1	25,4	28,2	31,4

Tabla 2.8.- Pérdida de peso en función del número de vueltas (serie A-EB-1).

#### Módulo de Elasticidad

Dadas las dificultades de determinación del módulo de deformación en este tipo de hormigones, motivado porque la superficie abierta de forma aleatoria de los poros impide o dificulta la fijación de galgas; se estimó conveniente determinar el módulo dinámico de elasticidad. Para la determinación del mismo se utilizó la técnica de ultrasonidos, obteniéndose el valor del módulo dinámico a través de la siguiente expresión:

$$E_{din} = \frac{(1 + \nu)(1 - 2 * \nu)}{1 - \nu} * \rho * V^2 \quad (2.1)$$

donde:  $E_{din}$  = Módulo dinámico de elasticidad (en MPa)  
 $\rho$  = Densidad (en kg/m<sup>3</sup>)  
 $V$  = Velocidad de propagación (en m/s)  
 $\nu$  = Coeficiente de Poisson

Para la determinación del valor del módulo de elasticidad dinámico por este método, se requiere hacer una estimación del valor del coeficiente de Poisson tal como se observa en la expresión 2.1. En este caso, a falta de datos iniciales se han tomado dos valores diferentes:  $\nu = 0,2$  y  $\nu = 0,3$ , que se estiman pueden ser representativos del comportamiento de estos hormigones. Los resultados del cálculo se presentan en la tabla 2.9.

Series	Módulo dinámico $E_{dm}$ (en MPa)	
	$\nu = 0,2$	$\nu = 0,3$
A-SP-1	11.952	9.865
A-SP-2	23.382	19.299
A-SP-3	18.387	15.177
A-SP-4	25.122	20.736
A-SP-5	24.757	20.434
A-FT-1	22.904	18.905
A-AP-1	17.206	14.202
A-AS-1	13.592	11.219
A-EA-1	22.315	18.419
A-EB-1	23.320	19.248

Tabla 2.9.- Valores del módulo dinámico de elasticidad para dos valores diferentes de  $\nu$ .

En dicha tabla puede verse que los valores del módulo dinámico varían entre 10.000 y 25.000 MPa, y que si se desechan las series A-SP-1, por el error introducido citado con anterioridad y la serie A-AS-1, por inadecuación de los resultados de la misma, vistos anteriormente, este rango se situaría entre 17.000 y 25.000 MPa (para  $\nu = 0,2$ ) y entre 14.000 y 21.000 MPa (para  $\nu = 0,3$ ). Estos valores son, en general, algo inferiores a los correspondientes a un hormigón convencional de similar resistencia, lo cual refleja una influencia lógica de la matriz.

Para la serie A-EB-1 se realizó un ensayo a 275 días obteniéndose los valores de 21.200 MPa y 20.900 MPa como módulo dinámico en las dos probetas ensayadas y de 14.400 MPa como módulo estático en la probeta ensayada.

Asimismo puede observarse una buena correspondencia entre los valores más altos del módulo dinámico con los valores más altos de la resistencia a compresión de la serie

correspondiente. La escasez de resultados hace difícil una correlación si bien parece que podría alcanzarse de forma análoga a un hormigón convencional.

### **2.2.5.- Conclusiones**

A la vista de los resultados obtenidos se considera que la serie A-FT-1 es la más adecuada para servir de base de partida para estudios posteriores. Ello equivaldría a utilizar las fracciones de árido 0/5 y 5/12, y a escoger el FORTON COMPOUND VF 774, como polímero modificante.

En la recámara de la investigación queda la serie A-EB-1 que asimismo conduce a resultados interesantes en cada una de las propiedades estudiadas. La no consideración para los estudios posteriores en este trabajo corresponde a que el equipo holandés también trabajaba con FORTON COMPOUND VF 774, lo cual le hacía especialmente interesante para comparar resultados.

## **2.3.- DOSIFICACIONES ÓPTIMAS**

En la tabla 2.10 se presentan los diferentes materiales empleadas en los estudios de optimización en cada uno de los países participantes. En ella puede observarse el amplio abanico de opciones considerado, en relación a diversos factores: tipos y tamaños de los áridos, tipo de cemento y tipo de aditivos utilizados (aireante, polímero, microsilice, estabilizante y superplastificante).

Los estudios de optimización citados se realizaron en base al análisis de las siguientes propiedades del hormigón tanto en estado fresco como en estado endurecido:

- Trabajabilidad a 5, 20 y 35 °C (estudio del factor de compactación inmediatamente después del amasado y 1 hora más tarde)
- Resistencia a flexotracción
- Resistencia a compresión
- Resistencia a tracción indirecta
- Densidad seca
- Porosidad accesible
- Permeabilidad
- Resistencia a ciclos hielo-deshielo



material	VDZ	Intron	UPC
ARIDO gravilla arena	5/8 mm <sup>1)</sup> 0/1 mm <sup>3)</sup>	4/8 mm <sup>2)</sup> 0/1 mm <sup>3)</sup>	5/8 y 5/12 mm <sup>1)</sup> 0/3 y 0/5 mm <sup>4)</sup>
CEMENTO portland port. con cenizas	PC 35 F -	- PCFA	- PCFA 35
ADITIVOS aireante polimero microsilice estabilizante superplastificante	si 4 tipos si si si	no 4 tipos no no no	no 4 tipos no no (si) <sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> Procedente de machaqueo de roca

<sup>2)</sup> Procedente de machaqueo de gravas

<sup>3)</sup> Arena de río

<sup>4)</sup> Arena de machaqueo

<sup>5)</sup> Sólo para las dosificaciones sin polímeros con objeto de alcanzar una trabajabilidad similar

Tabla 2.10.- Materiales empleados en los estudios de optimización en los tres países

En la tabla 2.11 se presentan las diferentes dosificaciones empleadas en cada uno de los países para los trabajos de optimización de las mezclas. En dicha tabla puede apreciarse el carácter de cada uno de los estudios. Así los trabajos de los alemanes incidieron en la influencia del contenido de cemento (manteniendo constante la relación agua/cemento) y en el contenido de aditivos (polímeros, humo de sílice y superplastificantes). Los estudios holandeses incidieron fundamentalmente en el contenido de polímero. Por último los estudios realizados en la UPC han incidido en la influencia de los cortes granulométricos y en el contenido de polímero. Hay que resaltar que en cada país se utilizaron los componentes próximos, así como los hábitos usuales en la construcción. A esta razón responde los diferentes cortes granulométricos utilizados.

En la tabla 2.12 se presentan las características del hormigón fresco correspondiente a cada uno de los tipos de las dosificaciones presentadas en la tabla anterior. En ella puede apreciarse que la densidad seca de las series correspondientes a alemanes y españoles son algo superiores que las correspondientes a los holandeses, por lo que, independientemente de la compactación, las características mecánicas serán previsiblemente superiores en los dos primeros.

Hay que llamar la atención sobre el hecho de que el porcentaje de la gravilla en volumen es muy similar en las tres experiencias. De ello puede derivarse que para alcanzar

las prestaciones deseadas, existen pocas opciones, o mejor dicho, están muy acotadas las posibles combinaciones. En cualquier caso debe existir un salto significativo entre la gravilla y la arena (en los casos estudiados la gravilla varía entre 1.400 y 1.564 kg/m<sup>3</sup> mientras que la arena varía entre 60 y 175 kg/m<sup>3</sup>).

	Mezcla	Aridos (peso seco)							cemen- to	poli- mero sólido <sup>2)</sup>	humo de sílice	superplas- tificante	agua <sup>9)</sup>
		5/12	5/8	4/8	0/5	0/3	0/2	0/1					
A	1 <sup>1)</sup>	-	1510	-	-	-	75	-	196	-	-	-	59
L	2 <sup>1)</sup>	-	1548	-	-	-	77	-	242	-	-	-	73
E	3 <sup>1)</sup>	-	1545	-	-	-	77	-	283	-	-	-	85
M	4 <sup>1)</sup>	-	1564	-	-	-	78	-	329	-	-	-	99
A	5 <sup>1)</sup>	-	1534	-	-	-	77	-	282	23 <sup>3)</sup>	-	-	64
N	17 <sup>1)</sup>	-	1534	-	-	-	77	-	282	14 <sup>4)</sup>	-	4	64
I	18 <sup>1)</sup>	-	1534	-	-	-	77	-	282	28 <sup>3)</sup>	-	4	48
A	19 <sup>1)</sup>	-	1534	-	-	-	77	-	282	-	28 <sup>7)</sup>	4	71
	20 <sup>1)</sup>	-	1534	-	-	-	77	-	282	28 <sup>3)</sup>	28 <sup>7)</sup>	-	71
H	6	-	-	1418	-	-	-	71	223	6 <sup>5)</sup>	-	5	76
O	7	-	-	1421	-	-	-	61	192	10 <sup>6)</sup>	-	5	61
L	8	-	-	1419	-	-	-	71	223	11 <sup>4)</sup>	-	5	71
A	9	-	-	1400	-	-	-	80	252	12 <sup>4)</sup>	-	6	80
N	10	-	-	1406	-	-	-	90	284	14 <sup>4)</sup>	-	6	90
D	11	-	-	1425	-	-	-	68	212	21 <sup>3)</sup>	-	-	74
A													
E	12	1400	-	-	175	-	-	-	325	-	-	-	110
S	13	-	1400	-	-	175	-	-	325	-	-	-	110
P	14	-	1400	-	175	-	-	-	325	-	-	-	110
A	15	1400	-	-	-	175	-	-	325	-	-	-	110
A	16	1400	-	-	150	-	-	-	250	25 <sup>3)</sup>	-	-	80
N	22	1400	-	-	100	-	-	-	250	25 <sup>3)</sup>	-	-	75
A	23	1400	-	-	100	-	-	-	250	-	-	-	80
	24	1400	-	-	100	-	-	-	250	10 <sup>8)</sup>	-	-	80
	25	1400	-	-	100	-	-	-	250	15 <sup>9)</sup>	-	-	80
	26	1400	-	-	100	-	-	-	250	20 <sup>10)</sup>	-	-	80

- 1) Contienen agentes aireantes
- 2) Emulsión, contiene 50% polímero sólido
- 3) 10% polímero sólido en peso cemento
- 4) 5% polímero sólido en peso cemento
- 5) 2,5% polímero sólido en peso cemento
- 6) Incluye agua emulsión
- 7) 10% microsílíce sólida en relación al peso del cemento
- 8) 4% polímero sólido en relación al peso del cemento
- 9) 6% polímero sólido en relación al peso del cemento
- 10) 8% polímero sólido en relación al peso del cemento

Tabla 2.11.- Dosificaciones empleadas en los estudios de optimización (contenidos en kg/m<sup>3</sup>).

	mezcla	polímero	densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	dosificación en volumen (% V/V)			relación agua/ cemento	factor compactación 5) (a 20°C)
				gravilla	mortero	aire		
A L E M A N I A	1	-	1840	50	15	35	0.30	-
	2	-	1940	51	18	31	0.30	-
	3	-	1990	51	20	29	0.30	-
	4	-	2070	52	23	25	0.30	-
	5	Addiment	1990	51	21	28	0.24	-
	5	Forton	2000	51	21	28	0.24	-
	5	Lipaton	1980	50	21	29	0.25	-
	5	XZ 87555	1990	51	21	28	0.26	-
	17	Forton	1970	51	19	30	0.23	1.25
	18	Forton	1980	51	19	30	0.17	1.26
H O L A N D A	19	-	1980	51	20	29	0.25	1.30
	20	Forton	2000	51	22	27	0.25	1.37
	7	Forton	1750	54	16	30	0.33	1.22
	8	Forton	1800	54	19	27	0.33	1.20
	9	Forton	1830	53	21	26	0.33	1.21
	10	Forton	1890	53	24	23	0.33	1.20
	6 <sup>3)</sup>	Acrytekt	1765	52	18	30	0.37	1.19
	8 <sup>3)</sup>	Acronal	1765	52	18	30	0.34	1.20
	8 <sup>3)</sup>	Forton	1773	53	18	29	0.33	1.19
	8 <sup>3)</sup>	Forton	1772	52	20	28	0.39	1.18
	8 <sup>3)</sup>	Forton	1782	52	18	30	0.34	1.20
	8 <sup>4)</sup>	Forton	1751	52	18	30	0.33	1.20
	11	Acronal	1748	52	18	30	0.35	1.20
	11	Acrytekt	1748	52	18	30	0.37	1.20
	11	Forton	1748	52	18	30	0.35	1.22
	11	XZ 87555	1748	52	18	30	0.35	1.20
E S P A Ñ A	12	-	2010	53	29	18	0.34	1.10
	13	-	2010	53	29	18	0.34	
	14	-	2010	53	29	18	0.34	
	15	-	2010	53	29	18	0.34	
	16	Beckopox	1905	53	24	23	0.32	1.12
	16	Forton	1905	53	24	23	0.32	
	16	LP 3600	1905	53	24	23	0.32	1.13
	16	M 370	1905	53	24	23	0.32	
	16	XZ 87555	1905	53	24	23	0.32	
	22	Forton	1850	53	22	25	0.30	--
	23	-	1830	53	20	27	0.32	--
	24	Forton	1840	53	21	26	0.32	1.13
	25	Forton	1845	53	21	26	0.32	1.07
	26	Forton	1850	53	22	25	0.32	1.06

<sup>1)</sup> superplastificante Conplast 430

<sup>2)</sup> superplastificante Melment L10

<sup>3)</sup> ISO 4111

<sup>4)</sup> superplastificante K3T-11+H

<sup>5)</sup> superplastificante OFT 3

Tabla 2.12.- Características del hormigón fresco

El volumen de aire se sitúa entre el 18 y el 31 %, lo cual es necesario para alcanzar la porosidad usualmente requerida (en el entorno del 20 %); mientras que la relación agua cemento se sitúa en el entorno de 0,3. En este caso las mayores variaciones se presentan en los trabajos alemanes debido a que los factores que han estudiado incidían en este parámetro.

Otro aspecto diferenciador, en este caso de las experiencias españolas es el factor de compactación. Ello responde, en nuestra opinión, al diferente esqueleto que constituye los áridos. Hay que recordar que en este caso se han empleado mayores tamaños de árido.

En la tabla 2.13 se presentan los resultados correspondientes al hormigón endurecido de las dosificaciones anteriormente mostradas (tabla 2.10), cuyas características en estado fresco se han mostrado en la tabla 2.12. Como puede apreciarse en la tabla 2.13, la porosidad accesible tiene una gran dispersión debido, entendemos, al diferente grado de compactación de cada probeta, así como a la propia estructura de la dosificación.

Los resultados correspondientes a las series españolas ya han sido analizados con anterioridad, resaltando en conjunto que la resistencia a compresión de estas dosificaciones, se mueve en el entorno de 14 a 18 MPa (aunque existen valores por fuera de este rango tanto por arriba como por abajo). Estos valores están dentro del ámbito requerido para la aplicación aquí estudiada. Algo similar sucede con las otras propiedades analizadas, tal como puede observarse en la citada tabla 2.13.

En base a los estudios realizados en las series anteriormente señaladas y a los estudios correspondientes a las series realizadas con motivo de los tramos de prueba realizados en cada uno de los países (los correspondientes a la experiencia española se presentan en el capítulo 3), en la tabla 2.14 se presentan las dosificaciones consideradas óptimas, en condiciones de laboratorio, para las circunstancias específicas de cada uno de los países.

	mezcla	polímero	porosidad accesible <sup>4)</sup> (% V/V)	densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a compresión <sup>5)</sup> (MPa)			Resistencia a flexotracción <sup>7)</sup> (MPa)		Resistencia a tracción indirecta <sup>8)</sup> (MPa)		Modulo dinámico de elasticidad <sup>9)</sup> (GPa)
					7 días	28 días	90 días	7 días	28 días	7 días	28 días	
A L E M A N I A	1	-	36,2	-	-	7,0	-	-	0,9	-	0,7	-
	2	-	32,1	-	-	10,9	-	-	1,9	-	1,0	-
	3	-	29,1	-	-	13,2	-	-	1,7	-	1,5	-
	4	-	25,3	-	-	16,2	-	-	1,8	-	2,2	-
	5	Addiment	27,3	-	-	14,5	-	-	3,6	-	1,5	-
	5	Forton	27,0	-	-	16,3	-	-	4,3	-	1,8	-
	5	Lipaton	26,8	-	-	15,9	-	-	3,7	-	1,8	-
	5	XZ 87555	28,6	-	-	10,8	-	-	2,4	-	1,5	-
	17	Forton	27,1	-	-	15,2	-	-	2,5	-	1,2	-
	18	Forton	28,2	-	-	16,1	-	-	2,6	-	1,5	-
	19	-	29,5	-	-	14,0	-	-	2,1	-	1,4	-
	20	Forton	25,3	-	-	15,1	-	-	3,7	-	1,6	-
H O L A N D A	7	Forton	28,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8	Forton	24,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	Forton	23,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	Forton	19,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	Acrytekt <sup>1)</sup>	26,6	1692	11,5	15,1	-	-	2,9	-	-	-
	8	Acronal <sup>2)</sup>	26,1	1682	14,3	16,7	-	-	3,0	-	-	-
	8	Forton <sup>3)</sup>	26	1726	14,1	17,9	-	2,5	3,9	-	-	-
	8	Forton <sup>3)</sup>	28	1703	10,7	15,8	-	2,4	3,3	-	-	-
	8	Forton <sup>3)</sup>	25,9	1677	13,6	16,5	-	2,7	3,4	-	-	-
	8	Forton <sup>4)</sup>	28	1690	12,4	17,0	-	2,3	3,3	-	-	-
	11	Acronal	26,4	1668	10,9	14,7	-	-	3,5	-	-	-
	11	Acrytekt	27,0	1655	4,9	10,4	-	-	2,6	-	-	-
	11	Forton	26,5	1681	10,9	14,8	-	-	3,3	-	-	-
	11	XZ 87555	25,4	1684	11,8	13,6	-	-	3,2	-	-	-
E S P A Ñ A	12	-	24	1900	8,8	11,4	-	-	-	1,5	1,8	23
	13	-	26	1790	3,9	5,8	-	-	-	0,6	1,0	18
	14	-	14	2050	9,0	11,7	-	-	-	1,5	1,7	25
	15	-	25	1850	8,3	15,0	-	-	-	1,3	1,7	25
	16	Beckopox	18	1900	10,0	15,4	15,1	-	-	1,5	1,9	22
	16	Forton	21	1890	11,1	14,7	18,1	-	-	2,0	2,2	23
	16	LP 3600	20	1850	4,6	7,4	8,0	-	-	0,8	1,1	13
	16	M 370	30	1770	7,0	9,7	10,8	-	-	1,4	2,0	17
	16	XZ 87555	13	1950	14,3	17,2	-	-	-	1,6	2,4	23
	22	Forton	16	1930	15,2	13,0	-	-	-	2,0	2,4	20
	22	Forton	14	1910	14,9	18,7	-	-	-	1,8	2,8	23
	22	Forton	13	1950	15,0	16,3	-	-	-	2,0	2,4	23
	22	Forton	15	1930	13,3	21,3 <sup>9)</sup>	-	-	-	1,6	2,6 <sup>9)</sup>	18
	22	Forton	15	1960	13,5	21,9 <sup>9)</sup>	-	-	-	1,9	2,8 <sup>9)</sup>	18
	22	Forton	12	1930	13,0	20,9 <sup>9)</sup>	-	-	-	1,6	2,2 <sup>9)</sup>	19
	23	-	21	1770	10,4	14,6	-	-	-	1,2	1,5	-
	24	Forton	26	1760	11,8	12,9	-	-	-	1,8	2,1	-
	25	Forton	22	1790	11,7	16,3	-	-	-	1,6	2,2	-
	26	Forton	22	1770	12,3	16,6	-	-	-	1,5	2,2	-

1) Superplastificante Conplast 430

4) Superplastificante OFT 3

7) ISO 4013

2) Superplastificante K3T-11+H

5) Según UNE

8) DIN 1048

3) Superplastificante Melment L10

6) ISO 4012

9) 22 días de endurecimiento

Tabla 2.13.- Características del hormigón endurecido.



Material (en Kg/m <sup>3</sup> )	Holanda	Alemania	España
Gravilla 5/12	-	-	1500
Gravilla 5/8	-	1523	-
Gravilla 4/8	1389	-	-
Arena 0/5	-	-	100
Arena 0/1	66	76	-
Cemento con cenizas	207	-	275
Cemento sin adiciones	-	280	-
Forton VF 774 (polimero solido)	16	28	12,5
Agua (incluida agua de emulsión)	72	81	78,5

Tabla 2.14.- Dosificaciones óptimas para las circunstancias específicas de cada uno de los países.



## **CAPÍTULO 3**

# **ACTUACIONES RELATIVAS AL TRAMO EXPERIMENTAL DEL CULEBRO**

### **3.1.- INTRODUCCIÓN**

La integración del equipo de investigación de la UPC dentro del proyecto de investigación BRITE-EURAM anteriormente citado, ha incidido en la necesidad de dar respuesta satisfactoria a algunos de los objetivos generales del mismo como eran la realización de tramos experimentales. En dicho proyecto se planteó que cada equipo de investigación apoyase los tramos experimentales nacionales, que en el caso español se materializó en unos ramales de entrada y salida de la autovía M-40 en el denominado arroyo del Culebro.

Antes, durante y con posterioridad a la realización de dicho tramo experimental ha sido preciso realizar distintos estudios tanto de dosificaciones como de aspectos relativos al sistema de ejecución, unión entre el hormigón de base y la capa de rodadura, etc.

En este capítulo se presentan los diferentes estudios realizados, por parte de la UPC, con una vinculación directa sobre el tramo experimental del Culebro. Tanto los estudios realizados como los objetivos perseguidos en cada uno de ellos se presentan de forma sintética en la tabla 3.1. En dicha tabla se hace referencia, asimismo, al informe emitido con

anterioridad durante el transcurso del desarrollo del proyecto. Con este tipo de presentación se pretende facilitar el seguimiento de la exposición de este capítulo. En la citada tabla, en la columna de áridos se refleja como obra los utilizados en el tramo experimental del Culebro, mientras que se denomina como propios los áridos calizos del Garraf aportados por el equipo de investigación de la U.P.C.

Estudio	Objeto	Áridos	Informe Fecha
1	Influencia del tiempo transcurrido entre la colocación del hormigón de base y el de la capa de rodadura. Simulación sistemas constructivos.	Obra	Documento 2 2 Versiones Jul/Dic 1992
2	Influencia del contenido de polímero en las propiedades del hormigón resultante.	Obra	Documento 3 Enero 1992
3	Influencia de la densidad aparente en las prestaciones del hormigón resultante. Influencia del tipo de conservación.	Propios	Documento 4 Mayo 1992
4	Influencia de la cantidad de polímero en las características mecánicas. Influencia del número de vueltas y el estado de las probetas en el ensayo cántabro.	Propios	Documento 5 Septiembre 1992
5	Resultados correspondientes al tramo de ensayo del Culebro. Testigos y probetas moldeadas. Caracterización térmica.	Obra	Documentos separados Año 1993

Tabla 3.1.- Objetivos principales de los estudios realizados por la UPC en relación al tramo experimental del Culebro y previo al mismo.

### 3.2.- ESTUDIO N° 1

#### 3.2.1.- Objeto del estudio

Dada la gran importancia que, para la vida de un pavimento multicapa como el que nos ocupa, tiene la adherencia entre el hormigón de la capa de base y el correspondiente a la capa de rodadura, este estudio tiene por objeto analizar las características de dicha unión en base a las previsibles condiciones de ejecución de la obra. Por ello se analizan distintas opciones de unión de ambas capas *en húmedo* (una capa realizada a continuación de la otra, empleando o no un retardador) o bien, *en seco-húmedo* (la capa de rodadura se vierte sobre un hormigón de base ya seco interponiéndose entre ambas una lechada de mortero con polímero).

Como punto de partida de este estudio se ha tomado una dosificación del hormigón poroso modificado con polímero similar a las utilizadas en los estudios previos de optimización (Capítulo 2). Ello nos permite obtener una contrastación de los resultados con los obtenidos anteriormente, si bien teniendo presente que en este caso los áridos son diferentes, habiendo sido suministrados por DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES S.A. (empresa constructora del tramo experimental). Esta campaña de ensayos se realizaron en la primavera-verano de 1991.

### 3.2.2.- Materiales utilizados

#### Áridos

Los áridos utilizados fueron suministrados en dos partidas diferentes. En ambos casos, se suministraron en dos fracciones denominadas: arena (0/5 mm) y gravilla (5/12 mm). La partida 2 tiene el mismo origen que la partida 1 pero fue sometida a un retamizado con el objeto de ajustarla a los diámetros nominales. El objeto de este tamizado era fundamentalmente el de evaluar la influencia de las finos presentes en la gravilla de la partida 1. En la Tabla 3.2 se ofrece los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos efectuados sobre dichas fracciones, en cada una de las dos partidas. El valor de la humedad natural de la arena fue del 1,5%.

Luz de malla (en mm)	Partida 1		Partida 2	
	Arena (0/5 mm)	Gravilla (5/12 mm)	Arena (0/5 mm)	Gravilla (5/12 mm)
25,4	100	100		
12,7	100	99		100
4,76	99	14	100	0
1,19	46	0,6	46	
0,59	18	0	18	
0,297	3,3	0	3,3	
0,149	0,5	0	0,5	
0,074	0,2	0	0,2	

Tabla 3.2.- Granulometría de los áridos utilizados en cada una de las dos partidas suministradas.



### Cemento

El cemento empleado fue el denominado tipo V según la norma UNE 80-301/88. La elección del mismo responde a un acuerdo conjunto de los integrantes del proyecto BRITE-EURAM citado, por entender que este tipo de cemento es el más adecuado, actualmente, para la construcción del tipo de pavimento de carreteras requerido.

### Polímero

El polímero utilizado fue el denominado FORTON COMPOUND VF 774, de la firma DSM Resins cuyas características y razón de su empleo ya se han presentado con anterioridad (Capítulo 2).

### Aditivos

En el hormigón seco compactado, se ha utilizado un aditivo con una doble función como plastificante y como retardador en el hormigón. La denominación comercial es RETRA-PLAST.

### **3.2.2.- Dosificaciones**

En base a la experiencia acumulada de los estudios de optimización anteriormente vistos, para esta fase se utilizó la dosificación que se presenta en la tabla 3.3 en ambas partidas de áridos. En dicha tabla se presenta, asimismo, la dosificación del hormigón seco compactado, utilizado para la fabricación de las probetas mixtas, en las que se ha estudiado la adherencia entre capas.

Componente	Hormigón poroso (en kg o l/m <sup>3</sup> )	Hormigón seco compactado (en kg o l/m <sup>3</sup> )
Gravilla (5/12 mm)	1400	825
Arena (0/5 mm)	100	1135
Cemento	250	310
Polímero	50	--
Aditivo	--	0,62
Agua	50	125

Tabla 3.3.- Dosificaciones empleadas para el hormigón poroso y el hormigón seco compactado (en kg o l/m<sup>3</sup>).

La baja dotación de agua en la dosificación de hormigón poroso, se debe a que el polímero se comercializa como solución acuosa al 50%, de manera que la cantidad total de agua aportada a un metro cúbico de mezcla es de 75 litros más la eventual humedad de los áridos.

### 3.2.3.- Tipos de series fabricadas

En ambas partidas (1 y 2) se han fabricado cuatro series diferentes, con la siguiente nomenclatura: A-HS-1, A-FT-2, A-FT-3 y A-FT-4, para la partida 1 y, A-HS-2, A-FT-5, A-FT-6 y A-FT-7, para la partida 2. De ellas las series A-HS-1 y A-HS-2 corresponden al hormigón seco compactado (nomenclatura HS).

La diferencia existente entre las series A-FT-2, A-FT-3, y A-FT-4 de la partida 1 y las series A-FT-5, A-FT-6, y A-FT-7 de la partida 2, estriba en el tiempo transcurrido entre la fabricación de las series A-HS-1 o A-HS-2 respectivamente (hormigón seco compactado) y la fabricación de las probetas mixtas (hormigón seco compactado + hormigón poroso). Estos tiempos fueron, respectivamente, de 1 hora 30 minutos, 6 horas y 24 horas.

En la tabla 3.4 se presentan las características de cada una de las series citadas así como el tipo de probeta utilizado y el número de ellas. En las series A-HS-1 o 2, las probetas cúbicas y prismáticas son de 10 cm de alturas en aras a incorporar con posterioridad 5 cm que simulen la capa de rodadura de hormigón poroso, por lo que en las series A-FT-i ya aparece toda la dimensión en altura de estas probetas (15 cm).

En las series A-FT-i, de ambas partidas, las 8 probetas cúbicas + las 2 probetas prismáticas de cada serie, se han dividido en dos grupos. En uno de estos grupos se ha dispuesto de un producto adherente y en el otro grupo no se ha dispuesto. El producto adherente utilizado consiste en una mezcla de las siguientes proporciones en peso: 70% cemento, 15% polímero, 15% agua. La dotación utilizada es de 2 litros por metro cuadrado.

### 3.2.4.- Procedimientos de ensayo y propiedades estudiadas

#### Fabricación y conservación.

El hormigón se ha fabricado en la central de hormigonado existente en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la E.T.S.I.C.C.P. de Barcelona (Ver características en Anejo 2). Las probetas cilíndricas se han fabricado mediante el martillo KANGO, mientras que las probetas prismáticas se han compactado por vibrocompresión en mesa vibrante con pesos dispuestos en la cara superior de las probetas. En el anejo 2 se detallan los métodos de ensayo

Las probetas sin polímero se han conservado en cámara húmeda a 20°C de temperatura (tolerancia de 2°C) y humedad superior al 95%; mientras que las probetas con polímero se han conservado en una cámara climática a la misma temperatura si bien con una humedad del 50% (tolerancia del 5 %).

Partida	Serie	Tipo de probeta	Número de probetas
1	A-HS-1	Cilíndrica 15x30 Cúbica 15x15x10 Prismática 15x10x60	12 en total 24 en total 6 en total
	A-FT-2	Cilíndrica 15x30 Cúbica 15x15x15 Prismática 15x15x60	12 en total 8 por serie 2 por serie
	A-FT-3		
	A-FT-4		
2	A-HS-2	Cilíndrica 15x30 Cúbica 15x15x10 Prismática 15x10x60	12 en total 24 en total 6 en total
	A-FT-5	Cilíndrica 15x30 Cúbica 15x15x15 Prismática 15x15x60	12 en total 8 por serie 2 por serie
	A-FT-6		
	A-FT-7		

Tabla 3.4.- Series utilizadas en la caracterización y estudio de la unión entre capas.

#### Medida de la consistencia

La medida de la consistencia se ha hecho conforme al procedimiento de ensayo ISO 4111 (Fresch concrete. Determination of consistency - Degree of compactibility) (Método de Waltz). Ello responde a que para la medida de la consistencia de hormigones tan secos como los que nos ocupan, el resultado del ensayo del cono de Abrams no es significativo, debido a que apenas se produce asiento.

#### Densidad aparente, porosidad y permeabilidad

La densidad aparente de las probetas se obtiene por cálculo a partir de su peso y del volumen del molde que la contiene, de acuerdo con la expresión dada en el anejo 2. Asimismo, la porosidad accesible de una probeta se obtiene por cálculo a partir de su peso, de su peso sumergido y del volumen del molde que la contiene, determinados según el procedimiento que se detalla en el anejo 2.

Para la determinación de la permeabilidad se utiliza el permeámetro existente en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la E.T.S.I.C.C.P. de Barcelona, diseñado y construido al efecto. Permite obtener la permeabilidad bajo distintos gradientes, lo cual resulta

conveniente dado que no se verifica la ley de Darcy. Una descripción más detallada del mismo puede verse en Tortajada (1985). En todo este estudio, cuando no se especifica el gradiente, se supone que la permeabilidad enunciada se ha obtenido bajo la carga de un centímetro de agua.

#### Resistencia a compresión, resistencia a tracción indirecta y módulo de elasticidad

La rotura a compresión se ha realizado según el procedimiento de ensayo UNE 83-304-84, mientras que para la obtención de la resistencia a tracción indirecta (ensayo brasileño) se ha seguido el procedimiento de ensayo descrito en la UNE 83-306-85.

Ante la falta de normativa española y ante la dificultad de obtener el módulo de deformación mediante un ensayo estático, debido a la textura abierta de la superficie (Ello dificulta poner elementos adheridos o bien poner puntos de fijación sin alterar las características), se ha utilizado un método mediante ultrasonidos para la determinación del módulo dinámico. Las expresiones empleadas para su obtención se presentan en el anejo 2.

#### Otras determinaciones sobre hormigón endurecido

En este estudio se prepararon diversas probetas compuestas (hormigón base y hormigón poroso modificado con polímero) de 15x15x60 (en cm) para ensayar a flexotracción con objeto de analizar cualitativamente la unión entre ambas capas.

Con objeto de evaluar indirectamente la resistencia al arrancamiento de estos hormigones se ha utilizado el ensayo cántabro, empleado por el MOPU para mezclas abiertas de tipo bituminoso. Con él se determina la pérdida en peso de una muestra tras un determinado número de vueltas en un tambor del ensayo de los Ángeles sin la existencia de las bolas en su interior. En el anejo 2 se presentan las características básicas del mismo. Por otro lado, para la caracterización de la respuesta mecánica de la sección de unión de ambos hormigones se ha desarrollado un método propio, en el que se simula la resistencia al corte mediante un ensayo a compresión. Las características del mismo así como su justificación se presentan en el anejo 2.

### **3.2.5.- Resultados obtenidos y análisis de los mismos**

#### Densidad, porosidad, permeabilidad

En la Tabla 3.5 se presentan los valores obtenidos de la densidad, porosidad, y permeabilidad, en las distintas series con polímero. Hay que tener presente que todas corresponden a la misma dosificación y, consecuentemente, los resultados que se obtienen son prácticamente coincidentes en todas las series, aunque procedan de dos partidas diferentes. Hay que resaltar que la amplitud del rango obtenido de la permeabilidad, hace que se deban considerar dichos valores, como equivalentes.

Serie	Densidad aparente (en t/m <sup>3</sup> )	Porosidad (en %)	Permeabilidad (en cm/seg)
A-FT-2	1,93	16	0,97
A-FT-3	1,91	14	0,45
A-FT-4	1,95	13	1,24
A-FT-5	1,93	14,8	0,34
A-FT-6	1,96	15,3	0,24
A-FT-7	1,93	12,3	0,28

Tabla 3.5.- Resultados obtenidos de la densidad aparente, porosidad y permeabilidad, en las series con polímero.

En cualquier caso estos resultados están muy influenciados por la compactación realizada en las probetas, ya que se obtienen valores de la densidad aparente claramente superiores al correspondiente de la masa fresca. (Una forma de evitar estos problemas es trabajar a peso constante, si bien esta forma de proceder es muy laboriosa ya que hay que pesar previamente la masa de cada probeta, por lo que no es usual hacerlo en aquellos casos en que no es estrictamente necesario como el estudio n° 1 que nos ocupa). Además estos valores serían poco recomendables para el tipo de aplicación utilizado ya que dan una porosidad algo baja. Así pues hay que plantear una serie posterior para analizar la influencia del grado de compactación.

#### Resistencia a compresión, resistencia a tracción indirecta y módulo de elasticidad

En la Tabla 3.6 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a compresión y a tracción indirecta. En ella se presentan los resultados correspondientes a 7 y a 28 días como media de los resultados obtenidos en tres probetas, y entre paréntesis, el valor de la desviación standard. Los resultados a 28 días de la partida 2, corresponden realmente a la edad de 22 días.

En dicha tabla puede observarse un ligero comportamiento diferenciado en ambas partidas en la resistencia a compresión, tanto en valores absolutos para 28 días como en valores relativos de la resistencia de 7 días en relación a la de 28 días. Ello puede responder, aparte de diferencias en el grado de compactación (lo cual es poco probable en este caso ya que todas se hicieron de la misma forma) o bien, a las diferencias en las curvas granulométricas de ambas partidas. Así, puede observarse que en la partida 2 que es más definida (no tiene finos la gravilla) el resultado es mejor que en la partida 1 con una notable cantidad de finos en la gravilla (14 %), lo cual conduce a peores resultados.



En relación a la resistencia a tracción indirecta, se observa que los valores absolutos son similares en ambos casos, lo cual indica que la granulometría tiene menor influencia en esta propiedad, debido a que sobre ella incide más el tipo y contenido de conglomerante (igual en ambos casos) y los puentes de unión (similares en ambos casos, condicionados por la dosificación). Otro aspecto a resaltar es que el porcentaje de la resistencia a tracción en relación a la de compresión aumenta a medida que disminuye el valor absoluto de la resistencia a compresión, lo cual está en línea con los resultados obtenidos para otros hormigones.

Partida	Serie	Resistencia a compresión (en MPa)		Resistencia a tracción (en MPa)		Módulo dinámico (en MPa)	
		7 días	28 días	7 días	28 días	$\nu = 0,20$	$\nu = 0,30$
1	A-HS-1	19,3 (1,73)	27,4 (4,39)	2,1 (0,19)	2,3 (0,29)		
	A-FT-2	15,2 (0,71)	13,0 (5,56)	2,0 (0,08)	2,4 (0,04)	19.736	16.290
	A-FT-3	14,9 (2,63)	18,7 (1,20)	1,8 (0,14)	2,8 (0,25)	23.263	19.201
	A-FT-4	15,0 (1,30)	16,3 (10,2)	2,0 (0,07)	2,4 (0,43)	23.067	19.039
2	A-HS-2	--	32,0 (2,00)	--	3,1 (0,33)		
	A-FT-5	13,3 (0,57)	21,3 (0,62)	1,6 (0,02)	2,6 (0,33)	18.469	
	A-FT-6	13,5 (1,60)	21,9 (0,20)	1,9 (0,05)	2,8 (0,36)	18.078	
	A-FT-7	13,0 (1,10)	20,9 (0,79)	1,6 (0,06)	2,2 (0,35)	19.141	

Tabla 3.6.- Valores de la resistencia a compresión, de la resistencia a tracción indirecta y del módulo dinámico de elasticidad (en MPa).

Asimismo, en la citada tabla 3.6 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de determinación del Módulo de Elasticidad dinámico por el método de los ultrasonidos (Este

tipo de determinación se ha hecho para tener algún tipo de información ante las dificultades de un ensayo estático). La determinación del módulo a partir de la velocidad obtenida del ensayo, se ha efectuado para dos valores distintos del coeficiente de Poisson, siendo probablemente el más cercano al valor real del hormigón poroso, el 0.2.

Los resultados obtenidos muestran asimismo pequeñas diferencias de comportamiento entre ambas partidas, obteniéndose un menor módulo dinámico para la partida 2, la cual corresponde a la que tiene menores finos.

En base a estos resultados y a otros obtenidos en trabajos previos ajenos al proyecto (Rosell et al, 1987), cabe señalar que, dentro del rango de resistencias en el que nos movemos y para la edad de 28 días, el orden de magnitud del módulo estático de deformación longitudinal de un hormigón poroso podría responder a la siguiente expresión:

$$E_c = 1.000 * f_c \quad (\text{ en MPa }) \quad (3.1)$$

donde:

$E_c$  es el módulo estático de deformación longitudinal  
 $f_c$  es la resistencia a compresión del hormigón.

#### Rotura a corte por flexocompresión y por compresión directa

Para los ensayos de flexotracción las probetas se fabricaron al revés de como se realiza el ensayo. Esto es, primero se fabrica el hormigón de base y luego se dispone una capa de unos 5 centímetros de hormigón poroso modificado con polímeros; mientras que en el ensayo se sitúa la capa de hormigón poroso en la parte inferior de la probeta, tal como puede verse en la figura 3.1. La velocidad de carga durante el ensayo fue de 300 kg/seg.

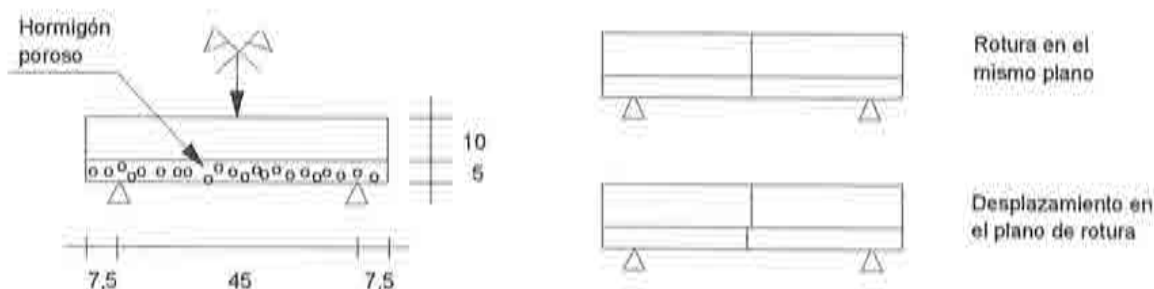


Figura 3.1.- Forma ensayo a flexotracción y tipos de rotura producidos.

Estas pruebas se realizaron con cinco probetas de tres series. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.7. En ella puede verse el tipo de unión (existencia de lechada o no), la carga de rotura, las dimensiones reales de la capa de hormigón poroso, así como unas

observaciones respecto a si la rotura se producía en un sólo plano o bien se producía en dos planos correspondiendo a cada una de las capas (Ver figura 3.1).

Serie	Lechada de unión	Carga de rotura (en kg)	Dimensión capa de hormigón poroso (en cm)	Observaciones
A-FT-2	Con	2.875	5,5	Buena adherencia Una sola línea de rotura
A-FT-4	Con	2.815	5,5	Buena adherencia Una sola línea de rotura
A-FT-4	Sin	2.470	5,5	Desplazamiento línea rotura en interfase
A-FT-5	Con	2.695	5,5	Buena adherencia Una sola línea de rotura
A-FT-5	Sin	2.714	6,5	Desplazamiento línea rotura en interfase

Tabla 3.7.- Resultados del ensayo a flexotracción de las probetas mixtas.

Estos resultados muestran que la carga de rotura es del mismo rango en todos los casos, lo cual de alguna forma evidencia que el mecanismo de inicio de la rotura está gobernado por las características de los hormigones que constituyen las probetas y, no tanto, por el tipo de unión. Ésta incide en la posterior formación de uno o dos planos de rotura. Por otro lado las pequeñas variaciones que se dan para un tipo u otro de rotura indica que nos encontramos en valores próximos a la frontera entre ambos casos.

En la tabla 3.8 se presentan los resultados obtenidos para las probetas cúbicas de 15x15x15 cm compuestas de una base de hormigón compactado y una capa de hormigón poroso. Los valores de la tensión tangencial de la Tabla 3.8, se obtienen dividiendo la carga de rotura por la superficie de la sección o secciones por donde rompe la probeta. La distribución de tensiones tangenciales en las caras de rotura es prácticamente uniforme (salvo en los extremos), según se desprende del estudio realizado mediante el método de los elementos finitos, que se adjunta en el anejo 1. El valor de la tensión tangencial dado en esta tabla es meramente indicativo y debe utilizarse para valorar una solución respecto a otra, pero no tanto en valores absolutos.

Partida	Serie	Tensión tangencial de rotura (en Mpa)				Tiempo de desfase
		Sin producto adherente		Con producto adherente		
1	A-FT-2	4,53 (0,44)		4,21 (0,71)		1 h 30 m
	A-FT-3	1,43 (0,29)		5,05 (1,13)		6 horas
	A-FT-4	1,58 (0,72)		4,76 (0,70)		24 horas
2	A-FT-5	4,15 (0,72)	4,6 (0,70)	5,00 (0,33)	4,5 (0,57)	1 h 30 m
	A-FT-6	2,40 (0,50)	3,3 (0,73)	3,90 (0,46)	3,3 (1,30)	6 horas
	A-FT-7	1,80 (0,80)	2,1 (0,63)	4,70 (0,70)	3,7 (0,80)	24 horas

Tabla 3.8.- Medida de la adherencia entre capas a través de un ensayo de corte por compresión.

Para las series correspondientes a la segunda partida se realizó este mismo ensayo, si bien, con probetas cilíndricas. El equipo utilizado se presenta en el anejo 1 y los resultados obtenidos de forma análoga a la descrita anteriormente se presentan en la segunda columna en que se ha dividido cada una de las opciones de estas series.

En dicha tabla puede observarse que, para ambas partidas y en el caso de no emplear producto adherente, existe un salto entre la solución correspondiente al tiempo de desfase entre la fabricación de hormigones, de 1 h 30 m y las otras soluciones (6 y 24 horas). Así pues, en el caso de no emplear productos adherentes (*solución húmedo-húmedo*) el tiempo de desfase debe ser limitado.

La otra solución constructiva (*solución seco-húmedo*) presenta resultados similares en todas las series y partidas. Esta solución es mucho más versátil desde un punto de vista constructivo ya que independiza la ejecución de las dos capas.

Las tendencias señaladas se muestran de forma análoga en ambos tipos de probetas utilizados (cúbicas y cilíndricas). Por ello parece conveniente utilizar la probeta cúbica por la facilidad de ensayo que representa, si bien no se descarta poder utilizar la otra solución,

advirtiéndolo en cualquier caso el carácter orientador de este tipo de ensayo.

### 3.3.- ESTUDIO N° 2

#### 3.3.1.- Objeto del estudio

El objeto del presente estudio es el de determinar la sensibilidad de las características y propiedades del hormigón poroso modificado, al mayor o menor contenido de polímero, con el fin de optimizar su dotación. Ello obedece a la alta repercusión económica que supone el precio del polímero en el hormigón poroso.

Para el presente estudio se han empleado los mismos materiales que se han señalado en el apartado 3.3.2, los cuales han sido aportados por la empresa constructora. Los procedimientos de ensayo seguidos son los mismos que se han referenciado en el apartado 3.3.3 y que se incluyen en el anejo 2.

#### 3.3.2.- Dosificaciones

Dado el objetivo concreto de intentar disminuir el contenido de polímero en la dosificación del hormigón poroso modificado, se han estudiado tres dosificaciones intermedias entre la del tramo de ensayo, y la de dotación nula. En la Tabla 3.9 se muestran estas dosificaciones en kg. por metro cúbico de hormigón. En ella puede verse que la cantidad de polímero va de 0% (hormigón de referencia, serie A-SP-6) hasta un 20% del contenido de cemento (serie A-FT-11).

Componente	A-SP-6	A-FT-8	A-FT-9	A-FT-10	A-FT-11
Arido 5/12	1400	1400	1400	1400	1400
Arido 0/5	100	100	100	100	100
Cemento	250	250	250	250	250
Polímero	--	20	30	40	50
Agua	80	70	65	60	55

Tabla 3.9.- Dosificaciones empleadas (en kg ó litros /m³).



La menor dotación de agua de las series con polímero se debe a que éste se comercializa como solución acuosa al 50%, de manera que la cantidad total de agua aportada a un metro cúbico de mezcla es de 80 litros más la eventual humedad de los áridos. Con cada una de las dosificaciones presentadas en la Tabla 3.9 se ha fabricado una serie compuesta de 15 probetas cilíndricas de 15x30 (en cm) a las que se han realizado los ensayos descritos en el siguiente apartado.

### 3.3.3.- Resultados obtenidos y análisis de los mismos

#### Densidad, porosidad, permeabilidad

En la Tabla 3.10 se ofrecen los valores obtenidos de la densidad, porosidad, permeabilidad y consistencia. En estas series se trabajó a peso de masa fresca constante con el fin de obtener una densidad aparente similar, tal como se refleja en la citada tabla. Con ello se pretendía, asimismo, alcanzar valores de la porosidad superiores a los obtenidos en el estudio anterior, cara a conseguir uno de los requisitos usuales de proyecto (Ver capítulo 6). En las series A-FT-10 y A-FT-11 no fue posible medir la permeabilidad dado que las probetas quedaron colmatadas en su parte inferior debido al escurrimiento del mortero, tal y como se muestra en la fotografía que se adjunta (Figura 3.2). En la cual a medida que se aumenta el porcentaje de polímero se produce una mayor colmatación.

Serie	Densidad (en t/m <sup>3</sup> )	Porosidad (en %)	Permeabilidad (en cm/s)	Consistencia
A-SP-6	1,77	21	1,87	--
A-FT-8	1,76	26	2,69	1,13
A-FT-9	1,79	22	1,61	1,07
A-FT-10	1,77	22	--	1,06
A-FT-11	1,80	22	--	1,04

Tabla 3.10.- Valores de la densidad, porosidad, permeabilidad y consistencia Walz.

Los resultados obtenidos de la consistencia Walz son coherentes con el hecho de que si bien el contenido de agua es el mismo en todas las amasadas, como se ha dicho anteriormente, la mayor presencia de polímero conlleva una mayor viscosidad del material, que se traduce en una menor consistencia.



Figura 3.2.- Estado superficial de las probetas con elevado porcentaje de polímero.

Resistencia a compresión, resistencia a tracción indirecta y módulos de deformación estáticos y dinámicos

En la Tabla 3.11 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a compresión, resistencia a tracción indirecta y módulos de deformación longitudinal dinámico y estático. Estos resultados se han obtenido, para las edades de 7 y 28 días, como media de los resultados correspondientes a tres probetas. Los valores entre paréntesis de la citada tabla corresponden al valor de la desviación standard.

La serie A-SP-6 corresponde a una modificación de las presentadas en el capítulo anterior, como consecuencia de la experiencia obtenida hasta ese momento. Los resultados obtenidos en la misma son similares a los obtenidos con las series con polímeros en lo que hace referencia a la resistencias a compresión, si bien difieren de aquellas para la resistencia a tracción indirecta y módulo de deformación. Estas diferencias obedecen a que el polímero contribuye por un lado en una mejor resistencia a tracción y a una disminución del módulo de deformación, resultante del menor módulo de deformación del propio polímero.

Las series A-FT-8, A-FT-9 y A-FT-10 muestran pequeñas diferencias en los resultados, lo que de alguna forma refleja la posible existencia de un valor óptimo en el contenido de polímero, superado el cual, las propiedades del hormigón resultante varían poco. Esto puede ser cierto en base a las propiedades aquí analizadas si bien entendemos puede variar algo en base a otros requisitos tales como: durabilidad frente a sales anticongelantes, ciclos hielo-deshielo, etc. Este planteamiento debería tenerse presente para definir una dosificación óptima en una aplicación concreta.



En la serie A-FT-11 se han obtenido unos resultados que están por debajo de los valores esperados, lo cual puede responder a un probable mal estado del polímero utilizado para esta serie. En efecto, para la fabricación de las tres primeras series se utilizó un polímero almacenado en condiciones óptimas de estanqueidad. Sin embargo la serie A-FT-11 se fabricó con un resto de polímero almacenado en un recipiente que, si bien también presentaba buena estanqueidad, la relación entre su capacidad (unos 50 litros) y la poca cantidad de polímero que contenía, puede haber favorecido un proceso de degradación.

Series	Resistencia a compresión (en MPa)			Resistencia a tracción indirecta (en MPa)		Módulo de deformación (en MPa)	
	7 días	28 días	96 días	7 días	28 días	Dinámico	Estático
A-SP-6	10,4 (0,78)	14,6 (1,00)	16,4 (**)	1,2 (0,067)	1,5 (0,18)	24.300 27.400	14.000 17.300
A-FT-8	11,8 (0,88)	12,9 (0,64)	15,3 (*)	1,8 (0,13)	2,1 (0,13)	13.100	11.600
A-FT-9	11,7 (0,83)	16,3 (0,83)	15,9 (*)	1,6 (0,29)	2,2 (0,35)	19.700	14.200
A-FT-10	12,3 (0,55)	16,6 (1,51)	18,3 (*)	1,5 (0,094)	2,2 (0,22)	17.900	12.800
A-FT-11	7,2 (1,02)	9,4 (1,73)	12,3 (*)	1,3 (0,23)	2,0 (0,043)	17.300	7.200

(\*) Datos obtenidos en una sola probeta.

(\*\*) Dato medio de dos probetas a 125 días (17,9 y 14,0 MPa).

Tabla 3.11.- Valores de la resistencia a compresión y a tracción indirecta.

Para tener una referencia de los resultados que podían esperarse de la serie A-FT-11, se han añadido a la Tabla 5.2 los valores obtenidos en el estudio de la fórmula de trabajo para el tramo de ensayo, que se ofrece en el Documento 2, de las series A-FT-5, A-FT-6 y A-FT-7, fabricadas con la misma dosificación que la A-FT-11. En general, el resto de resultados son los previsibles, observándose sobre todo un aumento de la resistencia a tracción con la presencia del polímero.

Con los resultados expuestos, se ha puesto de manifiesto la posibilidad de reducir la dotación de polímero sin pérdida excesiva de características resistentes, principalmente a tracción indirecta. El contenido óptimo de polímero deberá establecerse en cada caso pues será función de la dosificación que se utilice, y también de los resultados que se desea

obtener. En el caso del presente estudio puede afirmarse que la serie A-FT-9, con una dotación de polímero de 30 litros por  $m^3$ , presenta un ahorro del mismo, del orden del 40%, compatible con unos resultados aceptables.

### 3.4.- ESTUDIO N° 3

#### 3.4.1.- Objeto

El objeto del presente estudio es analizar la influencia de la densidad aparente en las características mecánicas del hormigón endurecido. Los materiales componentes utilizados en este estudio corresponden a las calizas provenientes del macizo de Garraf, con las que se había trabajado con anterioridad. La dosificación de esta serie así como los materiales componentes son los mismos que los definidos en la serie A-SP-6. La división en dos series responde a razones de tipo de organización del trabajo en el laboratorio.

#### 3.4.2.- Resultados obtenidos y análisis de los mismos

En la Tabla 3.12 se presentan los resultados obtenidos de la resistencia a compresión y a tracción indirecta, a distintas edades, y para distintos valores de la densidad aparente: 1,70, 1,80 y 1,90  $t/m^3$ . Asimismo se incluye los resultados de densidad, porosidad y permeabilidad. Los resultados de esta serie se han presentado previamente en el informe n° 4 del proyecto de investigación citado.

Densidad aparente planteada	Resistencia a compresión	Resistencia a tracción indirecta	Densidad aparente obtenida	Porosidad (en %)	Permeabilidad (en cm/seg)
1,70	7,7 (1,01)	0,98 (0,53)	1,65	34	5,92
1,80	14,6 (1,00)	1,46 (0,18)	1,77	29	3,69
1,90	15,7 (1,35)	1,84 (0,19)	1,86	24	2,10

Tabla 3.12.- Resultados de distintas características del hormigón correspondiente a la serie A-SP-7 con diferentes valores de la densidad aparente.

Los resultados de este estudio responden a las previsiones iniciales del mismo. Así a medida que aumenta la densidad aparente, aumenta tanto la resistencia a compresión como la resistencia a tracción indirecta, mientras que disminuye la porosidad y la permeabilidad como consecuencia de un mayor grado de compactación. Por otro lado, los resultados obtenidos muestran que para densidades aparentes reales por debajo de 1,80  $t/m^3$  las características del hormigón resultante son inadecuadas, por lo que el mismo no debería



utilizarse en la aplicación de capa de rodadura dentro de un pavimento.

Aparte de los resultados mostrados en esta tabla, hay que señalar que, para la densidad aparente de  $1,80 \text{ t/m}^3$ , se obtuvieron resultados de la resistencia a compresión a la edad de 137 días obteniéndose un valor medio de nueve probetas de 16,3 MPa con una desviación standard de 2,8 MPa. Ahora bien, de estas nueve probetas, cuatro se mantuvieron en la cámara húmeda hasta el momento de rotura, y cinco estuvieron diez días en cámara climática antes de la rotura. Ello se hizo con el fin de analizar la influencia del grado de humedad de la probeta en el momento del ensayo a compresión. Los resultados obtenidos de cada una de las probetas se presenta a continuación :

- Cámara Húmeda: 13,6, 16,8, 11,4 y 16,0 MPa.  
Valor medio: 14,6 MPa. Desviación standard: 2,6 MPa.
- Cámara Climática: 20,1, 20,5, 15,7, 16,6 y 16,3 MPa.  
Valor medio: 17,8 MPa. Desviación standard: 2,3 MPa.

El tratamiento estadístico parece indicar que se trata de dos poblaciones distintas. Puesto que el único tratamiento diferencial que han sufrido las probetas es su conservación durante los últimos diez días, los resultados anteriores vendrían a demostrar la importancia de ese extremo para estandarizar resultados, probablemente superior en un hormigón poroso respecto a un hormigón convencional, dada la mayor superficie específica expuesta a la atmósfera.

### **3.5.- ESTUDIO N° 4**

#### **3.5.1.- Objeto del estudio**

Dada la importante repercusión que la cantidad de polímero tiene en el coste del hormigón, el objeto de este estudio es evaluar la influencia del contenido de polímero en las propiedades del hormigón resultante. Para ello se trabajó con seis dosificaciones distintas, con contenido de polímero variable entre 0 y 25 litros por metro cúbico. Hay que recordar que 25 litros es la cantidad máxima utilizada en las dosificaciones previas lo cual debe servir de referencia. Las características de este estudio se han presentado previamente en el informe n° 5 del proyecto de investigación citado.

#### **3.5.2.- Materiales utilizados**

Para el presente estudio, además del agua potable de la red urbana de Barcelona, se han utilizado los siguientes componentes:

- Áridos calizos del macizo del Garraf, en dos fracciones limitadas por los tamaños 0/5 y 5/12 mm.
- Cemento tipo V según la norma UNE 80-301/88. La elección del mismo obedece a ser este tipo de cemento el considerado como más adecuado actualmente para la

construcción de pavimentos de hormigón.

- El polímero utilizado es el denominado FORTON COMPOUND VF 774, de la firma DSM Resins, cuyas características ya se han presentado con anterioridad.

Puede observarse que este estudio es previo a la realización del tramo experimental del Culebro, por lo que se utilizaron áridos de la zona de Barcelona.

### 3.5.3.- Dosificaciones

En la Tabla 3.13 se muestra el conjunto de dosificaciones empleadas en este estudio, en el que manteniendo fijas las cantidades de gravilla, arena y cemento, se hace variar la cantidad de polímero de tal forma que la cantidad de agua sea constante.

Serie	Gravilla	Arena	Cemento	Polímero	Agua
A-SP-8	1400	100	250	-	80,0
A-FT-12	1400	100	250	5	77,5
A-FT-13	1400	100	250	10	75,0
A-FT-14	1400	100	250	15	72,5
A-FT-15	1400	100	250	20	70,0
A-FT-16	1400	100	250	25	67,5

Tabla 3.13.- Dosificaciones empleadas (en kg o l/m<sup>3</sup>).

De cada una de las series citadas se han fabricado 12 probetas cilíndricas de 15x30 (en cm), de las cuales: 3 probetas se utilizan para la determinación de la densidad, la porosidad y la permeabilidad, 3 probetas para la determinación de la resistencia a compresión, 3 probetas para la determinación de la resistencia a tracción indirecta (ensayo brasileño) y 3 probetas para la determinación del ensayo cántabro.

### 3.5.4.- Resultados obtenidos

A continuación, en la tabla 3.14 se muestran los resultados obtenidos de la densidad aparente, porosidad, permeabilidad, resistencia a compresión y resistencia a tracción indirecta a la edad de 28 días, de las probetas correspondientes a estas series.



Serie	Densidad (en t/m <sup>3</sup> )	Porosidad (en %)	Permeabilidad (en cm/s)	Resistencia a compresión	Resistencia a tracción indirecta
A-SP-8	1,73	32,0	7,38	12,2	1,47
A-FT-12	1,70	33,0	3,87	12,0	1,46
A-FT-13	1,81	29,0	7,43	13,8	1,59
A-FT-14	1,88	26,2	2,20	13,6	2,00
A-FT-15	1,83	28,1	5,53	15,2	1,99
A-FT-16	1,91	24,9	2,54	22,5	2,62

Tabla 3.14.- Influencia del contenido de polímero en las propiedades de los hormigones resultantes.

Los resultados presentados en la tabla 3.14 no son uniformes al no corresponder a probetas fabricadas a peso constante. En cualquier caso puede observarse que el aumento de la cantidad de polímero no influye de forma muy significativa en las propiedades de los hormigones resultantes. Ello parece mostrar la existencia de un contenido óptimo que produce una especie de saturación, entendiéndose como tal aquel porcentaje de polímero que una vez superado no influye de forma significativa en las propiedades resultantes. Este resultado no debe generalizarse sin un estudio más detallado de otras características, tales como comportamiento ante sales de deshielo, etc., ya que para este tipo de propiedades, las características y contenido del polímero pueden tener una gran incidencia.

#### Pérdida por desgaste "Ensayo cántabro"

Dentro de este estudio se consideró conveniente profundizar en la posible influencia del número de vueltas dentro del ensayo cántabro así como en el estado de las probetas en dicho ensayo. Como consecuencia de dicho trabajo, en la tabla 3.15 se presenta la pérdida en peso porcentual obtenida para las probetas de las distintas series, en condiciones secas, para tres valores diferentes del número de vueltas empleadas en el ensayo cántabro (150, 300 y 450 vueltas).

En dicha tabla puede observarse, en primer lugar, que la serie sin polímero da lugar a unas pérdidas significativamente mayores que las series con polímero. De ello se deduce el importante factor ligante frente al arrancamiento que representa el polímero. Dentro de las series con polímero, este resultado se mantiene y así para mayores contenidos de polímero, la pérdida en peso en relación al número de vueltas disminuye, si bien también puede observarse el grado de saturación referido anteriormente.

Serie	Peso Inicial (en gramos)	% pérdida en peso en función del número de vueltas		
		150	300	450
A-SP-8	3059,9	25,3	42,2	54,3
A-FT-12	3144,7	20,0	34,7	46,5
A-FT-13	3404,5	15,7	27,3	37,1
A-FT-14	3643,0	12,2	21,3	29,5
A-FT-15	3481,4	14,0	23,1	29,8

Tabla 3.15.- Resultados del ensayo cántabro en condiciones secas frente a diferente número de vueltas.

De los resultados mostrados, parece desprenderse que el número de vueltas en si mismo no es un factor determinante. Esto es, no parece apreciarse la existencia de un número de vueltas a partir del cual los resultados varíen notablemente.

Tal como se ha dicho, otro de los parámetros estudiados, fue la influencia del contenido de humedad de las probetas, con respecto al ensayo cántabro. En la Tabla 3.16 se presentan los resultados obtenidos de la pérdida en peso porcentual, para las probetas de las distintas series, en condiciones secas y húmedas y un número fijo de vueltas (300 vueltas).

Serie	Condiciones secas		Condiciones húmedas	
	Peso inicial (en gramos)	% pérdidas en peso	Peso inicial (en gramos)	% pérdidas en peso
A-SP-8	3251,6	39,1	3405,8	30,5
A-FT-12	3105,6	30,0	3176,8	33,6
A-FT-13	3106,3	31,0	3308,9	29,8
A-FT-14	3510,2	23,5	3548,9	24,8
A-FT-15	3414,6	20,4	3309,7	29,1

Tabla 3.16.- Resultados del ensayo cántabro en condiciones secas y húmedas.

Los resultados contenidos en dicha tabla muestran que los mismos son prácticamente independientes del contenido de polímero, si bien el resultado correspondiente a la serie A-FT-15 podría indicar lo contrario. Ello debe animar a profundizar en esa dirección, aún teniendo presente el carácter puntual de dicho resultado. Asimismo, estos resultados redundan en la idea de la existencia de un contenido de polímero correspondiente a un grado de saturación, a partir del cual la mejora de prestaciones no es rentable frente a la repercusión económica del incremento de polímero.

### 3.6.- ESTUDIO N° 5

#### 3.6.1.- Objetivo de los trabajos

El objeto de estos trabajos es realizar diversos estudios complementarios en relación al hormigón empleado en el tramo experimental del Culebro. Como objetivos específicos caben señalar los siguientes:

- Evaluar la unión obtenida entre ambos hormigones.
- Analizar la influencia del grado de compactación en las características del hormigón.
- Caracterizar térmicamente el hormigón empleado.

#### 3.6.2.- Dosificación del tramo experimental del Culebro

En base a los trabajos realizados con anterioridad y cuyos resultados se han presentado en el capítulo precedente y en el presente capítulo, para la realización del tramo experimental del Culebro se aprovecharon algunas de las conclusiones obtenidas, tal como puede apreciarse en la tabla 3.17 en la que se presenta la dosificación empleada en el Culebro.

Componente	Cantidad (en kg o l/m <sup>3</sup> )
Gravilla	1445
Arena	100
Cemento	260
Agua	75
Polímero	20

Tabla 3.17.- Dosificación empleada en el tramo experimental del Culebro.



En esta tabla, puede observarse una disminución de la cantidad de polímero empleada, así como pequeños retoques en la cantidad de los áridos. La arena empleada era proveniente de gravera de tipo silíceo.

### 3.6.3.- Resultados correspondientes a probetas testigos

Si bien en el siguiente capítulo se muestran aspectos relativos a la construcción del tramo experimental del Culebro, en este apartado se muestran los resultados obtenidos en testigos extraídos del tramo experimental. Estos testigos se han sometido al ensayo de resistencia a corte para obtener una medida de la capacidad de adherencia que presentan la capa delgada de hormigón poroso y la losa de hormigón convencional (Estos ensayos se realizaron el día 19 de febrero de 1992).

Los resultados correspondientes a estos ensayos se presentan en la tabla 3.18 donde también se muestran los valores obtenidos de la densidad y la porosidad de algunas de las probetas (Estos ensayos se realizaron el día 1 de abril de 1992).

Referencia ramal/carril	Fecha de fabricación	Carga de rotura ( en Kg)	Densidad Aparente (t/m <sup>3</sup> )	Porosidad (%)
norte/lento	6/11/91	1991	--	--
	19/11/91	227	--	--
	25/11/91	352	--	--
norte/rápido	19/11/91	583	1,74	36
	19/11/91	668		
	19/11/91	841		
sur/lento	18/11/91	606	1,93	21
	18/11/91	841	1,80	32
	18/11/91	574		
sur/rápido	5/11/91	(*)	--	--
	5/11/91	1233	--	--

(\*) La probeta se despegó antes de ensayarla

Tabla 3.18.- Rotura a corte, densidad y porosidad de los testigos extraídos del firme del Arroyo del Culebro.

Los valores de la carga de rotura presentan una importante dispersión, justificada en cierta medida, por la sensibilidad del resultado de un testigo a la dotación de la lechada en la zona donde se ubica el mismo.

Asimismo conviene resaltar la dispersión existente en la porosidad así como lo elevado de algunos de los valores de la misma, respecto de las densidades que se obtienen. Estos valores contrastan con los obtenidos en probetas moldeadas durante el control de la realización, por parte de GEOCISA<sup>1</sup>. Ello puede reflejar diferentes grados de compactación entre las probetas moldeadas y la aplicación en obra, con consecuente reflejo en las probetas testigo.

### 3.6.4.- Resultados correspondientes a probetas moldeadas

Cara a analizar la relación existente entre los resultados de los ensayos de control citados y el grado de compactación, con posterioridad a la realización del tramo experimental, si bien con los mismos componentes y dosificación, se fabricó en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la U.P.C. una serie con las características siguientes:

- Un ensayo de consistencia Waltz (ISO 4111).
- Cuatro densidades aparentes  $DA = 1,75, 1,85, 1,95$  y  $2,05 \text{ t/m}^3$ . En cada una de ellas se fabricaron 2 probetas para los ensayos de resistencia a compresión, otras 2 probetas para los ensayos de resistencia a tracción indirecta y 1 probeta para los ensayos de permeabilidad, porosidad y peso específico.
- Probetas cilíndricas y losetas para caracterización térmica.

Hay que llamar la atención de que en estos ensayos las probetas fueron fabricadas a peso constante con el fin de evitar dispersiones. La conservación de las mismas fue en cámara climática.

#### 3.6.4.1.- *Caracterización mecánica y física*

En la tabla 3.19 pueden observarse los resultados correspondientes a la resistencia a compresión, resistencia a tracción indirecta, porosidad y permeabilidad de probetas moldeadas con análogas características a las del tramo experimental del Culebro.

En la figura 3.3 puede observarse los resultados correspondientes a la resistencia a compresión a la edad de 40 días (en  $\text{kp/cm}^2$ ) para los diferentes valores de la densidad aparente (en  $\text{t/m}^3$ ). A dichos resultados se ha ajustado una regresión lineal por mínimos cuadrados, obteniéndose un valor del coeficiente de regresión de 0,98.

Hay que resaltar el hecho de que para valores altos de la densidad aparente se alcanzan valores elevados de la resistencia a compresión, por encima del que se obtendría en un hormigón convencional con la dotación de cemento señalada. Ello puede reflejar, en cierta medida, el hecho de que la estructura de la matriz porosa contribuye en la resistencia a

---

<sup>1</sup> DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES, S.A.

Proyecto BRITE/EURAM BE-3415/89: Tramo experimental con rodadura de hormigón poroso. Enero 1992

compresión, no siendo extrapolables comportamientos de hormigones convencionales.

Densidad Aparente (en t/m <sup>3</sup> )	Resistencia a compresión (en kp/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a tracción indirecta (en kp/cm <sup>2</sup> )	Porosidad (en %)	Permeabilidad (en cm/s)
1,75	117	12,1	31,0	3,8
1,85	148	17,4	27,2	3,6
1,95	231	21,6	21,5	0,8
2,05	285	22,5	17,0	No pasa

Tabla 3.19.- Resultados de las probetas moldeadas correspondientes al tramo experimental del Culebro.

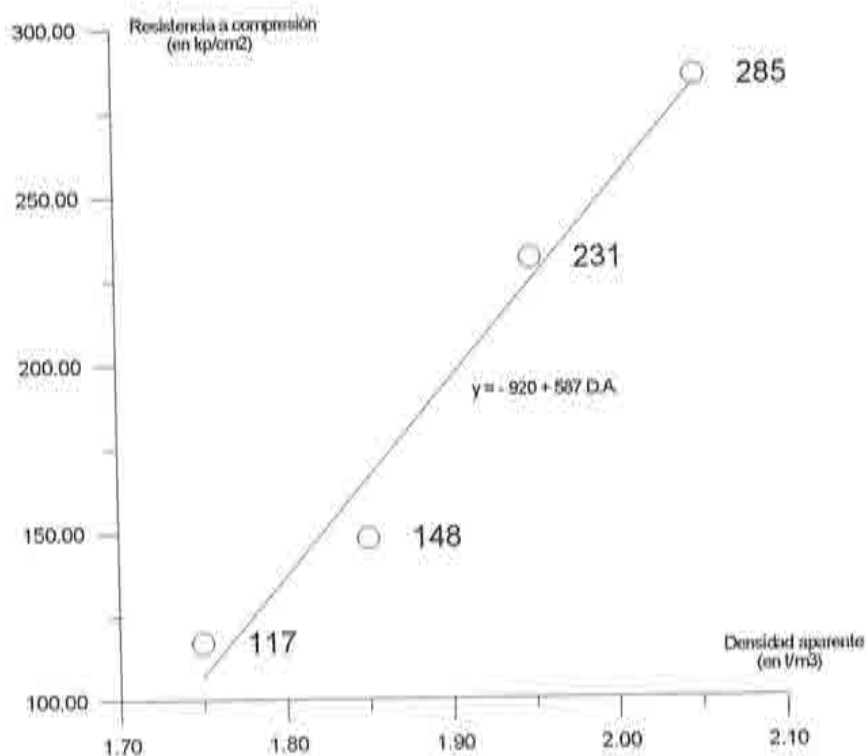


Figura 3.3.- Influencia de la densidad aparente en la resistencia a compresión.



Siguiendo un proceso análogo para la resistencia a tracción indirecta y la porosidad se obtienen las siguientes regresiones lineales:

$$R_{ct} = - 49,2 + 35,6 * D.A.$$

$$n.p. = 114,8 - 47,7 * D.A.$$

con unos coeficientes de correlación de 0,96 y 0,99, respectivamente.

Ambos resultados muestran comportamientos de acuerdo con lo previsto. Así a medida que aumenta la densidad aparente aumenta la resistencia a tracción indirecta mientras que disminuye la porosidad. En cuanto a la permeabilidad, puede observarse que superado un cierto valor la disminución de la permeabilidad es muy rápida no siguiendo una ley lineal. El rango en el que se encuentra este valor se sitúa al entorno de 1,9 t/m<sup>3</sup> de la densidad aparente.

#### 3.6.4.2.- Caracterización térmica

Tal como se ha dicho, con esta dosificación se prepararon distintas probetas para la caracterización térmica del hormigón realizada por el departamento de Física Aplicada y Electrónica de la Universidad de Barcelona. Los objetivos perseguidos por estos ensayos eran la determinación de las siguientes propiedades:

- Densidad:  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>)
- Conductividad térmica:  $\lambda$  (W/m grad)
- Calor específico:  $c$  (kcal/kg grad) a través de la difusividad  $\alpha$  (m<sup>2</sup>/h)
- Comportamiento frente a la radiación solar: absorptancia y reflectancia (albedo)

Para la determinación de estas propiedades, se prepararon dos probetas tipo losa de dimensiones 0,5 × 0,5 × 0,15 (en metros). Esta serie de ensayos fueron realizados en el Laboratori General d'Assaigs i Investigacions de la Generalitat de Catalunya y en los laboratorios de la Facultad de Física de la Universidad de Barcelona. Los resultados obtenidos, para las distintas propiedades físicas enunciadas de estas probetas, se presentan a continuación, en la tabla 3.20. La primera de estas probetas fue ensayada el día 13 de mayo de 1993, mientras que la segunda de ellas, se ensayó una semana después (20 de mayo de 1993).

En ella puede verse que la **densidad**  $\rho$  del hormigón de ambas probetas se sitúa en un valor medio de 1761 kg/m<sup>3</sup>. Este valor está dentro del rango en el que este hormigón puede ser representativo de la aplicación que se está estudiando.

Probeta Nº	Masa (en kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad Térmica		Difusividad térmica m <sup>2</sup> /h	Calor específico kcal/kg grad
			W/m grad	kcal/h m grad		
1	65.674	1751	1,23	1,06	0,0027	0,22
2	66.443	1772	1,01	0,87	0,0025	0,20

Tabla 3.20.- Resultados de distintas propiedades físicas de las probetas de caracterización térmica

La determinación de la **conductividad térmica**  $\lambda$  se ha efectuado por medición del flujo térmico que atraviesa la probeta desde una de las caras a mayor temperatura (30°C) hacia la otra cara que se mantiene a temperatura inferior (10°C), de acuerdo con el procedimiento descrito en el anejo 2.

En los resultados obtenidos, se observa una diferencia del orden del 20 % entre los valores de la conductividad térmica para ambas probetas, las cuales, a su vez, presentan densidades muy similares. Hay que hacer notar, que si se aplicase la ley de variación de la conductividad con la densidad obtenida en trabajos similares sobre hormigones de presa, de densidades notablemente superiores, se obtendría:

$$\text{Ley de variación: } \lambda = 0,826 \times 10^{-3} \rho - 0,407 \quad \lambda : \text{W/ m grad}$$

donde:  $\lambda$  está dado en W/ m grad y  $\rho$  en kg/m<sup>3</sup>. Sustituyendo el valor de las densidades obtenidas en cada una de las probetas dentro de esta ley de variación, se obtienen los siguientes valores de la conductividad térmica:

$$\text{Probeta 1 : } \lambda = 1,04 \text{ W/m grad}$$

$$\text{Probeta 2 : } \lambda = 1,06 \text{ W/m grad}$$

Estos valores son mucho más concordantes con los resultados obtenidos en el ensayo de la probeta 2. La diferencia que se observa entre el resultado obtenido para la probeta 1 y el de la probeta 2, dada la repetibilidad de los ensayos, podría achacarse al hecho de que la segunda probeta ha sido ensayada una semana más tarde y dado que ambas probetas fueron construidas en la misma fecha y que poseen una vida muy corta (se trata de muestras muy jóvenes), puede darse el caso que el contenido de humedad en las mismas haya variado sensiblemente en una semana, por lo cual la primera de ellas con mayor contenido de agua daría unos valores de la conductividad térmica superiores (a mayor humedad inherente mayor conductividad térmica).

El **calor específico**  $c$  (kcal/kg grad) se puede determinar aproximadamente a partir del



cálculo de la difusividad térmica ( $\text{m}^2/\text{h}$ ), a través de la expresión:

$$c = \frac{k}{K \rho}$$

en donde:  $k$  = conductividad térmica  
 $K$  = difusividad térmica  
 $\rho$  = densidad

La difusividad térmica se obtiene a partir de la integración de la ecuación de transmisión de calor en régimen no estacionario (Fourier) de tal forma que el resultado numérico de las temperaturas obtenidas durante el régimen transitorio en el plano medio de la placa coincidan lo máximo posible con los valores medidos cada dos minutos a través de las tres sondas colocadas. Los resultados obtenidos pueden verse en la citada tabla 3.20.

De los resultados anteriores y dada la naturaleza indirecta de determinación del calor específico, podemos concluir para dicha magnitud un valor de:

$$c = 0,2 \text{ kcal/kg grad}$$

En cuanto a las medidas de **albedo y absortancia** del hormigón, estas se han hecho sobre las mismas probetas referenciadas anteriormente, durante los meses de junio y julio de 1993. En ellas se han medido la irradiación solar global incidente ( $G$ ) y la radiación solar reflejada por el hormigón ( $G_R$ ).

La medida de las irradiancias solares incidentes y reflejadas se han realizado para diferentes horas del día y diferentes turbiedades de la atmósfera. Para ello, se ha utilizado un piranómetro de precisión espectral EPPLEY de tipo termoelectrónico sensible a toda la gama de longitudes de onda de la radiación solar. Previamente a la toma de medidas se efectuaron diferentes pruebas para minimizar los errores de medida.

La irradiancia solar global (directa más difusa) medida ha oscilado, según la hora de observación entre 400 y 1100  $\text{W m}^{-2}$ , mientras que la irradiancia solar reflejada han estado comprendidos entre 100 y 275  $\text{W m}^{-2}$ .

El resultado del valor del albedo medio (reflectancia) de las muestras de hormigón para:

- a) bajas inclinaciones solares (radiación solar incidente con ángulos superiores a  $45^\circ$  con respecto a la normal a la superficie del hormigón, correspondiente a primeras horas de la mañana y últimas de la tarde en verano o bien durante todo el día en invierno), ha sido del: 29 %.
- b) altas inclinaciones solares (radiación solar incidente con ángulos superiores a  $45^\circ$  con respecto a la normal a la superficie del hormigón, correspondiente a las horas centrales del día en verano), ha sido del: 19 %.

en consecuencia, el valor de las absorciones medias son:

- a) Bajas inclinaciones: 61 %
- b) Altas inclinaciones: 71 %



## **CAPÍTULO 4**

### **CONSIDERACIONES SOBRE EJECUCIÓN.**

#### **TRAMO EXPERIMENTAL DEL CULEBRO**

##### **4.1.- INTRODUCCIÓN**

En el capítulo anterior se ha visto la viabilidad de obtener un hormigón poroso modificado con polímeros que dé una buena respuesta a los requisitos mecánicos e hidráulicos que se le requieran. Esto es, es posible obtener un material, si bien hay que tener presente que el mismo debe ponerse en obra en condiciones sistemáticamente repetitivas.

El presente capítulo tiene por objeto presentar las características principales de la ejecución de un hormigón poroso en lo que hace referencia a su fabricación, transporte, puesta en obra, compactación, curado, etc.,

Dentro del capítulo, en primer lugar se hace una presentación general de las características de ejecución de una obra de hormigón poroso con especial énfasis en una aplicación para capa de rodadura; mientras que en la segunda parte del capítulo, se hace la presentación de la ejecución específica de la experiencia de la puesta en obra del tramo experimental del Culebro, realizado por DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES S.A.



## 4.2.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA EJECUCIÓN

### 4.2.1.- Condiciones de la central

Para el amasado de un hormigón poroso modificado con polímeros puede emplearse una central convencional de hormigón, siendo recomendable el empleo de una central amasadora en lugar de una central dosificadora, aunque también podría emplearse ésta. Ello responde a que si se emplea una central dosificadora, tanto el agua como el polímero deberían verterse en el camión hormigonera lo que representa alguna actuación adicional sobre el camión para incorporar un depósito para el polímero. En cualquier caso, la dosificación en la central debe hacerse en peso.

Por otro lado, dado que son hormigones con bajas cantidades de agua libre es poco recomendable no tenerlo muy controlado ya que puede tener una gran incidencia sobre las prestaciones requeridas a los hormigones. Estas condiciones de control son más fáciles de obtener en una central amasadora que en una central dosificadora.

Existe otro factor determinante, en cuanto al tipo de central a utilizar. Este factor es el sistema de transporte, ya que si se hace en camión de cuba giratoria, lo cual vendría obligado en el caso de central dosificadora, el rendimiento que se obtiene, tal como se señala más adelante es muy bajo y, por tanto, desechable desde un punto de vista económico. En consecuencia se propone el empleo de centrales amasadoras.

Las condiciones de almacenamiento de los áridos en la central pueden ser las usualmente empleadas en las mismas. Ahora bien, hay que llamar la atención sobre la importancia que en dosificaciones bajas de agua libre tiene la aportación de la humedad de los áridos ya que es necesaria una cantidad mínima de agua libre para hacer una buena mezcla. Por ello, si los áridos tienen mucha humedad y se descuenta esta, en la dosificación del agua libre pueden surgir problemas.

Así, en el caso de almacenamiento a la intemperie de los áridos, con posterioridad a un día de lluvia, es recomendable estudiar la incidencia de esta circunstancia. Como factor favorable se encuentra que estas dosificaciones tienen pequeñas cantidades de arena que es la que absorbería más humedad de los áridos y, en consecuencia, su incidencia no es muy grande.

Hay que insistir en la importancia de este factor, ya que por ejemplo, para una humedad de los áridos de un 3 % (el cual es un valor admisible después de un día de lluvia) en una dosificación como la utilizada en el tramo experimental del Culebro, el agua que aportarían los áridos serían 46,35 litros, dejando sólo 28,65 litros como agua libre para la acción física de lubricación durante el amasado. Ello podría acarrear problemas por lo que se insiste en que en cada caso particular debe estudiarse su incidencia, así como tener previstas medidas para protección y/o secado de los áridos.

En la incorporación de los componentes a la amasadora se recomienda seguir el siguiente orden: gravilla, arena, cemento, agua y polímero. Como puede observarse esta

ordenación sigue un criterio de incorporar a la amasadora según una secuencia decreciente en función del tamaño del componente. Con ello se alcanza, en general, una mejor dispersión de la mezcla lo que redunda de forma positiva en las características de la misma.

La secuencia propuesta puede representar a la larga un mayor desgaste en las palas de la amasadora (debido a la mezcla en seco), por lo que el fabricante del hormigón puede proponer otro orden más acorde con sus intereses. Esto debería ser objeto de estudio para permitir dicho cambio, si bien, manteniendo los requisitos requeridos.

El tratamiento del polímero en la central puede ser similar al de un aditivo empleado en la misma. En cualquier caso se recomienda no tener mucho tiempo almacenado el polímero sin la actuación de un agitador que mantenga las características de homogeneidad de la suspensión, ya que sino se hace, se puede producir una cierta decantación.

Los tiempos de amasado son del mismo orden de magnitud que en un hormigón convencional de consistencia seca. Esto es dicho tiempo se sitúa en el entorno de los dos minutos.

#### **4.2.2.- Transporte**

Dado que se trata de un hormigón de consistencia seca, el transporte se recomienda hacerlo con camiones volquetes en aras a alcanzar mejores rendimientos. También es posible emplear camión cuba convencional, si bien en este caso el rendimiento es muy bajo ya que para la descarga del mismo hay que ayudar con un rastrillo lo que implica mayores tiempos, Rosell et al. (1988).

Durante el transporte en el camión volquete, y especialmente en el caso de tiempos altos de transporte y/o en el caso de condiciones térmicas adversas (altas temperaturas, fuerte velocidad del viento, etc.) se recomienda tapar la caja del volquete mediante una lona con el fin de evitar que el agua se evapore con la consiguiente repercusión negativa tanto sobre las características del hormigón fresco como sobre las correspondientes al hormigón endurecido.

En esta etapa es importante transmitir al transportista que si bien en este hormigón se emplea un polímero con unas características adherentes, ello no incide de forma negativa sobre la caja del volquete, siendo fácil su limpieza posterior. Con ello se pretende evitar que el mismo tome medidas por su cuenta, debido al desconocimiento, y que dichas medidas puedan repercutir de forma negativa sobre el hormigón.

El vertido del hormigón del camión al tajo se hará de forma directa mediante elevación del volquete con caída libre de la masa del hormigón a la extendidora o bien al suelo para un extendido posterior.

En resumen, sobre el transporte hay que considerar este hormigón como un hormigón seco y, consecuentemente, las medidas que se tomen serán las mismas que se utilizan para este tipo de hormigones.



En cuanto a la limpieza de los equipos, tanto de amasado como de transporte, hay que resaltar que la limpieza de los mismos es simple, pudiéndose realizar con chorro de agua a presión. Esta información debe transmitirse a los operarios que intervienen con el fin de romper la inercia ante los cambios que en general se tiene en el mundo de la construcción.

El no cumplimiento de esta consideración puede hacer que se produzca una polimerización, pegándose mortero y microhormigón en los equipos siendo más difícil su extracción posterior, la cual debería hacerse con medios mecánicos (picado) o bien con disolventes. En cualquier caso esto supone una disminución de los rendimientos por los que se recomienda la limpieza de los equipos una vez finalizada la utilización de los mismos.

#### **4.2.3.- Extendido y compactación**

El extendido de los hormigones porosos depende en cierta medida de la aplicación que se de al mismo. En el campo de carreteras, en el extendido de los hormigones porosos para base o capas de rodadura se utilizan habitualmente pavimentadoras de encofrados deslizantes (en los que se dejan sin funcionar los vibradores internos) o, preferentemente, extendedoras de mezcla asfáltica, Jofré (1993). En las últimas realizaciones se ha observado una tendencia hacia el empleo de extendedoras provistas de reglas con elevado poder de precompactación, las cuales pueden hacer innecesaria una compactación posterior. En caso de tener que realizarse ésta, suele recurrirse a equipos ligeros: pequeños rodillos, placas vibrantes o incluso reglas vibrantes, si se trata de obras de poca importancia.

El extendido del material en zanjas puede realizarse mediante un camión hormigonera convencional (cuba), mientras que en los arceles pueden emplearse equipos similares a los empleados para la extensión de materiales granulares sin tratar.

En el empleo del hormigón poroso modificado con polímeros, el extendido de esta capa de rodadura de pequeño espesor, puede hacerse en dos momentos diferentes adaptados a las condiciones específicas de la obra. En cualquier caso se debe intentar garantizar la adherencia entre la capa del hormigón base y la capa de rodadura que se incorpora. Los dos sistemas generalmente empleados son:

- Extensión del hormigón poroso sobre el soporte cuando el conglomerante de éste todavía no ha iniciado su fraguado. Este método se denomina usualmente *wet on wet*.
- Colocación del hormigón poroso sobre el soporte endurecido, extendiendo previamente una lechada de adherencia (cemento, cemento más polímero, humo de sílice, etc.). Este método se denomina usualmente *wet on dry*.

El segundo de los dos métodos presentados tiene la ventaja de independizar en tiempos y equipos el extendido de la capa de rodadura, si bien como inconveniente, hay que reseñar la mayor probabilidad de que la superficie del hormigón base se manche, con la consiguiente necesidad de limpiar la misma. Esta limpieza puede hacerse con cualquiera de los métodos convencionales procurando dejar una superficie limpia y descarnada que aumente la rugosidad, en definitiva los puntos de contacto entre ambas capas con el fin de mejorar la adherencia.

La compactación tiene una importante incidencia sobre las características del hormigón endurecido, tal como se ha demostrado en el capítulo anterior, ya que a partir de una misma dosificación se pueden modificar sensiblemente las propiedades del hormigón con el grado de compactación. Debe en consecuencia, buscarse en la obra un compromiso cara a alcanzar el adecuado equilibrio entre las propiedades mecánicas y las propiedades hidráulicas. En definitiva, la compactación debe ser objeto principal de estudio y puesta a punto en cada una de las aplicaciones específicas que se trate.

La compactación de estos hormigones, al tratarse en general de capas de espesores pequeños o medios, se hace por vibrocompresión externa (rodillo vibrante, regla vibrante, etc). No se recomienda el empleo de vibradores internos, ya que el empleo de los mismos puede producir una migración del mortero hacia el fondo de la capa, quedando ésta prácticamente cerrada sin porosidad; mientras que en la parte superior de la capa, los puentes de unión entre los áridos son muy débiles, dando lugar a un material de bajas resistencias mecánicas.

#### **4.2.4.- Curado y conservación**

La gran porosidad accesible de estos hormigones incide, lógicamente, en el sistema de curado. Así no es viable el empleo de productos filmógenos ya que la textura tan abierta de estos hormigones dificulta la materialización de la misma. Por otro lado, el curado mediante riego de agua es poco efectivo ya que presenta una gran superficie para evaporación y además es drenante, con lo que se facilita la evacuación del agua. Así pues el rendimiento que se obtendría sería bajo.

Una alternativa a estos sistemas es el empleo de láminas de plástico que cubran la superficie de hormigón poroso. Hay que llamar la atención sobre el hecho de que la cámara que se forme no interesa que tenga un porcentaje de humedad muy elevado (simulando el curado en cámara húmeda), ya que ello podría conllevar una disminución de resistencias. De hecho en la conservación de las probetas moldeadas de hormigón con polímero se hace en unas condiciones de humedad en el entorno del 60 %. Así pues, en el empleo de las láminas de plástico debería dejarse una cierta ventilación, intentando evitar un contacto directo en toda la superficie entre lámina y hormigón.

Una alternativa viable para hormigones con unas características mecánicas no muy exigentes podría ser no tomar medidas encaminadas al curado, esto es, no curar. Ello incide de forma negativa en las características mecánicas reduciendo las mismas si bien de forma no muy significativa, Rosell et al, (1988).

En la conservación de una aplicación de hormigón poroso en cualquiera de las formas vistas en el capítulo 1, el enemigo fundamental es la colmatación de los poros mediante finos aportados exteriormente. El tratamiento general que se debe dar es el mismo que el correspondiente a mezclas abiertas de tipo bituminoso que, en cualquier caso, es problemático.



### 4.3.- TRAMO EXPERIMENTAL DEL CULEBRO<sup>3</sup>

#### 4.3.1.- Localización y descripción del tramo experimental

El tramo experimental se sitúa a unos 17 km al sur de Madrid en la denominada "Autovía del Culebro". Dicho tramo experimental está constituido por dos ramales de servicio de dicha autovía con una longitud aproximada de 420 metros. Estos ramales tienen una pendiente transversal hacia el lado exterior del 2 % y una anchura de 9,50 metros, compuesta por un arcén de 1,50 m, calzada doble unidireccional de 7 m y arcén interior de 1 m.

La sección de afirmado ejecutada se apoya sobre una capa de 20 cm de suelo cemento previamente extendida y está compuesta por 25 cm de hormigón compactado y 5 cm de hormigón poroso, tal como puede verse en la figura 4.1. Para que las dos capas trabajen solidariamente, entre ambas se aplicó una lechada adherente en unos casos y en otros se adicionó, al hormigón compactado, un retardador. Con ello se pretendía demorar el inicio de fraguado hasta después del extendido del hormigón poroso.

Con el objeto de diversificar más la prueba y obligados por las limitaciones de los equipos disponibles, el extendido de los hormigones se hizo por semianchos de forma que los carriles correspondientes a vehículos lentos y rápidos en cada ramal lleven alternativamente lechada adherente o retardador de fraguado; de este modo el ensayo constituye una experiencia cuádruple.

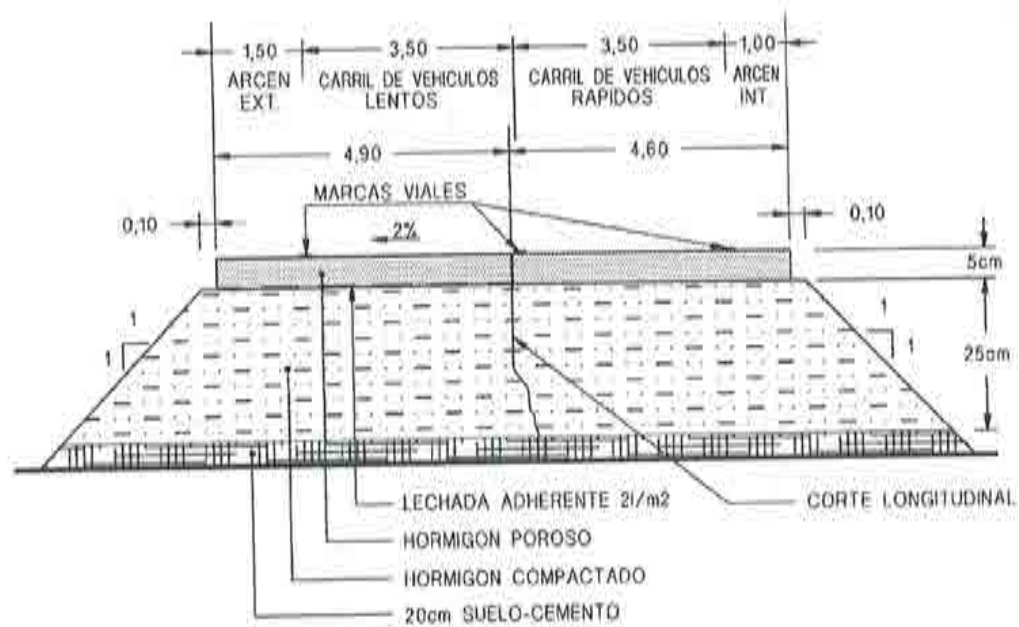
#### 4.3.2.- Materiales y dosificación empleada

Para el **hormigón compactado** se han empleado áridos calizos de machaqueo procedentes de la zona de Arganda, clasificados en los tres tamaños y porcentajes siguientes, dentro de la formulación finalmente adoptada: 0/6 (17 %), 6/12 (22 %) y 12/20 (27 %) y con arena de río (22 %). El cemento empleado procedía de la fábrica de Meco en Guadalajara y es de los denominados de tipo mixto V-35 (12 %). Cuando el hormigón compactado correspondía a los tramos en los que el hormigón poroso no lleva lechada adherente, a la fórmula de trabajo se le añadió un retardador de fraguado de la casa SIKa, específico para hormigones compactados y mezclas de grava cemento (SIKAPACT). La proporción de este retardador fue del 0,8 % sobre el peso del cemento, siguiendo las recomendaciones del fabricante.

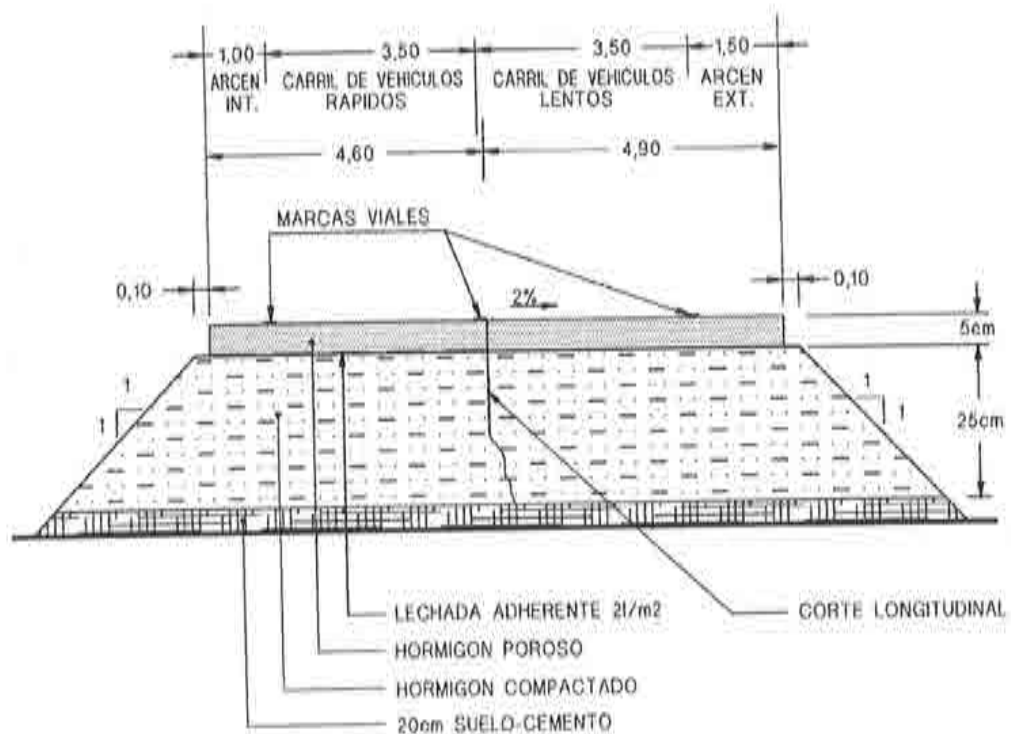
En cuanto a la **lechada adherente** se empleó un mortero de cemento con polímero, siendo este último el Fortón, anteriormente descrito (Capítulo 2). La formulación utilizada en la práctica fue: 35 kg de cemento V-35 (representa el 73,7 %), 7,5 litros de la solución de polímero (15,8 %) y 5 litros de agua. La dotación media finalmente empleada fue de 1,6 litros por m<sup>2</sup>, entendiéndose que con ella se cubría completamente la superficie a tratar, pero evitando acumulación de lechada.

---

<sup>3</sup> Este apartado se basa, fundamentalmente, en los trabajos recogidos en el informe realizado por DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES, S.A. titulado "Tramo experimental con rodadura de hormigón poroso" Proyecto BRITE/EURAM BE-3415/89. Enero 1992.



SECCION TIPO RAMAL N



SECCIOS TIPO RAMAL S

Figura 4.1.- Tipos de sección transversal de los ramales norte y sur.



El **hormigón poroso modificado con polímeros** empleado en la capa de rodadura estaba constituido, en cada metro<sup>3</sup>, por: 104 kg de arena de río lavada con una humedad entre el 1,5 y 3 %, 1.456 kg de gravilla 6/12 con una humedad entre el 0,7 y 0,9 %, 260 kg de cemento V-35, 40 kg de la solución de polímero y 40 kg de agua.

#### **4.3.3.- Tramo de prueba**

Antes de proceder a la pavimentación del tramo donde se iba a realizar la experiencia piloto, se consideró conveniente, y entendemos que recomendable en cualquier caso, la realización de un pequeño tramo de ensayo de unos 60 metros para poner a punto todo el proceso. Las principales experiencias que se obtuvieron de este estudio fueron:

- La dosificación inicial propuesta por la UPC era fluida. Ello responde a que en condiciones de laboratorio la humedad de los áridos era prácticamente cero mientras que en la obra la humedad estaba en el rango de 0 al 3 %, no habiéndose tenido en cuenta este agua aportada por los áridos, lo que daba lugar a una mezcla más fluida.
- Las instalaciones existentes tenían algunas dificultades para dosificar sólo 100 kg de arena. También existían dificultades en el depósito de mezcla de agua y del polímero, porque la toma de aire que se producía, impedía a la bomba dosificar regularmente.
- Al objeto de que la lechada no fuera pisada por los camiones durante la pavimentación, se trabajó en un principio con camiones hormigoneras para que estos vertiesen desde un lateral, la totalidad de la carga en la tolva de la extendedora sin poner ésta en marcha hasta no tener cubierto de lechada el tramo de avance que permitiera la carga de la máquina. Con este procedimiento se perdía continuidad además de su lentitud. Por ello se optó por utilizar camiones convencionales que rodaban en parte sobre la lechada ya extendida, comprobándose que prácticamente no deterioraban la película adherente.
- Ajustar los elementos de compactación de la extendedora, llegando a la conclusión de que los tempers deben trabajar con unos valores medios de frecuencia y amplitud, y la regla al 80 % de su vibración máxima.

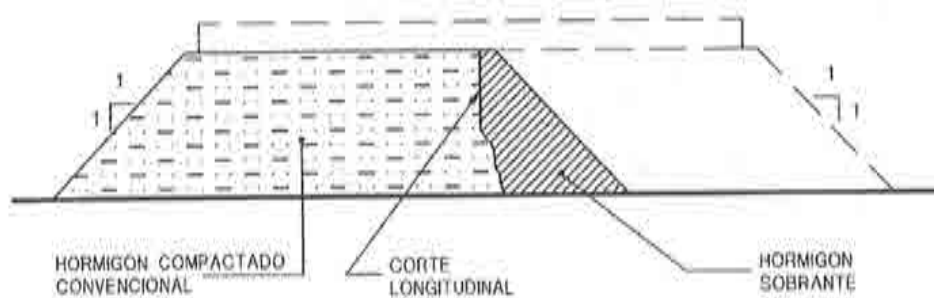
Una vez realizada esta experiencia previa y puesto a punto el sistema de trabajo, se procedió a la realización de los diferentes tramos anteriormente de acuerdo con la planificación y utilizando los equipos básicos que se relacionan en los siguientes apartados.

#### **4.3.4.- Planificación y esquema de trabajo**

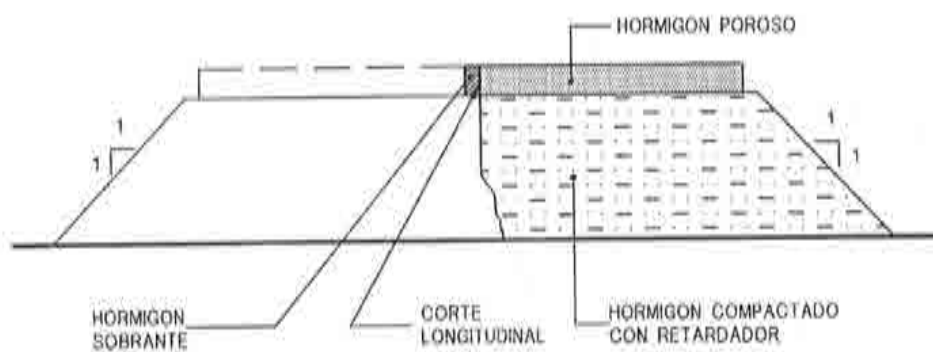
Básicamente, la construcción de cada ramal se programó en tres etapas, las cuales se presentan de forma esquemática en la figura 4.2. Estas etapas son:

- a) - Ejecución del hormigón compactado (sin retardador) del carril que posteriormente llevará lechada adherente.

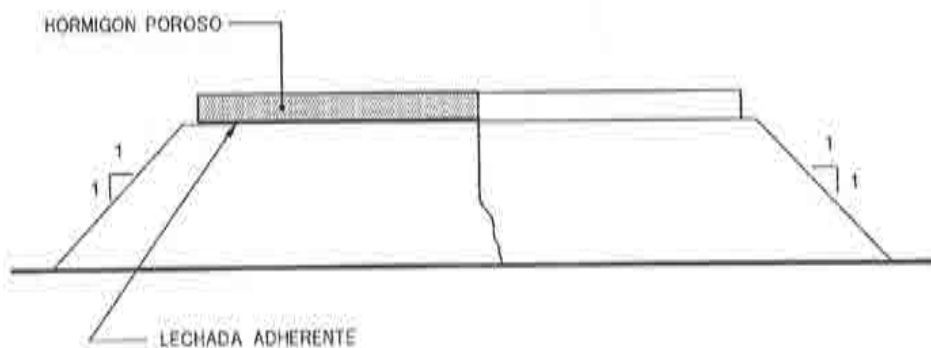
## FASES DE EJECUCION DEL AFIRMADO



FASE A



FASE B



FASE C

Figura 4.2.- Esquema de las fases de ejecución utilizado en el tramo experimental.

- b) - Ejecución del hormigón compactado con retardador de fraguado del resto de la sección, e inmediatamente después y sobre él, extendido de la capa de hormigón poroso. Todo ello dentro de la misma jornada.
- c) - Extendido del hormigón poroso sobre el primer hormigón compactado, previo tratamiento de la superficie con lechada adherente. Esta fase debe ir atrasada respecto a la fase a) en una semana como mínimo, para que haya endurecido suficientemente el hormigón compactado.

La ejecución de los tramos experimentales se realizó durante el mes de noviembre de 1991 y, aunque se ajustó a lo programado, la realización estuvo condicionada, además de por la climatología, por la disponibilidad de las plantas para la fabricación de los hormigones y por las distintas soluciones adoptadas para la ejecución de la prueba.

#### 4.3.5.- Equipos empleados

En la tabla 4.1 se presentan brevemente los datos de los equipos básicos empleados, pudiéndose encontrar una información más detallada en el informe de DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES, S.A. anteriormente citado.

Equipo	Marca	Características Básicas
Hormigonera	TEKA	Capacidad de carga: 2.250 litros
Central dosificadora	DRACONSA	Tipo CHZM-90
Extendedora	TITAN	Tipos 411 y 322
Cortadora de juntas	ABG	
Camiones		Tipo bañera de 12 m <sup>3</sup>

Tabla 4.1.- Datos básicos de identificación de los equipos empleados.

En la figura 4.3 puede verse, en una operación del extendido del hormigón compactado parte de los equipos utilizados. En ella, puede observarse el tipo de hormigón volquete utilizado, la extendedora TITAN 322 y el rodillo de compactación. Por su parte, en la figura 4.4 puede verse la amasadora de hormigón TEKA, THZ-2250.

#### 4.3.6.- Ejecución del hormigón poroso

En lo que sigue se resaltan los aspectos más relevantes referidos al hormigón poroso, pudiéndose consultar los aspectos referidos al hormigón compactado en el documento de DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES S.A. antes citado. La central empleada para el hormigón





Figura 4.3.- Vista del extendido del hormigón compactado donde puede observarse parte de los equipos empleados.



Figura 4.4.- Vista de la amasadora empleada en la fabricación del hormigón poroso.

poroso estaba situada a 26 km del tajo. El rendimiento obtenido fue de 20 m<sup>3</sup>/hora con un tamaño de amasada de 2.375 kg que equivalen a 1,25 m<sup>3</sup> de hormigón poroso. El transporte al tajo se hizo con camiones bañera, transportando cada uno de ellos diez amasadas.

Para la puesta en obra se dispuso de una extendedora similar a la del hormigón compactado pero con otros reglajes. Estos se ajustaron en función del espesor y del tipo de material a extender. El modelo de esta máquina, tal como se indica en la tabla 4.1, fue ABG Titán 322 con tablón extensible Vario-Duotamp VDT-V55 y los siguientes reglajes de ajuste:

- Amplitud del primer tamper .....	6 mm
- Amplitud del segundo tamper .....	5 mm
- Frecuencia de vibración de ambos tampers .....	0,5 x 1.800 r.p.m.
- Frecuencia de vibración del tablón compactador ..	0,8 x 1.800 r.p.m.

Tras la máquina extendedora no ha sido necesario introducir ningún otro elemento de acabado ni de compactación.

La lechada adherente se fabricó con una turbomezcladora similar a las utilizadas en los trabajos de inyección. El accionamiento de la misma es eléctrico y necesita un grupo electrógeno de 25 KVA. Dicha máquina estaba dispuesta en las inmediaciones del tajo.

La dosificación de los componentes de la lechada se hizo manualmente, partiendo del cemento pesado y ensacado previamente y midiendo con cubos aforados las cantidades necesarias de polímeros y de agua. La mezcla así obtenida se transportó sobre carretillas chinas que vierten directamente en el tajo y que por medio de rastrillos ciegos se extienden manualmente, tal como puede verse en la figura 4.5.

Este procedimiento no presenta problemas significativos y basta con repasar las huellas de las rodadas de los camiones con un rascador ancho de goma provisto de mango largo, para que quede una superficie muy aceptable. La mano de obra requerida para seguir el ritmo de la extendedora fue de 2 operarios en la turbomezcladora y de otros cuatro operarios extendiendo la lechada y repasando la superficie.

La ejecución del hormigón poroso se hizo de forma análoga al hormigón compactado, ejecutándose por carriles con anchuras variables entre 4,60 y 4,95 metros y, llevando la máquina extendedora a espesor fijo de 5 cm por el lado exterior y con un palpador de patin sobre el hormigón antiguo por el lado del eje, tal como puede observarse en la figura 4.6. La velocidad de trabajo de la extendedora se mantuvo constante fijándola en 2 m/minuto. Cabe señalar, que tras el extendido no se requiere ninguna operación posterior salvo el curado y corte de juntas.

Hay que insistir en que el extendido de la capa de hormigón poroso no requiere en principio de un maquinaria diferente a la que el constructor está habitualmente acostumbrado para el extendido de mezclas asfálticas. La variación viene dada por el diferente reglaje de





Figura 4.5.- Extendido de la capa de lechada.



Figura 4.6.- Hormigón poroso sobre el sinfin de la extendedora y vista del palpador de nivelación.

los equipos, tal como se ha presentado anteriormente. Durante el desarrollo del proyecto BRITE-EIRAM citado, el equipo alemán ha puesto a punto un sistema del extendido de las dos capas con una misma máquina, lo cual puede representar un significativo avance desde el punto de vista constructivo.

El acabado de la capa de rodadura de hormigón poroso fue satisfactorio, tal como puede observarse en la figura 4.7. En ella puede apreciarse asimismo que la capa de hormigón poroso mejora la regularidad superficial del hormigón compactado. Algún pequeño fallo que se produjo en la superficie de rodadura fue corregido posteriormente y de forma manual, por un operario con una talocha de madera.

El curado del hormigón poroso se efectuó, al igual que en el hormigón compactado, sin aplicar ningún producto, simplemente manteniendo su humedad, cubriendo la superficie con una lámina de plástico, tal como se muestra en la figura 4.8. Esta lámina se retiró al cabo de una semana.

El corte de las juntas se hizo con el mismo equipo que para el hormigón compactado manteniendo, lógicamente, la misma secuencia. Ello implica que en algunos casos se han cortado conjuntamente mientras que en otros (en aquellos que el hormigón poroso va sobre lechada adreñete) el corte se realizó después de haberse realizado el corte en la capa de hormigón compactado.

La primera operación de corte antes de extender el hormigón poroso sobre lechada es el perfilado de la junta entre carriles. Este corte se hizo el día anterior, cortando los 5 cm de demasia del hormigón poroso que se dejaron en el carril contiguo para obtener un borde bien perfilado; este corte hay que hacerlo coincidente con la junta longitudinal de los dos hormigones compactados y para ello basta con guiarse por una línea de referencia pintada previamente. En cuanto a los cortes transversales, éstos se ejecutaron a partir del tercer día posterior al extendido del hormigón poroso, asegurando también la coincidencia de las juntas y tomando como referencia los cortes anteriores.

La profundidad de corte, tanto de la junta longitudinal como de las transversales, basta con que sea la del espesor de la capa, es decir 5 centímetros, hasta enlazar con la junta anterior. Finalmente, y con objeto de lograr una estética mejor, se dio una última pasada de cortadora a la junta longitudinal de construcción. Este reperfilado se hicieron después de terminados los trabajos de pavimentación y corte.

#### **4.3.7.- Control de calidad**

Los ensayos de control han abarcado diferentes etapas, tal como se muestra en la tabla 4.2. En ella se indica asimismo el lugar donde se realizaban las determinaciones así como el tipo de determinación previsto. Los resultados de todas estos ensayos pueden encontrarse en el informe de DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES S.A. anteriormente citado.

Unos meses después de la realización de la obra, en enero de 1992, se observaron diferentes despegues entre las dos capas en distintas losas de ambas soluciones (existencia





Figura 4.7.- Acabado de la capa de hormigón poroso. En esta foto puede apreciarse la textura, el espesor y la mejora de regularidad superficial.



Figura 4.8.- Curado de la capa de rodadura mediante cubierta de lámina de plástico.

ENSAYOS	Ubicación de la toma	Tipo de ensayo
Previos	Laboratorio U.P.C.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Determinación de dosificaciones</li> <li>- Pruebas de adherencia entre capas</li> </ul>
Durante la fabricación	Hormigón Compactado en planta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resistencia a tracción indirecta (9 probetas) Roturas a 7, 28 y 90 días.</li> <li>- Homogeneidad de la mezcla.</li> <li>- Control de la humedad de la arena.</li> </ul>
	Hormigón Poroso en planta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control de la humedad de la arena</li> <li>- Trabajabilidad según ISO 4111</li> <li>- Características mecánicas:               <ul style="list-style-type: none"> <li>6 prob. a compresión a 7 y 28 días</li> <li>6 prob. a tracción indirecta a 7 y 28 días</li> </ul> </li> <li>- Características hidráulicas:               <ul style="list-style-type: none"> <li>6 prob. para ensayos de densidad, porosidad y permeabilidad</li> </ul> </li> </ul>
Durante la puesta en obra	Hormigón Compactado en el tajo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control densidad y humedad mediante sonda nuclear</li> <li>- Resistencia a tracción indirecta (9 probetas) Roturas a 7, 28 y 90 días.</li> </ul>
	Hormigón Poroso en el tajo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Características mecánicas:               <ul style="list-style-type: none"> <li>6 prob. a compresión a 7 y 28 días</li> <li>6 prob. a tracción indirecta a 7 y 28 días</li> <li>4 y 6 prob. a flexotracción a 7 y 28 días</li> <li>4 prob. prismáticas para ensayo adherencia, previo corte en cubos de 15x15x15 (en cm)</li> </ul> </li> <li>- Trabajabilidad según ISO 4111</li> </ul>
Posteriores	Capa de rodadura Hormigón poroso	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Regularidad superficial (IRI) con perfilímetro tipo Dipstick, antes y después de extendido</li> <li>- Permeabilidad con el permeámetro LCS para comparar con aglomerados drenantes</li> <li>- Círculo de arena para medir la textura superficial del pavimento</li> <li>- Péndulo de fricción para determinar el agarre de la capa de rodadura</li> <li>- Comportamiento al corte en probetas testigo</li> </ul>

Tabla 4.2.- Planteamiento de los ensayos de control realizado en el hormigón compactado y en el hormigón poroso.

o no de lechada). Ello responde, en nuestra opinión, a las tensiones tangenciales que se producen entre ambas capas originadas por la acción térmica ambiental. Ello puede responder a un insuficiente espesor de la capa de hormigón poroso para este caso concreto. En cualquier caso este punto merece un desarrollo posterior más profundo, lo cual se está llevando a cabo en Pindado (1995).





## CAPÍTULO 5

### COMPORTAMIENTO A FATIGA

#### 5.1.- INTRODUCCIÓN

La necesidad de determinar el comportamiento a fatiga de los hormigones porosos modificados con polímeros tiene un doble origen, por una parte, es evidente que la característica más específica de las cargas de tráfico (aquellas a las que es sometida una capa de rodadura) es su carácter cíclico y, por otro lado, y como ha sido señalado por numerosos autores recogidos en el C.E.B. 188 (1988), el comportamiento a fatiga de un hormigón depende del tipo de hormigón por lo que, en principio, y dada la gran diferencia que supone la eliminación de la mayor parte del árido fino, eran de esperar diferencias entre el comportamiento a fatiga de los hormigones porosos y los hormigones convencionales. Siendo además necesario conocer la incidencia en el comportamiento a fatiga de la adición de polímeros que en experiencias previas en otros tipos de hormigones era notable (Hsu, 1983).

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el programa de ensayos a fatiga sobre diferentes dosificaciones de hormigones porosos. Las dosificaciones ensayadas han sido las correspondientes a las propuestas por los diferentes participantes en el proyecto, es decir, dos dosificaciones basadas en la adición de polímeros (española y holandesa) y una basada en la adición de microsilíce (alemana), además de éstas se ha ensayado una dosificación sin ninguna adición para tener una referencia del comportamiento a fatiga de un hormigón poroso convencional.

Estos resultados incluyen los correspondientes ensayos a compresión simple, la definición de las curvas de Wöhler (diagramas  $S-N$ ) para cada dosificación y trayectoria tensional así como el correspondiente estudio estadístico de los resultados obtenidos. Estos resultados muestran la mejora que, en el comportamiento a fatiga de un hormigón poroso, produce la adición de polímeros.

## 5.2.- PLANTEAMIENTO GENERAL DE LOS ENSAYOS

La fatiga de los materiales se produce cuando éstos son sometidos a sucesivos ciclos de carga y descarga. Estos ciclos progresivamente degradan (microfisuran) al hormigón, y éste llega a la rotura bajo unos niveles de tensión inferiores a los correspondientes a un ensayo estático. Esta sucesión de ciclos de carga y descarga puede ser variable en el tiempo. En la práctica (acción del tráfico) estos ciclos son de tipo aleatorio y dependen de las condiciones de tráfico. Sin embargo, en laboratorio habitualmente se define un ciclo de carga que es sucesivamente repetido mediante la prensa utilizada (todos los ensayos, estáticos y dinámicos, fueron realizados en una prensa servo-hidráulica *INSTRON-digital 8500*). Estas sollicitaciones se pueden definir a partir de la forma sucesivamente repetida (lineal, senoidal, etc. y las tensiones máxima,  $f_{max}$ , y mínima,  $f_{min}$ , correspondientes) y por su frecuencia.

Un método clásico para caracterizar el comportamiento a fatiga de los materiales es la definición de las curvas de Wöhler o diagramas  $S-N$ . Estas curvas, que son las habitualmente utilizadas en el proyecto de pavimentos, relacionan el cociente entre la tensión máxima en los ciclos de carga y descarga ( $f_{max}$ ) y la resistencia (estática) del hormigón  $f'_c$ ,  $S=f_{max}/f'_c$ , con el número de ciclos hasta rotura,  $N$ . Las curvas obtenidas varían dependiendo del tipo de ensayo (compresión, flexotracción) y del tipo y frecuencia de los ciclos. Consecuentemente, estos factores deben adaptarse lo máximo posible a las condiciones de carga y descarga que se producen en la realidad, si se desean obtener modelos de comportamiento realistas y aplicables en situaciones prácticas, como a continuación se expone para este caso.

Respecto al tipo de ensayo, el factor fundamental a considerar es el estado tensional producido en el hormigón. Los vehículos inducen sollicitaciones de flexión en las losas del pavimento por lo que, en principio, serían los ensayos a flexotracción los más adecuados para definir las curvas de Wöhler para el conjunto de la losa. Sin embargo, debido a que la losa no es homogénea al estar compuesta por una subcapa porosa y otra densa, y estar situada la capa porosa en la parte superior del pavimento, se puede considerar que esta última estará básicamente sometida a las tensiones de compresión correspondientes a la zona superior de la distribución tensional de flexión, junto a las tensiones de compresión verticales directamente asociadas a la acción de las ruedas.

Esta hipótesis, no obstante, no es siempre realista, ya que en determinadas circunstancias (por ejemplo por efecto de gradientes térmicos) la parte superior puede estar sometida a tensiones de tracción. Sin embargo, se considera que los valores de estas últimas serán inferiores a los correspondientes al tráfico y ante la evidente dificultad de ensayar a ciclos tracción-compresión se decidió realizar los ensayos a compresión. En las figuras 5.1 y 5.2 puede apreciarse la configuración del ensayo, así como el resultado de una rotura por fatiga.





Figura 5.1.- Probeta sometida a un ensayo a fatiga.



Figura 5.2.- Probeta rota tras ser sometida a un ensayo a fatiga.

Respecto a los ciclos a tomar en la prensa como simulación del tráfico se consideró un valor muy bajo de la relación entre la carga máxima y la carga mínima en el ciclo ( $R=f_{min}/f_{max}$ ) y una frecuencia muy alta. Ello responde a que el efecto del tráfico en movimiento sobre el pavimento puede ser adecuadamente modelado mediante una carga rápida desde cero (cuando el vehículo llega), seguido inmediatamente por una descarga rápida hasta cero, de forma que el ciclo es más o menos rápido según sea la velocidad del vehículo. El valor alto de la frecuencia era con el fin de reducir el tiempo de ensayo.

### 5.3.- DOSIFICACIONES DE HORMIGÓN POROSO

Todas las dosificaciones de hormigón poroso empleadas en el programa de ensayos a fatiga y que se definen a continuación cumplieron con todos los requisitos mínimos que aparecen en los capítulos anteriores. Dado que estos ensayos han sido realizados en una fase ya muy avanzada del proyecto, las dosificaciones usadas se aproximan mucho a las finalmente seleccionadas como óptimas por cada uno de los equipos.

#### 5.3.1.- Materiales

En la fabricación del hormigón se utilizaron los materiales mostrados en la Tabla 5.1. Como ya se ha comentado con anterioridad la utilización de tamaños de árido diferentes para las probetas españolas y para las probetas holandesas fue debida a la adaptación de los materiales a los usuales (disponibles comercialmente) en cada país.

<b>Árido grueso</b>	5-12 mm de machaqueo (probetas españolas) 4-8 mm de machaqueo (probetas holandesas) 5-8 mm de machaqueo (probetas alemanas)
<b>Arena</b>	0-5 mm de machaqueo (probetas españolas) 0-1 mm de río (probetas holandesas y alemanas)
<b>Cemento</b>	<i>V-35 (UNE-80.301)</i> , Portland con 40% de cenizas volantes (probetas españolas) <i>II-C 32.5R (ENV-197)</i> , Portland con 25% de cenizas volantes (probetas holandesas) <i>PZ 35 F</i> (probetas alemanas)
<b>Polímero</b>	Acrílico puro (dispersión en agua), FORTON VF-774

Tabla 5.1.- Materiales utilizados en los ensayos a fatiga.

#### 5.3.2.- Dosificaciones

En la tabla 5.2 se presentan las cuatro dosificaciones estudiadas. En dos de ellas se utilizó polímero en distintas proporciones (12.5 l/m<sup>3</sup> en probetas españolas y 22 l/m<sup>3</sup> en



probetas holandesas), en otra se utilizó microsilice, mientras que en la última no se empleó adición con el objeto de que sirviera como referencia, puesto que no existían experiencias previas sobre el comportamiento a fatiga de un hormigón poroso.

	1	2	3	4
ÁRIDO GRUESO	1506 Kg/m <sup>3</sup>	1427 Kg/m <sup>3</sup>	1352 Kg/m <sup>3</sup>	1534 Kg/m <sup>3</sup>
ARENA	106 Kg/m <sup>3</sup>	101 Kg/m <sup>3</sup>	89 Kg/m <sup>3</sup>	77 Kg/m <sup>3</sup>
CEMENTO	275 Kg/m <sup>3</sup>	350 Kg/m <sup>3</sup>	279 Kg/m <sup>3</sup>	280 Kg/m <sup>3</sup>
AGUA	78.5 l/m <sup>3</sup>	110 l/m <sup>3</sup>	64 l/m <sup>3</sup>	95 l/m <sup>3</sup>
POLÍMERO (SÓLIDOS)	12.5 l/m <sup>3</sup>	--	22 l/m <sup>3</sup>	--
SUPERPLASTIFICANTE	--	3.5 l/m <sup>3</sup>	--	--
MICROSILICE	--	--	--	28 Kg/m <sup>3</sup>
DENSIDAD	1930 kg/m <sup>3</sup>	1980 Kg/m <sup>3</sup>	1815 Kg/m <sup>3</sup>	2014 Kg/m <sup>3</sup>

- 1: Probetas españolas con polímero
- 2: Probetas españolas sin polímero
- 3: Probetas holandesas (con polímero)
- 4: Probetas alemanas (con microsilice)

Tabla 5.2.- Dosificaciones empleadas en los ensayos a fatiga.

El polímero se utilizó mezclado con agua al 50%. Este hecho se ha tenido en cuenta en las dosificaciones de la Tabla 5.2, que incluyen las cantidades de polímero (sólidos) y de agua ya corregidas. En el caso de la dosificación española sin polímero, se añadió un superplastificante para obtener, aproximadamente, la misma trabajabilidad obtenida en las dosificaciones con polímero, en las que éste tiene un efecto de incremento de la misma. De esta forma, la consistencia de todas las dosificaciones es análoga. Por otro lado, se fijó como objetivo que las resistencias estáticas fuesen similares en las tres dosificaciones. Por ello, la cantidad de cemento en la dosificación que no contiene polímero es sensiblemente mayor que en las otras dos.

### 5.3.3.- Fabricación y curado

El hormigón poroso se fabricó en una amasadora de eje vertical con control ponderal de los componentes. El tiempo de amasado fue de 1.5 minutos tras la incorporación de todos los materiales. Las probetas, cilíndricas de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro, se compactaron con un martillo vibrante o en una mesa vibrante (probetas holandesas). El curado de las probetas de hormigón poroso con polímero se realizó, el primer día, en el molde a 20°C, evitando su desecación, y fueron posteriormente almacenadas a 20°C y 50% de humedad relativa en el caso de las probetas españolas. Bajo unas condiciones de 20°C y 65%

de humedad relativa fueron almacenadas tanto las probetas holandesas como las alemanas desde el instante de su recepción hasta el instante de su ensayo. El curado de las probetas de hormigón poroso sin polímero se realizó, el primer día, en el molde a 20°C, evitando su desecación, y fueron posteriormente almacenadas a 22.3°C y el 98% de humedad relativa. La diferencia en el proceso de curado es debida, por una parte, a los procedimientos habituales en los países correspondientes y, por la otra, a que no es adecuado el curado de probetas con polímero con altas humedades relativas, debido a que en este caso el comportamiento del mismo es defectuoso. Todas las muestras fabricadas cumplan con los requisitos iniciales anteriormente citados.

#### 5.4.- PROGRAMA DE ENSAYOS

Las características principales del programa de ensayos fueron las siguientes:

- Estudio del comportamiento de hormigones porosos sometidos a un *alto número de ciclos* de acuerdo con la clasificación de Hsu (1.000 a 10.000.000 ciclos; Hsu, 1981). Dentro de este intervalo se encuentran los valores necesarios para el proyecto de pavimentos.
- $R = f_{min}/f_{max} = 0.05$  ( $f_{min}$  muy bajo pero no nulo, ya que  $f_{min} = 0$  no puede ser aplicado en la prensa utilizada). Tal y como se ha indicado con anterioridad, este es el caso habitual para cargas de tráfico. Adicionalmente, y para la dosificación española con polímero, se determinaron las curvas de Wöhler con  $R=0.2$  y  $R=0.5$ . A pesar de que estos últimos valores no corresponden a cargas de tráfico, y no son utilizados en el proyecto de pavimentos, los resultados correspondientes fueron de utilidad para estudiar el efecto del polímero en el comportamiento a fatiga del hormigón poroso modificado con polímeros cuando los ciclos de carga cambian.
- La frecuencia de los ciclos fue de 10 Hz para  $R=0.05$ , y de 15 Hz para los otros valores de  $R$ . De acuerdo con la experiencia previa en hormigones, el comportamiento del material no varía en ese rango de frecuencias, reduciéndose los tiempos de ensayo para el caso de frecuencia igual a 15 Hz. La forma de los ciclos es la que se muestra en la Figura 5.3 (variaciones lineales de la tensión).

Cada curva de Wöhler fue en general definida a partir de cinco puntos entre  $S=0.6$  y  $S=0.9$ . El alto número de ensayos individuales necesarios para definir cada una de estas curvas es debido a la alta dispersión de resultados que se obtiene en ensayos de fatiga. Esta alta dispersión está directamente relacionada con la dispersión constatada en los ensayos estáticos de referencia, por ello, deben extremarse todos los controles sobre los procesos de fabricación, curado y ensayo de las probetas con el objeto de reducir los valores de la dispersión a los mínimos posibles. Adicionalmente, se ha realizado un estudio estadístico para determinar los intervalos (bandas) de confianza de cada una de las curvas de Wöhler obtenidas.



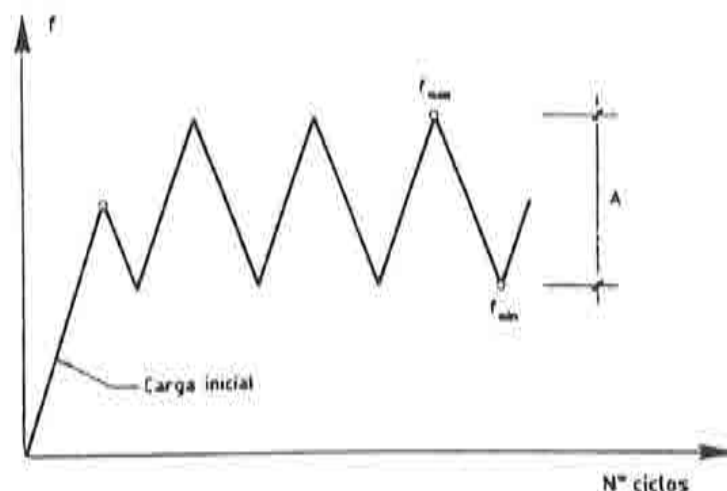


Figura 5.3.- Esquema genérico de solicitaciones.

Antes de iniciar los ensayos para determinar una curva de Wöhler se realizaban los ensayos a compresión simple (estático) para obtener la resistencia a compresión ( $f'_c$ ) de las probetas correspondientes, valor que es necesario para la definición de la sollicitación ( $S=f_{max}/f'_c$ ). Esta *actualización* de  $f'_c$  es aconsejable, en especial, porque al ser los ensayos a fatiga bastante largos en el tiempo y haberse utilizado conglomerantes con cenizas volantes, con fraguado más lento y más prolongado, la resistencia a compresión podría haber evolucionado de forma sensible hasta el momento de comenzar a ensayar a fatiga dichas probetas.

## 5.5.- RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS

### 5.5.1.- Resultados ensayos

Como se acaba de indicar, se realizaron diversos ensayos a compresión simple como referencia para los ensayos a fatiga. Las resistencias a compresión medias obtenidas para cada una de las tres dosificaciones utilizadas fueron las siguientes:

- Dosificación 1 (probetas españolas con polímero): 20.6 MPa
- Dosificación 2 (probetas españolas sin polímero): 26.8 MPa
- Dosificación 3 (probetas holandesas; con polímero): 23.2 MPa
- Dosificación 4 (probetas alemanas con microsilice): 13.9 MPa

Los resultados de los ensayos a fatiga se han representado como diagramas  $S-N$  (curvas de Wöhler). Las expresiones analíticas que se proporcionan con posterioridad fueron obtenidas mediante regresiones lineales entre  $S$  y  $\log N$ . En este caso, la pendiente de las rectas correspondientes puede expresarse como  $\beta(1-\alpha R)$ , donde  $\beta$  y  $\alpha$  son constantes del hormigón (Aas-Jakobsen, 1970). Cada punto de las curvas  $S-N$  corresponde a un ensayo. En esas curvas se incluyen todos los resultados obtenidos, incluidos los de aquellas probetas que no habían llegado a rotura tras  $2 \cdot 10^6$  ciclos (máximo que se consideró en los ensayos) en cuyo caso son representados con un punto y una flecha hacia la derecha. Aunque se dispone de algún resultado obtenido con un número mayor de ciclos.

Como ya se ha indicado, la dosificación 1 fue utilizada para estudiar la influencia de  $R$  en el comportamiento a fatiga de hormigones porosos con polímero. La figura 5.4 muestra los diagramas  $S-N$  para  $R=0.5$ ,  $0.2$  y  $0.05$ . Este último valor corresponde al más realista desde el punto de vista del efecto de los vehículos sobre el pavimento.

Los resultados mostrados en la figura confirman que, como ocurre en otros materiales, la resistencia a fatiga aumenta al aumentar  $R$ . Es decir, para un valor constante de  $f_{max}$ , la resistencia a fatiga aumenta cuando la amplitud de los ciclos de carga disminuye. Puede observarse así mismo, que para valores bajos de  $N$ , los diagramas  $S-N$  tienden a converger hacia valores de  $S$  mayores que 1. Este hecho es debido a que la resistencia a compresión utilizada como referencia fue obtenida mediante ensayos estáticos de diferente naturaleza a los ensayos dinámicos, y por lo tanto la relación entre el valor de  $S$  al cual converge cada diagrama  $S-N$  y el valor de  $S=1$  nos da una idea del fenómeno de rigidización que sufre el hormigón cuando es sometido a procesos muy rápidos de carga.

Las constantes  $\alpha$  y  $\beta$  anteriormente citadas se pueden aproximar, en este caso (dosificación 1), por los valores  $\beta=0.0714$ , mayor que el habitual en hormigones convencionales ( $\beta=0.0685$ ), y  $\alpha=0.6$ , menor que el habitual en los mismos ( $\alpha=1.0$ ). Los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  tomados como referencia son los obtenidos por Tepfers y Kutti (1979) a partir de la expresión de Aas-Jakobsen y son válidos tanto para hormigones densos (convencionales) como para hormigones ligeros. No obstante, hay que tener en cuenta que las expresiones de esos autores hacen pasar las curvas  $S-N$  por el punto  $S=1$ , lo cual, a partir de resultados experimentales con frecuencias altas no es posible.

Finalmente, para valores altos de  $N$  se puede observar que cuando  $R$  aumenta,  $S$  también aumenta. Así para  $R=1$  ( $f_{min}=f_{max}$ ; carga constante), los valores de la resistencia corresponderán a los asociados al fenómeno de *cansancio* del hormigón (rotura con carga sostenida inferior a la obtenida en un ensayo estático rápido), causado por la progresiva microfisuración del material sometido a tensión.

La Figura 5.5 muestra los diagramas  $S-N$  obtenidos con cada una de las dosificaciones utilizadas (1, 2, 3, y 4) para un valor constante de la razón ( $R=0.05$ ). Asimismo esta figura incluye el diagrama  $S-N$  propuesto por Tepfers y Kutti (1979) para hormigones en masa, densos o ligeros con el mismo valor de la razón,  $R=0.05$ .



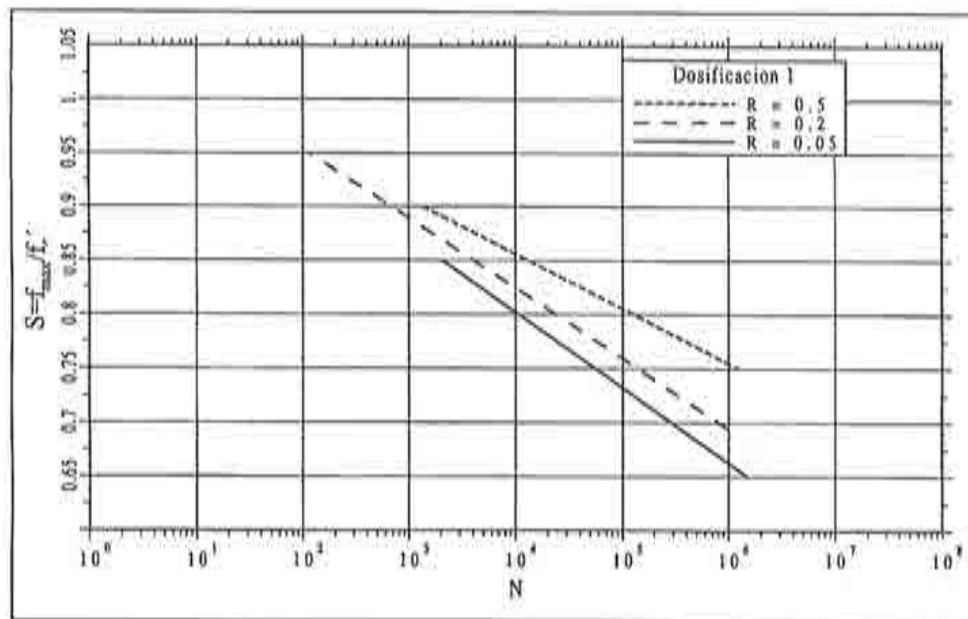


Figura 5.4.- Diagramas S-N de las probetas españolas con polímero (dosificación 1) para tres valores de R (0.5, 0.2 y 0.05).

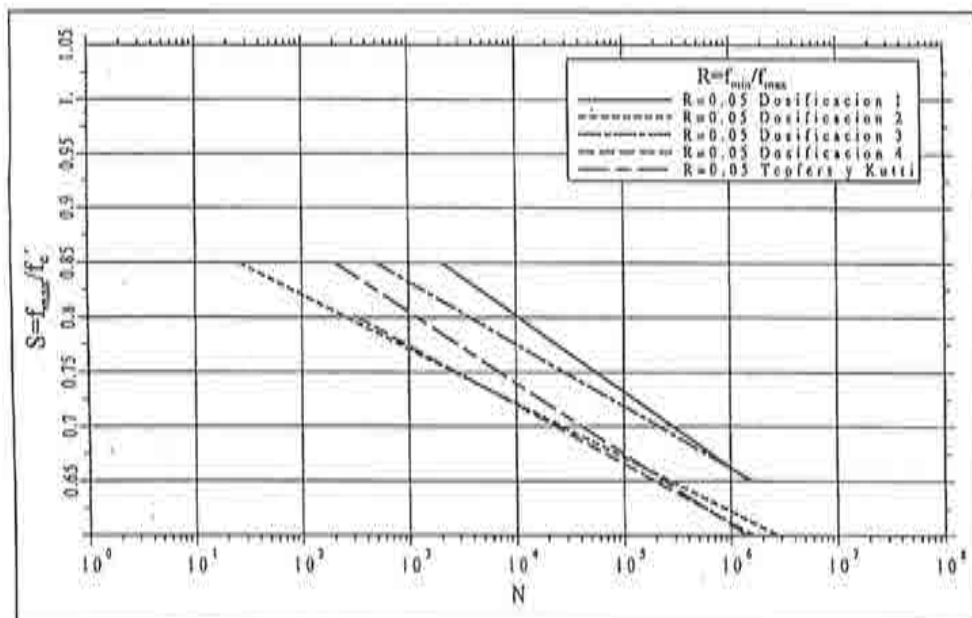


Figura 5.5.- Diagramas S-N de las probetas de hormigón poroso con y sin polímero (dosificaciones 1, 2, 3 y 4) y para hormigón convencional (Tepfers y Kutti, 1979) con  $R=0.05$ .

En la citada figura 5.5. puede observarse como la adición de polímeros mejora el comportamiento a fatiga de los hormigones porosos. De esta forma, para un valor constante de  $S$  ( $f_{max}/f'_c$ ), la vida a fatiga ( $N$ ) de un hormigón poroso con polímero (dosificaciones 1 y 3) mejora, aproximadamente, en un orden de magnitud en comparación con un hormigón poroso sin polímero (dosificaciones 2 y 4). Esta mejora no se mantiene constante en todo el rango de valores de  $S$  ensayado, ya que las regresiones lineales obtenidas no son paralelas, de forma que es máxima para valores bajos de  $N$ , y disminuye a medida que aumenta  $N$ , hasta que la mejora llega a ser poco significativa (por ejemplo, para  $N=2.10^6$  ciclos, la diferencia es del orden de  $0.04f'_c$ , que a efectos prácticos es inapreciable).

Este tipo de mejora inducido por el polímero en el comportamiento a fatiga del hormigón poroso, mayor en la zona de valores altos de  $S$  (bajo número de ciclos), y decreciente con  $N$ , se observa también en otros tipos de hormigones con polímero y en otros tipos de cargas. Un ejemplo en este sentido es el comportamiento de vigas de hormigón de polímeros (PC) sometidas a fatiga en ensayos a flexotracción (Hsu, 1983).

Cara al análisis en relación al comportamiento a fatiga de otros hormigones, en la citada figura 5.5. puede observarse que los diagramas  $S-N$  para hormigón denso (esta última curva) y poroso, con o sin polímero (dosificaciones 1, 2, 3 y 4), son diferentes. Consecuentemente, se puede concluir que no es posible extrapolar los diagramas correspondientes a hormigones densos para caracterizar el comportamiento a fatiga de hormigones porosos.

De la comparación de esas curvas se deduce que el comportamiento a fatiga de los hormigones porosos sin polímeros (dosificaciones 2 y 4) es peor que el de los hormigones convencionales (caracterizados éstos por la expresión de Tepfers y Kutti), aunque esa diferencia es muy pequeña en todo el rango estudiado y, concretamente, en la zona útil para el proyecto de pavimentos es inexistente. Mientras que, por el contrario, el comportamiento de los hormigones porosos con polímeros (dosificaciones 1 y 3) es ligeramente mejor que el de un hormigón convencional.

El comportamiento de las dos dosificaciones sin polímeros (2 y 4) es idéntico, por lo cual, y teniendo en cuenta las diferencias existentes en su composición y en sus características resistentes (ambas dosificaciones presentan una gran diferencia en sus valores de resistencia a compresión) podríamos deducir que sí es posible obtener una ley de comportamiento a fatiga genérica para cualquier hormigón poroso (sin polímeros), de la misma forma que si es posible hacerlo para otros tipos de hormigones. No obstante, para ello deberían ser realizados nuevos ensayos con otras dosificaciones.

Las diferencias observadas en el comportamiento a fatiga correspondiente a las dosificaciones 1 y 3, ambas con polímero, son muy pequeñas. Así, por ejemplo, para  $N=1,000$  ciclos,  $\Delta S=0$ . Estas diferencias son probablemente debidas al tipo y dosificación de áridos empleados en cada caso, más que a la variación en la proporción del polímero utilizado. La mejora que induce el polímero en el comportamiento a fatiga del hormigón puede considerarse debida a que hace más dúctiles los enlaces entre partículas de árido, por lo que estos resisten mejor la acción de los ciclos de carga y descarga sin llegar a rotura. Probablemente, a partir de una cierta cantidad de polímero este efecto no se incrementa sensiblemente y el comportamiento a fatiga deja de mejorar. Pese a lo anterior, la utilización

de mayores dosificaciones de polímero puede ser necesaria por otro tipo de criterios (por ejemplo, resistencia a ciclos hielo-deshielo o para evitar el arrancamiento de partículas).

### 5.5.2.- Expresiones analíticas

Las expresiones analíticas obtenidas para los diagramas  $S-N$  citados en el apartado anterior, así como el coeficiente de correlación  $r$  correspondiente, son los siguientes:

- Probetas españolas con polímero (dosificación 1):

$$S = 1.058 - 0.050 \cdot \log N \quad R = 0.5 \quad r = 0.947 \quad (5.1)$$

$$S = 1.084 - 0.065 \cdot \log N \quad R = 0.2 \quad r = 0.958 \quad (5.2)$$

$$S = 1.080 - 0.069 \cdot \log N \quad R = 0.05 \quad r = 0.841 \quad (5.3)$$

- Probetas españolas sin polímero (dosificación 2):

$$S = 0.920 - 0.050 \cdot \log N \quad R = 0.05 \quad r = 0.806 \quad (5.4)$$

- Probetas holandesas, con polímero (dosificación 3):

$$S = 1.003 - 0.057 \cdot \log N \quad R = 0.05 \quad r = 0.834 \quad (5.5)$$

- Probetas alemanas, con microsilice (dosificación 4):

$$S = 0.935 - 0.054 \cdot \log N \quad R = 0.05 \quad r = 0.950 \quad (5.6)$$

Como se ha indicado con anterioridad, adicionalmente se ha realizado un análisis estadístico de cada uno de los diagramas  $S-N$  obtenidos, mediante la determinación de las bandas de confianza sobre la media asociadas a un nivel de confianza del 90%. En las Figuras 5.6, 5.7 y 5.8 se muestran los resultados obtenidos para la dosificación 1 y  $R=0.5$ , 0.2 y 0.05, respectivamente. Se puede observar en estas figuras que dichas bandas de confianza son relativamente estrechas, por lo que la dispersión de los resultados individuales, que también se indican, es relativamente baja.

Por otro lado, las figuras 5.9, 5.10 y 5.11 muestran estos mismos resultados para las dosificaciones 2, 3 y 4 ( $R=0.05$ ). En estos últimos casos las bandas de confianza son algo más amplias que las correspondientes a la dosificación 1 y  $R=0.05$  (Figura 5.11). El comportamiento más frágil de las probetas correspondientes a la dosificación 2 (sin polímero) puede justificar la mayor dispersión en este caso. Por lo que respecta a las probetas correspondientes a la dosificaciones 3 y 4 (dosificaciones holandesa y alemana respectivamente), puede haber influido el propio procedimiento de fabricación o a factores ligados al transporte, ya que todos los ensayos fueron realizados de forma análoga.

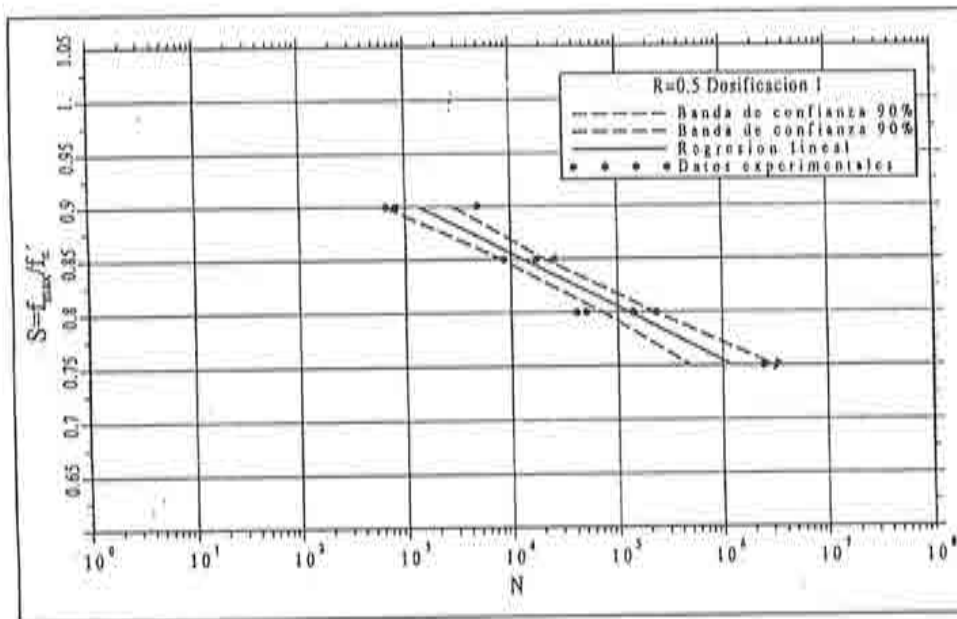


Figura 5.6.- Resultados individuales, diagrama S-N y bandas del 90% de confianza de las probetas españolas con polímero y R=0.5.

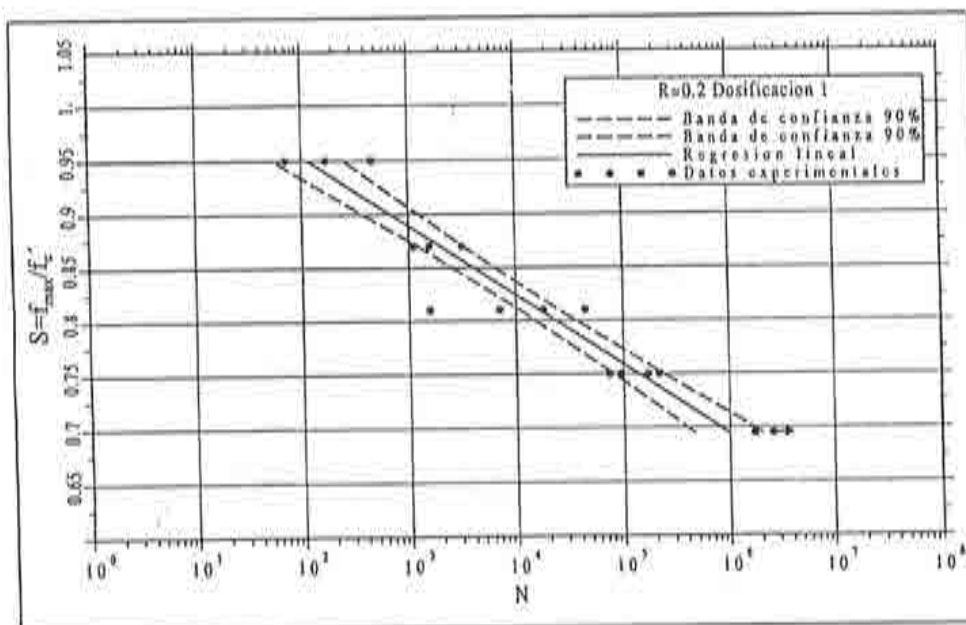


Figura 5.7.- Resultados individuales, diagrama S-N y bandas del 90% de confianza de las probetas españolas con polímero y R=0.2.



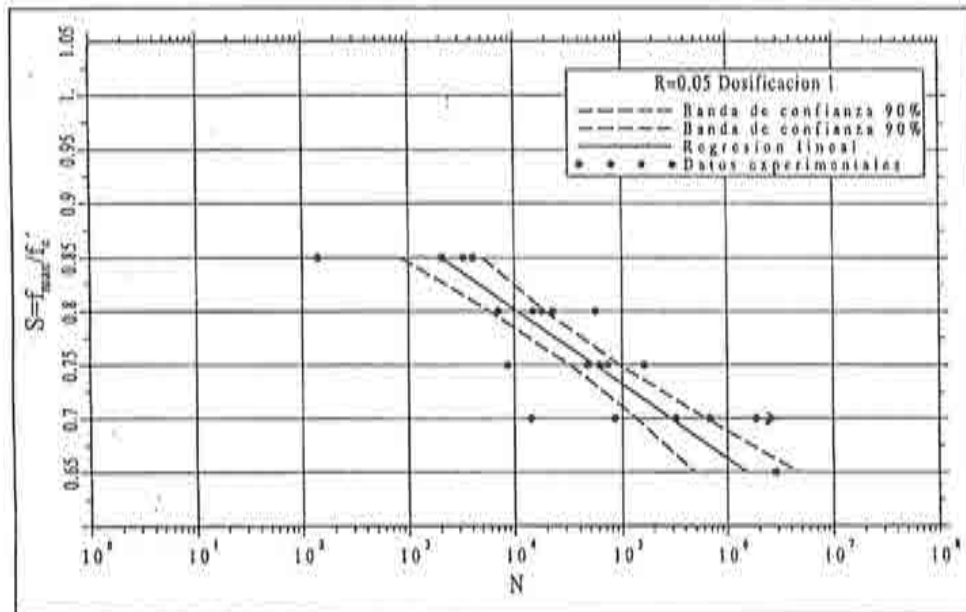


Figura 5.8.- Resultados individuales, diagrama S-N y bandas del 90% de confianza de las probetas españolas con polimero y  $R=0.05$ .

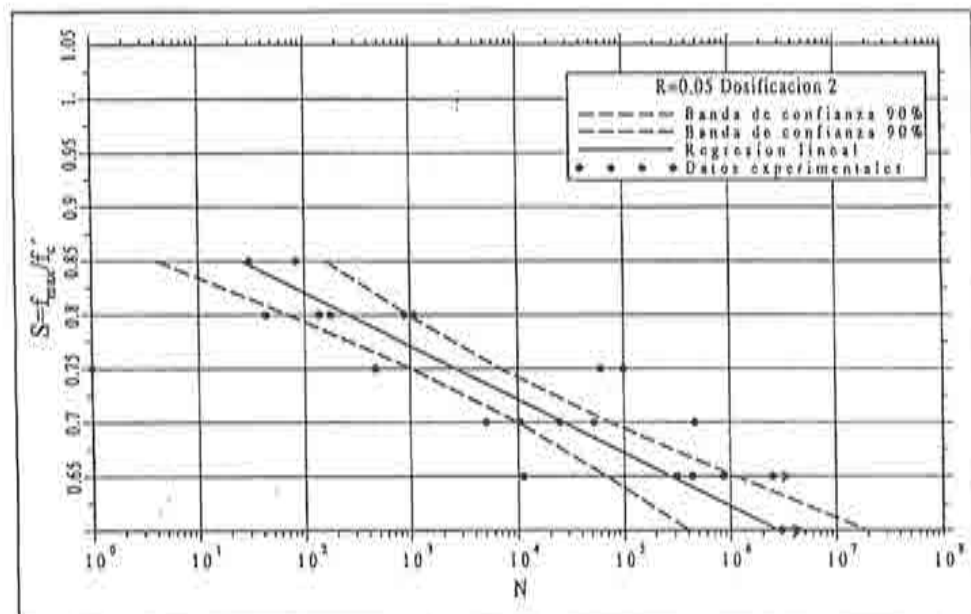


Figura 5.9.- Resultados individuales, diagrama S-N y bandas del 90% de confianza de las probetas españolas sin polimero y  $R=0.05$ .

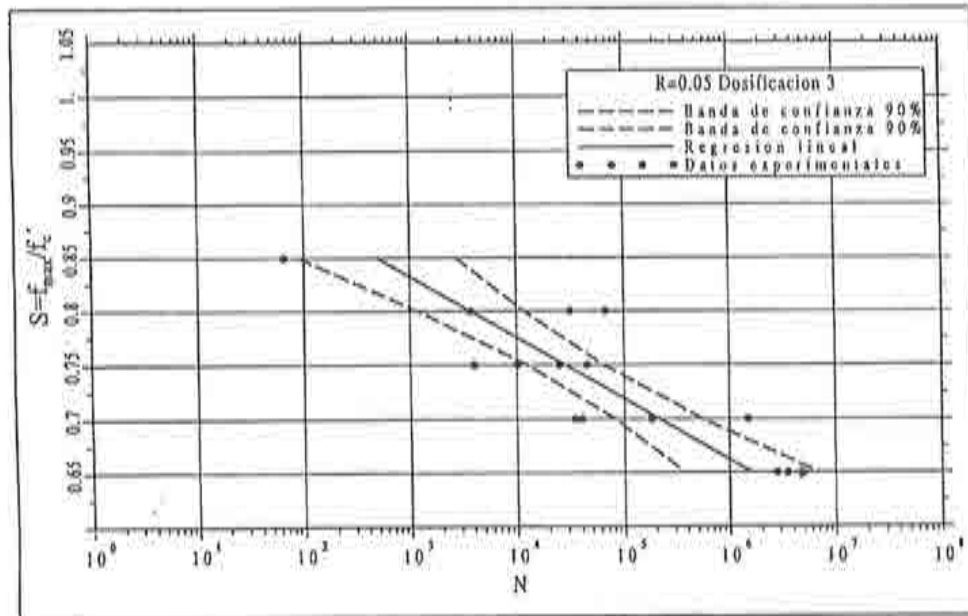


Figura 5.10.- Resultados individuales, diagrama S-N y bandas del 90% de confianza de las probetas holandesas, con polímero, y  $R=0.05$ .

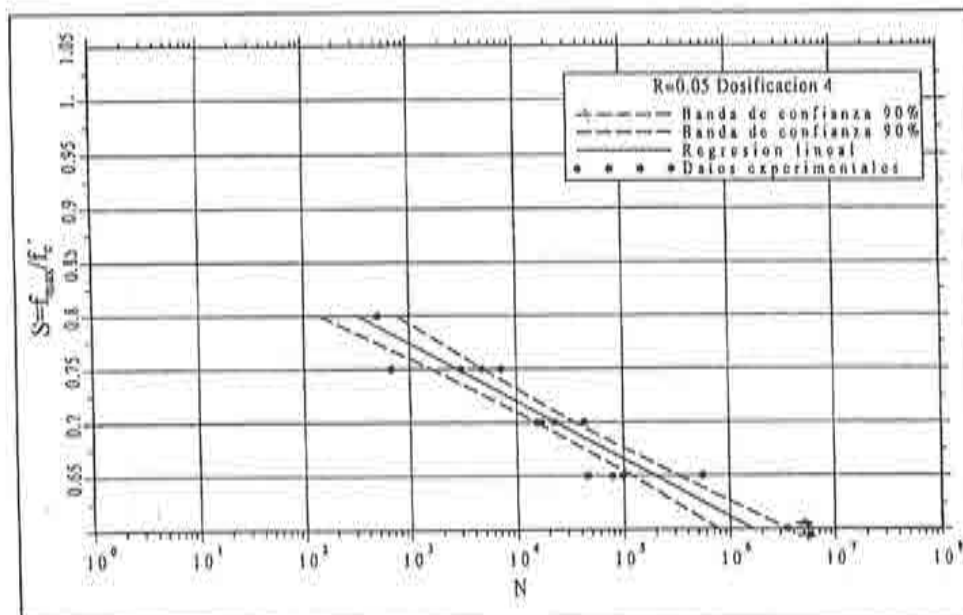


Figura 5.11.- Resultados individuales, diagrama S-N y bandas del 90% de confianza de las probetas alemanas, con polímero, y  $R=0.05$ .

## 5.6.- COMPORTAMIENTO TERMO-DEFORMACIONAL

Durante la realización de los ensayos de fatiga anteriormente presentados se observó un sensible incremento de la temperatura de las probetas no constatado con anterioridad en ensayos de fatiga de otros tipos de hormigones, Oliveira (1992) y Fernández (1992), realizados bajo las mismas condiciones. Por ello se procedió a disponer tres termopares en las probetas durante la realización de los ensayos, siendo ello posible gracias a la porosidad del hormigón lo que permitía introducir la punta de los termopares a una profundidad aproximada de 1 cm dentro de la probeta. Se dispusieron los termopares en las zonas superior, media e inferior, según la disposición que puede observarse en la figura 5.12. Asimismo también se registraba la temperatura ambiente.

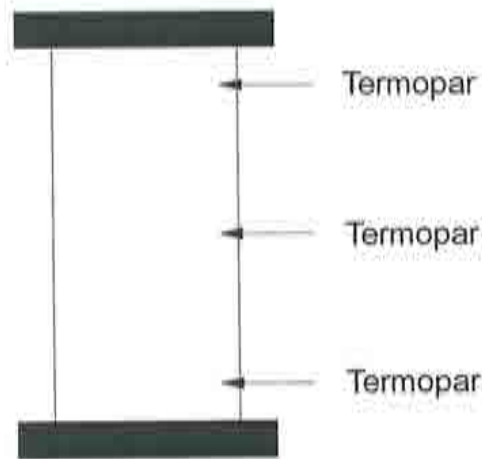


Figura 5.12.- Disposición de los termopares en la probeta.

Con el objetivo de poder correlacionar los datos sobre la evolución de la temperatura con la evolución de la deformación, eran registradas durante el ensayo las deformaciones máximas y mínimas de la probeta correspondientes a diferentes ciclos. Por consiguiente los valores de deformación son unos valores totales asociados a la altura de toda la probeta. La textura de un hormigón poroso impedía el empleo de galgas que permitiesen la determinación de la deformación en puntos concretos de la probeta.

En la figura 5.13 se presentan los resultados de la evolución de la deformación máxima y mínima con el número de ciclos. Esta figura corresponde a los resultados de una probeta de la dosificación 4 (alemana) sometida a una sucesión de ciclos, caracterizados por  $R=f_{min}/f_{max}=0.05$  y  $S=f_{max}/f_c=0.65$  que rompió tras 559.992 ciclos. En ella se constata la existencia de tres fases en la evolución de la deformación. En una primera fase la deformación avanza muy rápidamente, hasta que al llegar aproximadamente al 5 % de N (rotura) ese proceso se estabiliza y la deformación progresa más lentamente, hasta que nuevamente y aproximadamente al 90 % de N la deformación vuelve a aumentar más rápidamente hasta llegar a la rotura final por fatiga. Esta evolución de la deformación durante



el ensayo de fatiga, que es ampliamente conocida, C.E.B. 188 (1988), está relacionada con las diferentes fases del proceso de evolución de la fisuración que durante el ensayo a fatiga se produce en la probeta.

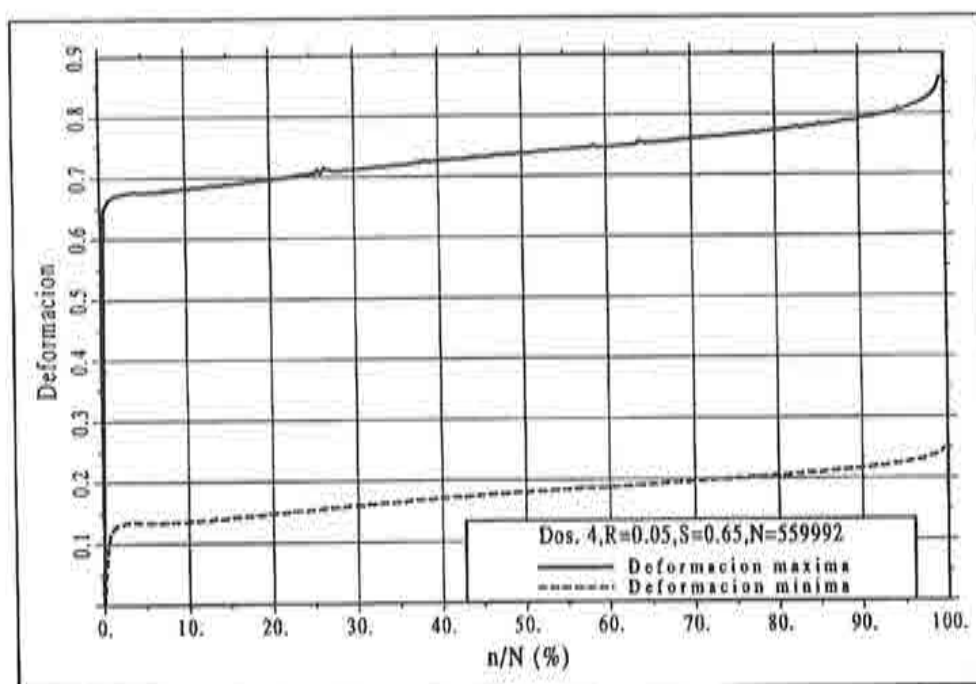


Figura 5.13.- Evolución de la deformación total máxima y mínima durante un ensayo a fatiga.

En la figura 5.14 se muestran los resultados de la temperatura registrados por los tres termopares de una probeta de la dosificación 3 (holandesa) sometida a una sucesión de ciclos de carga y descarga, caracterizados por  $R=0.05$  y  $S=0.70$ , que rompió tras 1.493.113 ciclos. Como se puede observar la evolución de ésta durante el ensayo responde al mismo comportamiento anterior en lo que hace referencia a la existencia de tres fases. En realidad esas tres fases en el proceso de fisuración son observadas también si durante el ensayo se registran las emisiones acústicas o si se realizan ensayos de ultrasonidos durante el mismo C.E.B. 188 (1988).

Como se puede observar en la propia figura 5.14 la temperatura más alta corresponde a la registrada en la zona media de la probeta, lo cual es lógico si tenemos en cuenta que en esa zona ya han desaparecido los efectos favorables de confinamiento que en las zonas superior e inferior de la probeta se produce como consecuencia del rozamiento entre el plato de la prensa y la probeta. En la misma figura se observa también como la temperatura es ligeramente superior en el termopar superior que en el inferior lo cual tiene su explicación en el hecho de que el plato superior es el móvil y por tanto es en esa zona donde se están produciendo unas mayores deformaciones. En ese mismo sentido cabe destacar que la rotura a fatiga se concentraba en la mayoría de las ocasiones en la zona superior de la probeta.



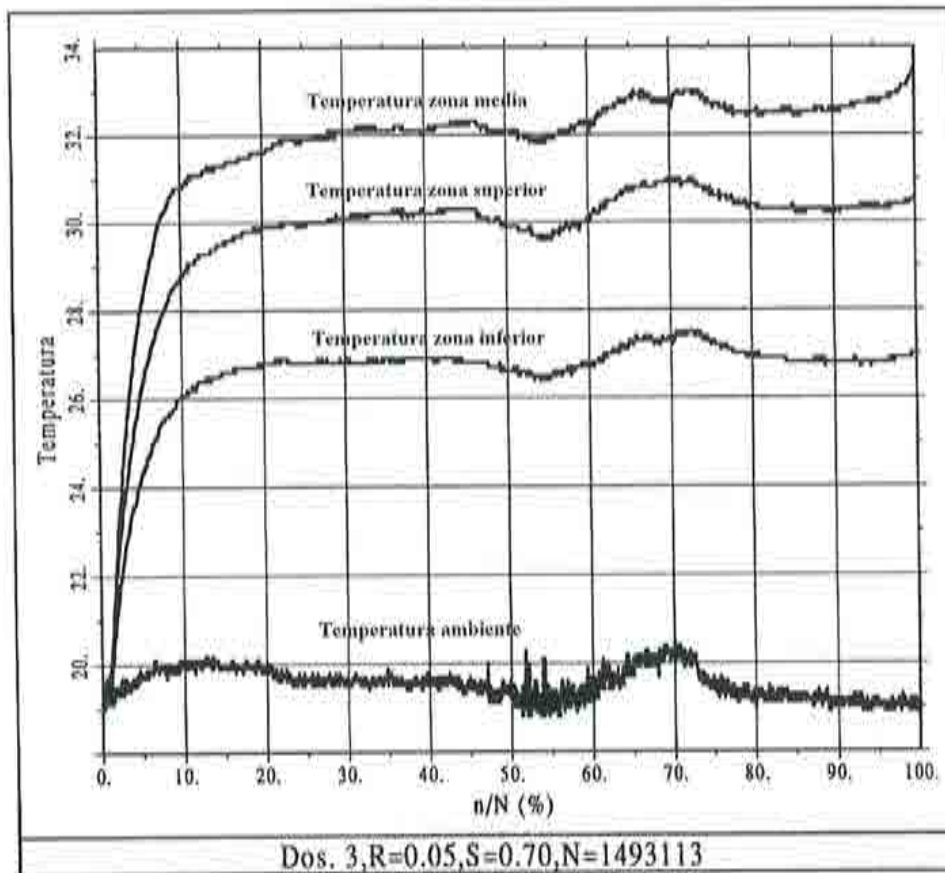


Figura 5.14.- Evolución de la temperatura en una probeta sometida a un ensayo de fatiga.

Para que esas tres fases del desarrollo de la microfisuración aparezcan claramente es necesario que el ensayo a fatiga tenga una duración mínima, puesto que, si la rotura a fatiga es rápida, el proceso de microfisuración no presenta esa zona intermedia de estabilización de la temperatura, sino que tanto la deformación como la temperatura aumentan rápidamente desde el inicio hasta el final del ensayo. Un ejemplo de esto se puede observar en la figura 5.15 correspondiente al ensayo de una probeta de la dosificación 1 (española con polímeros) sometida a una sucesión de ciclos de carga y descarga, caracterizados por  $R=0.05$  y  $S=0.80$ , que rompió tras 56 465 ciclos, y donde se ve como la temperatura en los tres termopares aumenta durante toda la duración del ensayo.

En ambos casos (Figuras 5.14 y 5.15) la diferencia entre la temperatura en la zona media (máxima) y la temperatura ambiente en el instante de rotura son aproximadamente iguales y del orden de los  $15^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo esta coincidencia no se producía en todos los ensayos y se llegaron a registrar diferencias entre ambas temperaturas de más de  $25^{\circ}\text{C}$ .

Destacar asimismo que en otros ensayos llegaron a alcanzarse temperaturas de hasta  $50^{\circ}\text{C}$ . Estas altas temperaturas durante los ensayos se registraron para las probetas

correspondientes a las dosificaciones 1 y 2, mientras que los resultados para las dosificaciones 3 y 4 fueron menores y del orden de los registrados en la figura 5.14.

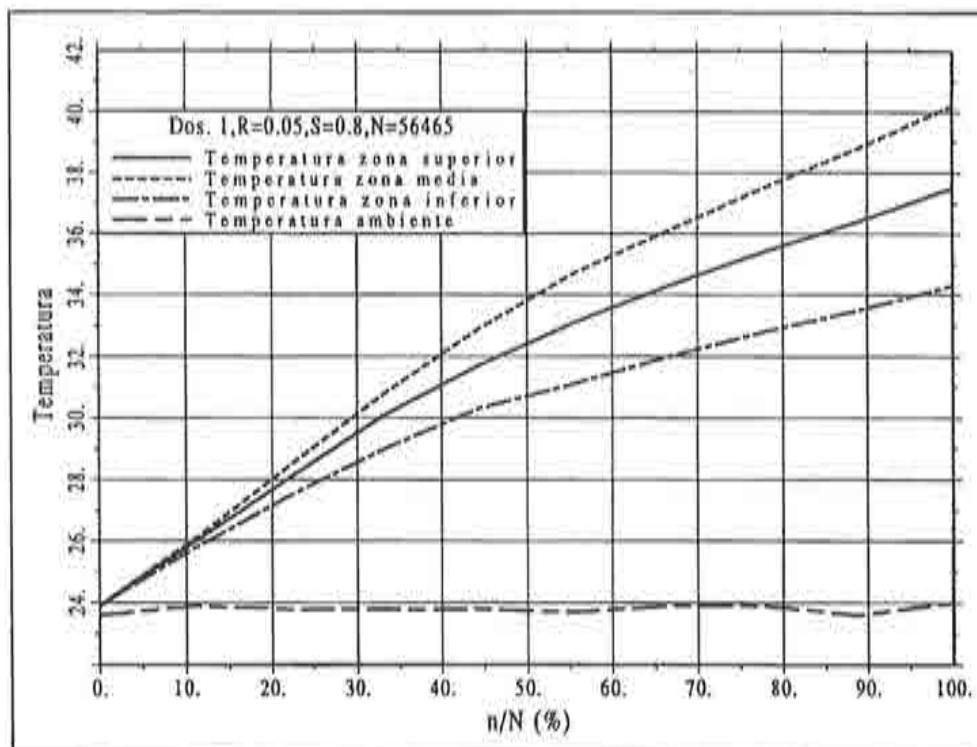


Figura 5.15.- Evolución de la temperatura en una probeta sometida a un ensayo de fatiga.

La disipación de energía que se produce durante un ciclo de carga (ciclo de histéresis) es función de la frecuencia de carga. El rango de frecuencias en la que esta disipación es máxima se corresponde con una zona intermedia como se puede observar en la figura 5.16. En la zona de bajas frecuencias, es decir con una larga duración del ciclo las curvas de carga y descarga se corresponden con las asociadas a un proceso de carga en condiciones isotermas puesto que la duración del ciclo permite un intercambio calorífico con el medio. Por el contrario en la zona de altas frecuencias las curvas de carga y descarga son las asociadas a un proceso en condiciones adiabáticas, eso es, sin intercambio calorífico con el medio, presentando estas últimas una rigidez mayor que la de las curvas en condiciones isotermas. Es en la zona intermedia de frecuencias en la que el área circundada por el circuito de carga y descarga es máxima.

Puesto que no se ha observado en esa disipación de energía en hormigones convencionales en ensayos realizados con esas frecuencias es de suponer que las velocidades de carga y descarga asociadas a esas frecuencias se sitúan lejos de la zona de frecuencias de máxima disipación de energía, pudiéndose suponer que esas frecuencias aseguran unas condiciones adiabáticas durante los ciclos de carga y descarga. El diferente comportamiento observado en los hormigones porosos puede ser atribuido a su estructura extremadamente

abierta que facilita de forma notable los intercambios térmicos con el exterior. Esa estructura ocasionaría que para frecuencias iguales a las empleadas en hormigones convencionales las condiciones térmicas no fuesen las mismas puesto que la estructura porosa permitiría un cierto grado de intercambio calorífico con el exterior con lo cual en realidad nos encontraríamos en la zona intermedia, característica de cada material, del rango de frecuencias asociada a una mayor disipación de energía. Esta particularidad difícilmente se podía observar en ensayos estáticos y sólo ha podido ser constatada en ensayos cíclicos en los cuales esa disipación de energía se multiplica por el número de ciclos totales.

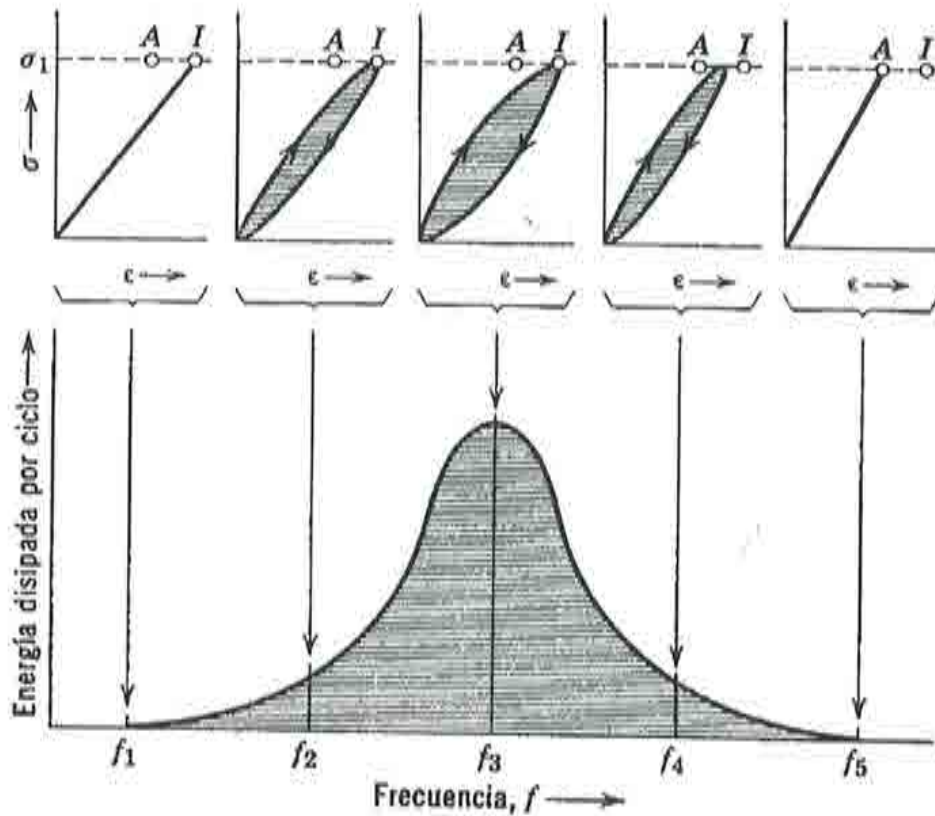


Figura 5.16.- Energía disipada en un ciclo de histéresis en función de la frecuencia.





## CAPÍTULO 6

### CONSIDERACIONES DE DISEÑO

#### 6.1.- INTRODUCCIÓN<sup>1</sup>

A una capa de rodadura, como parte integrante de una estructura más global, se la debe exigir diferentes requisitos a ella misma y a la interacción con el resto de la estructura. Al cuantificar estos requisitos, los valores serán diferentes en función de: las solicitaciones exteriores, ubicación de la obra, interacción con el resto de la estructura de firme y los condicionantes generales de la puesta en obra. En la tabla 6.1 se presentan los requisitos generales a pedir a una capa de rodadura de hormigón poroso. Asimismo se expresan algunas de las propiedades fundamentales que conforman dichos requisitos, así como los factores más significativos que inciden en los mismos.

En lo que sigue se hace una breve revisión de dicha tabla, analizando el estado del conocimiento actual sobre dichos temas. En este análisis, no sólo se hace una revisión cualitativa sino que se indican los valores más usuales para cada una de las propiedades vistas.

---

<sup>1</sup> Este capítulo se basa principalmente en los trabajos recogidos en: A.Aguado, J.J.Rosell, A.Josa y C.Jofré (1992), "*Hormigones porosos*". XIX Semana de la Carretera. Toledo, Octubre. Editado con posterioridad en las actas del Congreso, pp. 213-238 por la Asociación Española de la Carretera.

REQUISITOS	PROPIEDAD	PARÁMETROS
Mecánicos (seguridad estructural)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Resistencia compresión</li> <li>* Permeabilidad</li> <li>* Porosidad</li> <li>* Resistencia arrancamiento</li> <li>* Módulo deformación</li> <li>* Coeficiente dilatación</li> <li>* Fatiga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Estructura porosa</li> <li>• Curva granulométrica/dosificación</li> <li>* Características conglomerante</li> <li>• Cantidad de cemento</li> <li>• Tipo de cemento</li> <li>• Empleo modificantes</li> </ul>
Funcionalidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Seguridad                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Riesgo deslizamiento</li> <li>• Condición reflexión</li> <li>• Disminución salpicadura</li> </ul> </li> <li>* Confortabilidad                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Textura</li> <li>• Acústica interior</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Estructura porosa</li> <li>• Curva granulométrica/dosificación</li> <li>• Tamaño máximo del árido</li> <li>* Espesor capa rodadura</li> </ul>
Durabilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Condiciones climáticas                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Radiación solar/temper.</li> <li>• Ciclos hielo-deshielo</li> <li>• Presencia nieve</li> </ul> </li> <li>* Acción mecánica tráfico                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo e intensidad</li> <li>• Puntual neumáticos</li> </ul> </li> <li>* Agentes externos                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Polvo y arrastres</li> <li>• Aceites y otros</li> </ul> </li> <li>* Sales deshielo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Características conglomerante</li> <li>* Espesor capa rodadura</li> <li>* Estructura porosa</li> </ul>
Estética	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Geometría</li> <li>* Color</li> <li>* Textura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Estructura porosa</li> <li>• Curva granulométrica/dosificación</li> <li>• Tamaño máximo del árido</li> <li>* Color del cemento</li> <li>* Tipo y cantidad pigmento</li> </ul>
Adecuación ambiental	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Ruido exterior</li> <li>* Drenaje</li> <li>* Descanso visual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Estructura porosa</li> <li>* Espesor capa rodadura</li> <li>* Tipo y cantidad pigmento/cemento</li> </ul>
Aspectos económicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Proyecto</li> <li>* Construcción</li> <li>* Material</li> <li>* Mantenimiento</li> </ul>	

Tabla 6.1.- Requisitos generales a pedir a una capa de rodadura de hormigón poroso.

## 6.2.- PROPIEDADES REQUERIDAS Y PARÁMETROS QUE INCIDEN

### 6.2.1.- Requisitos mecánicos

#### Propiedades

En esta revisión, consideraremos aquellas propiedades, mecánicas e hidráulicas, que aseguran el adecuado comportamiento de la estructura en servicio durante la vida de la misma. Hay que tener presente que de todas las características de un hormigón sólo unas pocas son las principales pudiéndose dar las restantes mediante una correlación con las consideradas principales. Así, es usual especificar la resistencia a compresión del hormigón, dado que otras resistencias (tracción, flexotracción,...) están correlacionadas con aquella; si bien en estos hormigones, los valores de correlación entre estas últimas y la primera son algo superiores en los de un hormigón denso, (Rosell et al., 1987). El orden de magnitud de la resistencia a compresión se sitúa entre 15 y 20 MPa, mientras que los valores para la resistencia a tracción indirecta se sitúan entre 1,6 y 2,1 MPa y para la resistencia a flexotracción se sitúan entre 2,2 y 2,6 MPa.

Una propiedad fundamental en el hormigón poroso es su porosidad y, en consecuencia, la permeabilidad asociada. Estas propiedades son contrapuestas a la resistencia a compresión. Por tanto será preciso encontrar un equilibrio entre dichas propiedades (Aguado et al., 1991). El orden de magnitud es de una porosidad entre el 16 y 24 % y una permeabilidad entre 0,5 y 5 cm/s. Por otro lado el orden de magnitud donde se sitúa la densidad aparente de estos hormigones está entre 1,82 y 1,94 en t/m<sup>3</sup>.

Las tensiones tangenciales que pueden originar los neumáticos de un vehículo frenando o acelerando requieren que se especifique una resistencia al arrancamiento de los áridos dentro de la estructura porosa del hormigón. A falta de ensayos directos unánimemente aceptados cabe señalar que de forma indirecta se puede medir esta propiedad a través del ensayo cántabro (Ver anejo 2). El hormigón poroso modificado con polímeros visto en capítulos anteriores da respuesta satisfactoria a este respecto obteniéndose valores equiparables a los de mezclas abiertas de tipo bituminoso.

Los valores del módulo de deformación longitudinal ( $E_c$ ), del coeficiente de dilatación ( $\alpha$ ), y de otras propiedades térmicas se han dado en el capítulo 3. Estas propiedades vienen requeridas por la necesaria compatibilidad de deformaciones que debe producirse entre la capa de rodadura de hormigón poroso y el hormigón del soporte (vibrado, compactado con rodillo). En esa interfase aparecerán unas tensiones tangenciales que podrían producir el despegue entre las capas. Este tema, fácilmente resoluble en laboratorio, presenta mayores dificultades en obra y debe ser objeto de especial atención durante la ejecución y en el proyecto, pudiendo condicionar incluso el espesor requerido de la capa de rodadura.

Dado que la capa de rodadura estará sometida a un elevado número de ciclos de las distintas acciones que actúan sobre las mismas, será necesario conocer el comportamiento a fatiga de estos hormigones. Hasta la fecha existen escasas experiencias concretas de laboratorio, tal como la que se presenta en el capítulo 5, si bien falta, probablemente, una



mayor profundización en el tema, en aras a poder definir unas leyes de comportamiento utilizables en proyecto.

### Parámetros

En las propiedades enunciadas anteriormente tiene una gran influencia la estructura porosa del hormigón y las características de los puentes de unión. Como parámetros determinantes se encuentran la curva granulométrica de los áridos, la cual actúa sobre la estructura porosa, y las prestaciones del conglomerante que actúa sobre los puentes de unión. Con respecto a las prestaciones del conglomerante cabe destacar la significativa incidencia de: la cantidad de cemento, el tipo de cemento (finura de molido, categoría, etc.,) y el empleo de modificantes (cenizas volantes, microsilíce, polímeros).

Otros parámetros tales como: relación agua/cemento, tamaño máximo del árido, tipo de árido y otros, inciden asimismo sobre las propiedades enunciadas de análoga forma que en un hormigón convencional.

### **6.2.2.- Funcionalidad**

#### Propiedades

Son aquellos requisitos que aseguran la función para la cual la estructura está proyectada. En este grupo se incluye en primer lugar la seguridad hacia el usuario, la cual queda reflejada de varias formas tales como:

- Disminución del riesgo de deslizamiento en el usuario peatonal o de aquaplaning en los vehículos.
- Mejora de las condiciones de reflexión de las luces, ya sean de los propios vehículos o exteriores.
- Disminución de las salpicaduras procedentes del tráfico de otros vehículos.

Todo ello, aparte de la seguridad, incide en la confortabilidad del usuario de dicha capa de rodadura. Esta confortabilidad, en la que la textura del acabado es importante, se manifiesta asimismo en una mejora de las condiciones acústicas en el interior del vehículo, en un orden de magnitud incluso superior que las que se pueden alcanzar con actuaciones sobre el propio vehículo, sin que los costes de estas actuaciones sean excesivos.

#### Parámetros

El parámetro principal que incide en estas propiedades es nuevamente la estructura porosa del hormigón, reflejada por la dosificación y por la curva granulométrica, en la que el tamaño máximo del árido incide en mayor medida que en los requisitos mecánicos. Es importante señalar que la geometría de la capa de rodadura, dada por su espesor, influye de forma significativa. Así, un espesor demasiado reducido de dicha capa, puede traducirse en



un pobre comportamiento desde el punto de vista tanto acústico como de embalse, con incidencia directa en la seguridad. Este hecho comporta la definición de un espesor mínimo de la capa de rodadura. Superado este valor mínimo, las propiedades anteriores mejoran, si bien no de forma lineal (algunas de ellas tienden a una asíntota). Ello debe hacer pensar sobre el valor del espesor a elegir, ya que el aumento de espesores tiene una evidente repercusión sobre el coste. Como orden de magnitud se estima que el espesor mínimo se sitúa en 5 cm si bien, para aplicaciones en carreteras, probablemente debería situarse en espesores superiores a 7 cm.

### 6.2.3.- Durabilidad

#### Propiedades

Al hormigón poroso de la capa de rodadura se le debe exigir un adecuado comportamiento durante la vida de la estructura frente a los agentes agresivos que pueden incidir en su durabilidad y funcionamiento. Estos agentes pueden agruparse en: condiciones climáticas, acción mecánica del tráfico y agentes externos de aportación.

Las condiciones climáticas (radiación solar incidente, temperatura, ciclos hielo-deshielo, etc.,) son inherentes a la ubicación de la estructura, por lo que usualmente no es posible actuar sobre las mismas. En cualquier caso, deberán tenerse presente en el proyecto incidiendo de forma directa en la elección de la solución en hormigón poroso a emplear (materiales, espesores, etc.,), incluso pudiendo hacer desechable esta solución.

Hay que tener presente que las condiciones climáticas (por ejemplo, inviernos muy duros) pueden incidir en el tipo de neumático a utilizar (por ejemplo, neumáticos dotados de clavos), lo que a su vez incide en lo que se ha denominado como acciones mecánicas del tráfico. Estas son las correspondientes a las cargas verticales por eje transmitidas por los vehículos y a otras acciones tales como giros, frenadas, etc.,. El tipo de tráfico (pesado, ligero, etc.,) y la intensidad del mismo son aspectos fundamentales que inciden en el comportamiento a fatiga, a través de la curva de evolución de la resistencia con el número de ciclos y el rango de tensiones.

Dentro de los agentes externos de aportación puede señalarse: polvo y arrastres sólidos, aceites y derivados, sales de deshielo, teniendo un efecto diferente en cada caso. Así el polvo y los arrastres sólidos pueden provocar con el tiempo problemas de colmatación. Ciertamente que la succión que provoca el propio tráfico puede reducir este efecto. Esta reducción es función del tipo de aportes y de tráfico.

Sobre el tema de colmatación quedan aún muchos aspectos en los que profundizar. No obstante existen experiencias sobre limpieza con aire o agua a presión con el fin de regenerar la porosidad, si bien su eficacia no es total, por lo que a largo plazo podría acabar produciéndose la colmatación de estos hormigones. Así pues, el diseño de un pavimento de hormigón poroso debe comportar necesariamente la definición de la vida útil del mismo.

Los aceites, las grasas y otros productos similares afectan el hormigón poroso de forma análoga que a un hormigón convencional y sus efectos, dependerán de la mayor o menor facilidad de progresión en la masa interna del hormigón y de las características de los puentes de unión en la masa.

Las sales de deshielo, como es sabido, actúan químicamente degradando el hormigón poroso usual. Para evitar este problema, el empleo de polímeros se manifiesta como una solución muy satisfactoria, ya que los polímeros, en general, tienen un buen comportamiento frente a agentes químicos agresivos.

### Parámetros

Existen tres parámetros básicos que contribuyen a mejorar la durabilidad, que son: tipo de conglomerante, espesor de la capa y la estructura porosa. El tipo de conglomerante incide de forma positiva tanto en el comportamiento frente a agentes agresivos de tipo químico como en el comportamiento mecánico frente a las acciones del tráfico (arrancamiento árido en frenadas y aceleraciones).

El espesor de la capa de rodadura contribuirá a reducir el nivel de tensiones originadas por la acción combinada de las cargas de tráfico y los efectos de origen térmico y en consecuencia, mejorar el comportamiento frente a la fatiga. Por su parte, la estructura porosa tiene una incidencia directa sobre la colmatación.

### **6.2.4.- Estética**

#### Propiedades

Desde este punto de vista se pueden considerar las siguientes características: geometría general en planta de la obra, textura superficial y color.

En cuanto a la geometría general en planta de la obra, la facilidad de puesta en obra del hormigón poroso le permite adaptarse a geometrías no usuales que, por razones arquitectónicas, se deseen proyectar.

Por lo que respecta a la textura superficial, la dosificación habitual de estos hormigones tiene como consecuencia que se oscile en el campo de las micro y de las macro texturas según la clasificación definida en (A.I.P.C.R., 1987), si bien dentro de la segunda se obtienen resultados que corresponden tan sólo a sus niveles inferiores. Esto es debido fundamentalmente al valor del tamaño máximo del árido, que vendrá condicionado por el espesor de la capa porosa a ejecutar y por las prestaciones mecánicas e hidráulicas requeridas. Para las capas superficiales de un pavimento, la cota superior de este tamaño máximo puede establecerse en 12 mm.

El color, que por razones arquitectónicas puede venir prefijado en proyecto, puede conseguirse o modificarse combinando distintos factores como son el uso de pigmentos, la utilización de áridos coloreados o el empleo de cemento gris o blanco. Para una máxima



versatilidad, sin embargo, se deben utilizar necesariamente pigmentos. Esto implica un incremento de coste que puede influir en el sistema constructivo a utilizar (ejecución en dos capas).

Cuando el pavimento tenga un marcado carácter estético, lo cual puede ser predominante en algunas obras como paseos peatonales, debe tenerse en cuenta que, para obtener un correcto resultado, es conveniente utilizar pigmentos de suficiente calidad en cuanto a su uniformidad de color. Asimismo ha de tenerse en cuenta la posible aparición de eflorescencias en superficie (Josa, 1987). En cuanto a la durabilidad del color, que puede verse afectado por la acción de los rayos ultravioleta, es necesario emplear pigmentos suficientemente resistentes a dicha acción, por lo que deben ser de tipo inorgánico.

### Parámetros

Evidentemente, en los aspectos geométricos, las características del hormigón como material no tienen incidencia en la estética. En esta inciden la textura superficial y color. Sobre la textura superficial, los factores principales son el tamaño máximo del árido y la estructura porosa resultante. En esta no sólo incide la dosificación, curva granulométrica, etc., sino también la energía de compactación utilizada en la puesta en obra.

En el color intervienen el color del cemento (blanco y gris) y el tipo y cantidad de pigmento colorante que se utilice. En definitiva, son los finos de la mezcla los que principalmente actúan sobre el color. El desgaste que introduce el tráfico puede poner de manifiesto el color del árido grueso en contacto con el mismo.

## **6.2.5.- Adecuación ambiental**

### Propiedades

Son aquellos requisitos que deben contribuir a una mejora de la calidad de vida de los usuarios y, del entorno, sin degradar el mismo, en definitiva, hacer posible un desarrollo sostenible. Estos requisitos enfocados al usuario directo (conductor y pasajeros de vehículos y peatón) son los expresados en el apartado 6.2.2. En este caso nos referiremos al usuario indirecto existente en el entorno. Entre estos requisitos pueden incluirse: ruido exterior, drenaje, descanso visual.

El hormigón poroso en capa de rodadura no solo contribuye a reducir el ruido interior del vehículo, sino también el *ruido exterior* emitido. Esta es una de las razones de estudio del proyecto BRITE-EURAM anteriormente citado. Esta reducción puede ser muy interesante para vías urbanas o semiurbanas, pudiéndose complementar con otras medidas en esta dirección. En los informes finales del citado proyecto puede encontrarse una amplia información sobre este punto.

El requisito de *drenaje* quiere expresar en este caso el beneficio que reporta una capa de hormigón porosa como pequeño embalse de regulación frente aguaceros, reduciendo el riesgo de charcos y los efectos derivados. Este factor, entendemos debería tenerse en cuenta

en pavimentos urbanos así como en algunas medianas del mismo tipo, zonas de estacionamiento de bajo tráfico y otras.

La versatilidad que da el color y la textura contribuyen a una adecuada inclusión paisajística y, en consecuencia, a un *descanso visual* que mejora la calidad de vida del usuario directo e indirecto. Recordemos que, asimismo, una capa de rodadura de hormigón poroso reduce la reflexión de luces y las salpicaduras.

### Parámetros

En la absorción de ruido, inciden en gran medida la estructura porosa y el espesor de la capa de rodadura. Ambos parámetros son asimismo determinantes en la capacidad de drenaje (permeabilidad y altura).

Por otro lado, la estructura porosa y en especial el tamaño máximo del árido, marcarán la textura de la superficie. El color de la misma vendrá dado por el color de los finos: cemento, arena y pigmentos en el caso de emplearse.

### **6.2.6.- Aspectos económicos**

La economía de la solución deberá buscarse en cada una de las etapas del proceso constructivo, evaluando el coste total (inicial más mantenimiento). El proyecto de una capa porosa de hormigón no comporta diferencias significativas respecto otras soluciones. Asimismo, la construcción puede hacerse con equipos estándar (Oleaga, 1992), tal como se muestra en el capítulo 4. En el caso de emplear polímeros deberá prestarse atención a la limpieza de equipos, sin requerir tratamientos especiales.

El material, especialmente el conglomerante (tipo y cantidad) es el factor principal de coste que diferencia una solución de otra. En consecuencia se debe optimizar la dosificación atendiendo a los requisitos anteriormente presentados. Una opción a estudiar sería aumentar el espesor de la capa de rodadura reduciendo simultáneamente la cantidad y/o las prestaciones mecánicas del conglomerante.

El mantenimiento es otro factor a tener presente. En este sentido hay que considerar el riesgo de colmatación y en consecuencia, la necesidad de tomar medidas para evitarlo o en caso de presentarse, facilitar la regeneración de la estructura porosa. Este es el parámetro que más incidirá en el coste del mantenimiento.

## **6.3.- ANÁLISIS CONJUNTO**

Al analizar conjuntamente los parámetros que inciden en las propiedades y a través de éstas en los requisitos (ver tabla 6.1, anteriormente presentada), puede verse que unos pocos intervienen prácticamente en todas ellas. Estos parámetros principales son:

- Estructura porosa: curva granulométrica, dosificación.



- Características del conglomerante: tipo, cantidad, empleo de modificante.
- Espesor de la capa de rodadura
- Tamaño máximo del árido

En el proyecto deberá buscarse un equilibrio entre las propiedades requeridas teniendo en cuenta que algunas de ellas son contrapuestas, (Rosell y Aguado, 1989). Ahora bien, hay que hacer notar la gran influencia que puede tener la puesta en obra a través de la compactación. Así, sobre una misma dosificación base, una mayor compactación se traduce en una disminución de la porosidad y en un incremento de las características mecánicas, como por ejemplo, la resistencia al arrancamiento. Ver fig. 6.1.

Si esta dosificación base se modifica, por ejemplo, con un polímero, ello puede facilitar la trabajabilidad y a igualdad de sistemas de puesta en obra, variar las propiedades antes señaladas (línea discontinua de la fig 6.1.). Con ello se quiere ratificar lo anteriormente expuesto, esto es, que no hay una solución única al problema, sino que en cada caso se encontrará una solución teniendo presente los requisitos exigidos y las circunstancias concretas de proyecto, construcción, materiales y mantenimiento.

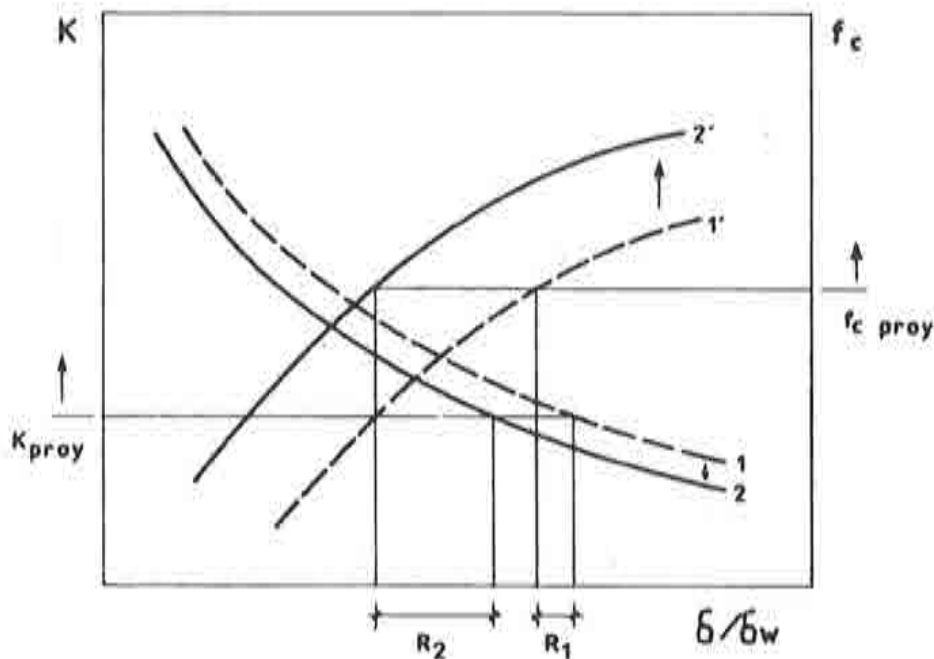


Fig. 6.1.- Ejemplo de la influencia de la puesta en obra y del material utilizado

En línea con lo expuesto, cabe recordar que en las dosificaciones presentadas en el capítulo 2 existían soluciones con polímeros y sin polímeros, si bien, algunas de ellas con resultados similares en ciertas propiedades. La solución sin polímero requería mayor cantidad de cemento que la equiparable con polímero.



## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSIONES**

#### **7.1.- CONCLUSIONES GENERALES**

En este primer apartado se presentan las conclusiones de carácter general que se derivan del presente trabajo, si bien se hacen algunas consideraciones de carácter general sobre la viabilidad de estos hormigones y sus campos de aplicación específicos como consecuencia de la revisión realizada en el capítulo 1 de este documento. Los aspectos más concretos se abordan en el siguiente apartado. Entre las conclusiones generales se pueden citar las siguientes:

- El conocimiento actual del hormigón poroso, tanto en investigación como en aplicaciones, se puede considerar satisfactorio. Así, hoy en día, se puede decir que está resuelta la caracterización del hormigón poroso como material, así como los temas asociados a la puesta en obra del mismo, aunque quedan algunos campos por completar como consecuencia de las crecientes exigencias que se le están requiriendo a este material. Estos campos se reseñan en el apartado 7.3.
- Un hormigón poroso puede obtenerse a partir de distintas dosificaciones de la mezcla, siempre y cuando se mantenga el principio de una granulometría con falta de finos. La incorporación o no de polímeros, microsilice u otros componentes, viene condicionada por las prestaciones requeridas al material en la aplicación que se trate, y dentro de las prestaciones, por el nivel requerido a cada una de ellas.



- El hormigón poroso, debido a su porosidad, aporta unas propiedades diferenciales, en relación a otros hormigones tales como: capacidad de drenaje, reducción de ruido y otras, que le hacen muy interesante para distintos tipos de aplicaciones donde estas propiedades sean factor importante en los requisitos exigidos.
- Entre los campos de aplicación más usuales del hormigón poroso cabe citar: pavimentos de distinto tipo, tuberías de drenaje, muros de drenaje, pantallas antiruido; concretando para el campo de las carreteras, que es el que nos ocupa en este documento, se ha aplicado en: arcenes, bases y capas de rodadura. Los diferentes requisitos que se precisan en cada aplicación, así como las características específicas de cada obra hacen que la solución para el material no sea única.
- Los requisitos que debe cumplir una capa de rodadura de hormigón poroso son mecánicos (verificación de estados límites), funcionales, de durabilidad, estéticos, de adecuación ambiental y de economía. En estos requisitos, los parámetros principales que intervienen son la estructura porosa, las características y dosificación del conglomerante, el espesor de la capa de rodadura y el tamaño máximo del árido.
- De los distintos tipos de polímeros estudiados en el proyecto de investigación citado (Brite Euram BE-3415): acrílico puro (tipos A y B), acrílico estireno (tipo C), épxi emulsionable (tipo D), y estireno butadieno (tipo E), se ha adoptado un acrílico puro (tipo A). Esta elección se ha realizado en base a diferentes criterios (técnicos, económicos y de coordinación entre las entidades implicadas), existiendo otras soluciones equiparables desde el punto de vista técnico, que deberían tenerse presente en cada caso concreto.
- Las soluciones sin polímeros requieren mayores cantidades de cemento para prestaciones análogas, pudiendo tener ciertas dificultades para alcanzar valores elevados tanto de la resistencia a tracción indirecta como de la resistencia al arrancamiento de los áridos, medida esta última mediante el ensayo cántabro.
- En el proyecto de investigación citado, se ha preparado una dosificación y procedimiento de puesta en obra que, desde el punto de vista del material, han sido probados con éxito en la experiencia realizada en la M-50 dentro del tramo denominado Arroyo del Culebro. Esta experiencia ha sido pionera en España en este tipo de solución.
- Existe una fuerte incidencia de la compactación en la densidad aparente, y de esta última en otras propiedades importantes del hormigón. En consecuencia, esta propiedad debe ser objeto de especial atención para su verificación en obra, debiéndose poner a punto los equipos de puesta en obra para asegurar una uniformidad en los resultados en el desarrollo de los trabajos.
- Hay que tener presente que algunas de las propiedades de estos hormigones son contrapuestas (porosidad, permeabilidad frente a resistencias) y que las mismas, no sólo se regulan con la dosificación y materiales empleados, sino también con la puesta en obra, principalmente, la compactación del hormigón.



- Aún cuando el equipo de la UPC no ha trabajado directamente en el comportamiento de estos hormigones frente a los agentes de deshielo y ciclos hielo-deshielo, si que se ha hecho en el contexto del proyecto Brite-Euram citado. Los resultados del estudio muestran que el polímero mejora significativamente la resistencia a los ciclos hielo-deshielo. Por ello, en el diseño de capas de rodadura en zonas de condiciones climáticas adversas se recomienda utilizar polímeros.

## 7.2.- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

En lo que sigue, a manera de resumen, se presentan las conclusiones específicas obtenidas en este trabajo. No obstante hay que señalar que un desarrollo más detallado de las mismas así como otras conclusiones pueden verse en los capítulos anteriores.

### Respecto al polímero a utilizar

- De las distintas familias de polímeros estudiadas, las correspondientes al acrílico puro tipo A (FORTON VF-774), y al estireno butadieno (XZ-87555) permiten obtener prestaciones similares y aceptables para la aplicación estudiada. Todo ello con un coste asumible, ya que otras soluciones con resinas tipo epoxi, también permitirían alcanzar las prestaciones requeridas si bien con un mayor coste económico.
- Resultados similares a los obtenidos con las familias de polímeros anteriormente citadas, también son posibles de obtener con otras soluciones a base de cemento sólo o con la incorporación de microsilice. En el primero de estos casos significa ineludiblemente una mayor cantidad de cemento, y habría que estudiar su comportamiento frente a agentes agresivos.
- En relación con la cantidad de polímero a incorporar, las prestaciones exigibles a una capa de rodadura podrían alcanzarse con una cantidad de polímero en suspensión de, como mínimo, 15 litros por  $m^3$  ( $7,5 \text{ l/m}^3$  en seco). Esta cifra no debe tomarse como una solución única sino que debe emplearse como referencia de partida ante cada caso concreto.

### Respecto a las propiedades y los ensayos de caracterización

- El hormigonado de la capa de rodadura de hormigón poroso se podría hacer sobre el hormigón base aún sin fraguar, siempre y cuando la tecnología de la puesta en obra lo permitiese. En cualquier caso parece recomendable el empleo de una lechada de mortero con polímero.
- El tamaño máximo del árido a emplear es de 12 mm, el cual aparte de responder al tamiz utilizado usualmente, responde bien frente a las diversas propiedades estudiadas. Tamaños mayores parecen poco recomendables mientras que tamaños menores, inciden en el coste al no utilizar un tamiz estándar.

- En relación a las propiedades fundamentales cabe señalar que los rangos más deseables se sitúan entre:

Resistencia a compresión:	15 y 18 MPa
Resistencia a tracción:	1,8 y 2,4 MPa
Densidad aparente:	1,78 y 1,86 t/m <sup>3</sup>
Porosidad:	18 y 24 %
Permeabilidad:	0,5 y 5 cm/s

- El comportamiento de estos hormigones frente al ensayo cántabro es similar al de una mezcla abierta de tipo bituminoso. El orden de magnitud de la pérdida en peso tras 300 vueltas es del orden del 20 al 30 % en función de la cantidad de polímero. En estos resultados, el estado de las probetas (secas-húmedas) tiene poca influencia.
- El ensayo diseñado para estudiar el comportamiento a corte, mediante un ensayo a compresión, además de simple, conduce a resultados razonables desde un punto de vista ingenieril, si bien desde un punto de vista científico requiere una mayor profundización en su estudio.
- La consistencia de estos hormigones es seca, no siendo recomendable el uso del cono de Abrams por ser poco indicativo. Como alternativa se propone el uso de la norma ISO 4111.

#### Respecto a la construcción

- El amasado de estos hormigones no comporta la adopción de medidas especiales, recomendándose el vertido a la hormigonera en sentido inverso al tamaño máximo del árido, empezando por el árido grueso.
- El transporte debe hacerse con camión tipo bañera ya que ello favorece la descarga directa reduciendo notablemente el tiempo y esfuerzo de dicha operación en relación al empleo de un camión cuba.
- La compactación es un factor fundamental en las características del hormigón resultante, por lo que tiene que ser un parámetro a controlar en la puesta en obra y a correlacionar con la compactación a realizar en las probetas de control.
- El curado se ha hecho cubriendo la superficie de hormigón poroso con una lámina de plástico. Esta, con ser una solución razonable, puede que no sea la solución única, por lo que se anima a estudiar otras soluciones, ajustándolas a cada caso concreto.

#### Comportamiento a fatiga

- El comportamiento a fatiga de los hormigones porosos es adecuadamente modelado mediante una relación lineal entre  $S$  y  $\log N$  (curvas de Wöhler). La pendiente de estas rectas depende de  $R$  de forma análoga al caso de hormigones convencionales (densos) aunque con diferentes valores.

- Para bajo número de ciclos de carga y descarga, los hormigones porosos modificados con polímero presentan un mejor comportamiento a fatiga que los que no contienen polímero. Esta diferencia disminuye con el número de ciclos hasta ser prácticamente inapreciable para un número suficiente de ciclos, que es el caso más realista de la acción que inducen los vehículos sobre un pavimento a largo plazo.
- La adición de microsilice en un hormigón poroso no supone ninguna variación en el comportamiento a fatiga respecto a un hormigón poroso sin adiciones.
- Los hormigones porosos modificados con polímeros presentan un mejor comportamiento a fatiga que los hormigones densos. Consecuentemente, las curvas de Wöhler obtenidas para hormigones densos no son adecuadas para el proyecto de hormigones porosos modificados con polímeros, siendo necesario definir específicamente las curvas de éstos últimos.
- La temperatura de las probetas crece con el número de ciclos del ensayo a fatiga. Este incremento es mayor en la sección central de la misma que en cotas superiores o inferiores. La ley de este crecimiento sigue un comportamiento similar a otros parámetros del ensayo de fatiga (por ejemplo, deformaciones), manifestándose la existencia de tres fases.

### 7.3.- RECOMENDACIONES

El principal problema potencial de los hormigones porosos, sobre todo en capas de rodadura, es su colmatación, al igual que ocurre con las mezclas bituminosas drenantes. No obstante, de forma similar a éstas, existen experiencias en las que se ha podido comprobar que en las zonas sometidas a tráfico, con vehículos circulando a elevada velocidad, los propios vehículos ejercen un efecto de succión de las partículas, con lo que la colmatación es mucho más reducida que en el caso de vías urbanas. En las realizaciones en París se ha observado una colmatación importante ya a los pocos meses de haber sido abiertas al tráfico. No obstante, los testigos extraídos han permitido apreciar que dicha colmatación se limita a unos pocos milímetros en la parte superior, por lo que es susceptible de ser eliminada con facilidad por los equipos limpiadores existentes (Jofré, 1993).

En la experiencia del tramo del Arroyo del Culebro, se han producido, tal como se ha dicho, algunos despegues de la capa de hormigón poroso, principalmente en las esquinas de algunas de las losas, tanto en las que tenían lechada como elemento de unión como en las que no lo tenían, dándose mayor número de casos en esta última situación. La causa de este despegue se entiende responde a tensiones de origen térmico, ya que se presentó antes de que el tramo entrase en servicio. Este hecho pone de manifiesto la necesidad de profundizar en el conocimiento de las sollicitaciones reales que se pueden presentar (no sólo las correspondientes al tráfico), tal como se está realizando en la tesis de Pindado (1995). En cualquier caso parece que un incremento de los espesores de las capas de rodadura repercutiría de forma positiva en una reducción de las tensiones tangenciales en la unión, si bien ello significa un incremento económico de la solución, por lo que la solución definitiva debe salir de un estudio detallado del tema.

Si bien, tanto a lo largo del trabajo como en este mismo capítulo se han indicado campos de aplicación de estos hormigones, parece que uno de ellos muy especialmente está poco trabajado si bien con unas perspectivas muy interesantes. Este campo corresponde al de muros de drenaje en el trasdós de muros estructurales combinados con geotextiles que eviten la posible colmatación. Este tipo de muro, cuya realización más significativa se encuentra en el embalse de salvaguarda de la Central Nuclear de Ascó, permiten vaciados rápidos evitando los problemas que se podrían producir por empujes al vacío en los muros estructurales.

El empleo de estos hormigones pone en evidencia la necesidad de utilizar algunos tipos de ensayos no usuales lo que requiere una etapa de información y de formación en los técnicos que trabajen con estos hormigones. Entre estos ensayos están: los correspondientes a la trabajabilidad según norma ISO 4111, los ensayos de permeabilidad in situ y en laboratorio, así como el ensayo de corte. En relación a este último, desarrollado de forma específica para este proyecto, conviene destacar por una lado, su fácil aplicabilidad y, por otro lado, la necesidad en la profundización de la modelización numérica del mismo, en lo que se está trabajando en la actualidad Pindado (1995).



## CAPÍTULO 8

### BIBLIOGRAFÍA

#### 8.1.- REFERENCIAS EXTERNAS CITADAS

AAS-JAKOBSEN, K., (1970)

"*Fatigue of concrete beams and columns*". Trondheim, NTH Institut for Betonkonstruksjoner, septiembre, Boletín nº 70-1, pág. 148.

A.I.P.C.R. (1987)

Comité Technique nº 1: "*Des caracteristiques des surfaces*". XVIII Congres Mondial de la Route, Bruxelles 13-19, Sep.

BOLLATI, M. R. (1992)

"*Hormigones porosos de alta resistencia*". Jornadas COTEC sobre las nuevas tecnologías y el sector de la construcción. Madrid, pp. 24-45. Marzo.

CÁNOVAS DEL CASTILLO, L (1984)

"*El desdoblamiento del paso de Despeñaperros. Proyecto*". "II Jornadas sobre Pavimentos de Hormigón". Córdoba 28-30. Marzo. JA-MOPU-DPC-IECA.

C.E.B. (1988)

"*Fatigue of concrete structures. State of the Art Report*". Bulletin d'Information n° 188, junio.

FERNÁNDEZ, F. (1992)

"*Fatiga en hormigones de firmes. Estado del arte y estudio experimental*". Tesina de especialidad. E.T.S.I.C.C.P. de Barcelona. U.P.C., Septiembre

FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. (1992)

"*Comunicación personal sobre trabajos de investigación en marcha*". (Proyecto de investigación del MOPTMA y Tesis doctoral)

FERNÁNDEZ SÁNCHEZ, R. (1987)

"*Balance de la experiencia española en autopistas y autovías en servicio*". "III Jornadas sobre pavimentos de hormigón". C.M-MOPU-A.M-IECA-ATC. Madrid. 27-29. Octubre.

HSU, T.T.C., (1981)

"*Fatigue of plain concrete*". *ACI Journal*, Proceedings V.78, julio-agosto, pág. 292-305.

HSU, H.T., (1983)

"*Flexural behavior of polymer concrete beams*". Tesis doctoral. The University of Texas at Austin, diciembre.

JOFRÉ, C. (1993)

"*Hormigones porosos*". *Cemento-Hormigón* n° 722. Agosto, pp 992-1014

KELLERSMANN, G.H. and SMITS, F. (1989)

"*An experiment with porous concrete top layer on J.C.P.*". Fourth International Conference on Concrete Pavements Design and Rehabilitations. Purdue University. April.

LORIN, R et MICHEL, G. (1983)

"*Le drainage par une fondation en beton poreux sous revetement de piste d'aeroport*". Seminario internacional sobre Drenaje y Erosionabilidad, LCPC-SETRA-AIPCR, Paris, Marzo.

MATHIS, D.M. (1989)

"*Permeable Base Design and Construction*". Proceedings Fourth International Conference on Concrete Pavements Design and Rehabilitations, Purdue University. April.

M.T.F. (1977)

"*Realisation des Chaussées en beton de ciment*". Directive de la Direction des Pontes et de la Circulation Routiere. Ministere des Transports Francais.

OLEAGA (1992)

"*Tramo de ensayo de hormigón poroso*". XIX Semana de la Carretera. Toledo 19-23 Octubre  
"Nuevos materiales para carreteras". Asociación Española de la Carretera. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha.

OLIVEIRA, M.O.F (1992)

"Fatiga y microfisuración de los hormigones de alta resistencia. Consideraciones de diseño". Tesis doctoral. E.T.S.I.C.C.P. de Barcelona. U.P.C. Julio

RAIMBAULT, G., BALADES, J.D. et FAURE-SOULET, A. (1985)

"Quatre expérimentations françaises de chaussées poreuses". Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. n° 137. Mai-Juin.

TEPFERS, R., y KUTTI, T. (1979)

"Fatigue strength of plain, ordinary, and lightweight concrete". ACI Journal, Proceedings V.76, n° 5, mayo, pág. 635-652.

## 8.2.- DOCUMENTACIÓN PROPIA GENERADA EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO BE-3415-89

### a) Informes desarrollados en el transcurso del proyecto

REF: 01/91

*Porous concrete - Summary of Spanish laboratory tests.* First version. Summary of Spanish Laboratory Tests (Subtask 3.1). Barcelona, February 1991.

REF: 02/91

*Estudio de la variación de las características hidráulicas y resistentes del hormigón poroso de cemento modificado con polímeros, en función de su estructura granular y de la naturaleza del polímero modificante.* A. Aguado, A. Josa, J.J. Rosell y J.M. Salla. Documento 1, 1ª versión. Barcelona, Marzo 1991.

REF: 03/91

*Estudio de la variación de las características hidráulicas y resistentes del hormigón poroso de cemento modificado con polímeros, en función de su estructura granular y de la naturaleza del polímero modificante.* A. Aguado, A. Josa, J.J. Rosell y J.M. Salla. Documento 1, 2ª versión. Barcelona, Julio 1991.

REF: 04/91

*Porous concrete - Summary of Spanish laboratory tests.* Second version. Summary of Spanish Laboratory Tests (Subtask 3.1). Barcelona, July 1991.

REF: 05/91

*Estudio de la fórmula de trabajo del hormigón poroso modificado con polímero, para su aplicación como capa de rodadura drenante en un tramo de ensayo a construir en la M-50, por la Comunidad Autónoma de Madrid.* A. Aguado, A. Josa, J.J. Rosell y J.M. Salla. Documento 2, 1ª versión. Barcelona, Julio 1991.

REF: 06/91

*Estudio de la fórmula de trabajo del hormigón poroso modificado con polímero, para su aplicación como capa de rodadura drenante en un tramo de ensayo a construir en la M-50, por la Comunidad Autónoma de Madrid.* A. Aguado, A. Josa, J.J. Rosell y J.M. Salla. Documento 2, 2ª versión. Barcelona, Diciembre 1991.

REF: 01/92

*Estudio de la variación de las características hidráulicas y resistentes del hormigón poroso de cemento modificado con polímero, en función de la dotación de polímero modificante.* A. Aguado, A. Josa y J.J. Rosell. Documento 3. Barcelona, Enero 1992.

REF: 02/92

*Optimization of the surface characteristics of concrete roads in accordance with environmental acceptance and traffic safety - Summary of Spanish Laboratory Tests (Subtask 3.1).* Barcelona, February 1992.

REF: 03/92

*Estudio del hormigón poroso de cemento modificado con polímero. Ensayos sobre series complementarias y testigos del Arroyo del Culebro.* A. Aguado, A. Josa y J.J. Rosell. Document 4. Barcelona, Mayo 1992.

REF: 04/92

*Información complementaria. Situación proyecto.* A. Aguado, A. Josa y J.J. Rosell. Brussels, Mayo 1992.

REF: 05/92

*Estudio de la variación de las características hidráulicas y resistentes del hormigón poroso de cemento modificado con polímero, en función de la dotación de polímero modificante.* A. Aguado, A. Josa y J.J. Rosell. Documento 5. Barcelona, Septiembre 1992.

REF: 01/93

*Resultados de ensayos complementarios sobre la influencia del grado de compactación en las características mecánicas e hidráulicas del hormigón poroso empleado en el tramo del Culebro.* A. Aguado y A. Josa. Junio 1993.

REF: 02/93

*Resultados de las medidas de albedo y absorción del hormigón (losas de 0.50x0.50 m).* Universidad de Barcelona, Julio 1993.

REF: 03/93

*Fatiga en hormigones porosos modificados con polímeros.* A. Aguado, A. Josa y M.A. Pindado. Barcelona, Septiembre 1993.

REF: 01/94

*Fatigue Testing of Porous Concrete.* First version. A. Aguado, A. Josa and M.A. Pindado. Barcelona, February 1994.



REF: 02/94

*Fatigue Testing of Porous Concrete*. Second version. A. Aguado, A. Josa, M.A. Pindado, E. Onstenk and E. Eickschen. Barcelona, April 1994.

#### **b) Artículos y comunicaciones impulsadas por la UPC en el proyecto**

Rosell, J.J., Aguado, A. and Josa, A. (1990)  
*"Porous Concrete for Urban Pavements"*. 6<sup>th</sup> International Symposium on Concrete Roads, Madrid, Octubre, pp. AIII 87-95.

Aguado, A., Rosell, J.J. y Josa, A. (1991)  
*"Aplicación de hormigones porosos en pavimentos urbanos"*. Revista Cemento y Hormigón. Año LXII n° 694. Junio., pp 611-624.

Aguado, A., Rosell, J.J., Josa, A. y Jofré, C. (1992)  
*"Hormigones porosos"*. XIXª Semana de la Carretera, Toledo, Octubre, pp. 213-236.

Onstenk, E., Aguado, A., Eickschen, E and Josa, A. (1993)  
*"Laboratory study of porous concrete for its use as top-layer of concrete pavements"*. 5th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation. Purdue University, Vol. 2, pp. 125-137.

Josa, A., Onstenk, E., Jofré, C., Eickschen, E and Aguado, A. (1994)  
*"Porous top-layer for concrete pavements - Laboratory study and structural analysis"*. Brite-Euram Workshop on Construction and Concrete Across Borders, Odense.

Pindado, M.A., Aguado, A., Josa, A. and Onstenk, E. (1994)  
*"Laboratory Study of Fatigue of Polymer Modified Porous Concrete for its Use as Top Layer of Concrete Pavements"*. ACI Fall Convention, Tarpon Springs. Octubre. Próxima publicación en un ACI Special Publication.

Josa, A., Pindado, M.A., Aguado, A. y Onstenk, E. (1994)  
*"Fatiga de hormigones porosos para capas de rodadura de firmes"*. Rev. Cemento y Hormigón. Año LXV n° 740. Diciembre., pp 1597-1619.

Pindado, M.A., Aguado, A., Josa, A. (1995)  
*"Comportamiento térmico del hormigón poroso en ensayos a fatiga"*. Comunicación en XII Encuentro del Grupo Español de Fractura. La Coruña. 29-31 de marzo.

#### **c) Tesinas de especialidad y tesis doctorales desarrolladas en el entorno del proyecto**

Oliva, J.J. (1991)  
*"Estudio y mejora de las características del hormigón poroso"*. E.T.S.I.C.C.P., Barcelona, Tesina de especialidad.

Pindado, M.A. (1993)

*"Fatiga en hormigones porosos modificados con polímeros"*. E.T.S.I.C.C.P., Barcelona, Tesina de especialidad.

Pindado, M.A. (1995)

*"Criterios de proyecto para capas de rodadura de hormigón poroso modificado con polímero en firmes de carreteras"*. E.T.S.I.C.C.P., Barcelona, Tesis doctoral en desarrollo.

### **8.3.- DOCUMENTACIÓN PROPIA GENERADA POR EL EQUIPO DE TRABAJO DE LA U.P.C. CON ANTERIORIDAD AL PROYECTO BE-3415-89**

#### **a) Artículos y comunicaciones sobre hormigón poroso previas al proyecto**

Dolz, J., Gómez, M. and Aguado, A. (1984)

*"Porous Concrete in Low Cost Road Tunnels"*. International Symposium on Low Cost Road Tunnels, Oslo.

Aguado, A., Dolz, J. and Rosell, J.J. (1986)

*"Aproximación al hormigón poroso. Un material permeable y resistente"*. Carreteras, Vol. 21 (3ª época), Enero-Febrero, pp. 29-40.

Josa, A. (1987)

*"Estudio de los pavimentos a utilizar en el Anillo Olímpico de Barcelona 91"*. IECA. Informe interno. Barcelona.

Rosell, J.J., Aguado, A. and Dolz, J. (1987a)

*"From theory to practice of porous cement concrete"*. 1ª International Congress, R.I.L.E.M. *De la Science des matériaux au génie des matériaux de construction*, Paris.

Rosell, J.J., Aguado, A. and Dolz, J. (1987b)

*"Características mecánicas del hormigón poroso"*. Ingeniería Civil, nº 63, 3º trimestre.

Rosell, J.J. y Aguado, A. (1988a)

*"Teoría, práctica y aplicaciones del hormigón poroso de cemento"*. Simposio sobre el agua y el terreno en las infraestructuras viarias, comunicación 1.09, Torremolinos (Málaga). 15-17. Noviembre.

Rosell, J.J., Aguado, A. y Dolz, J. (1988b)

*"La práctica del hormigón poroso"*. Carreteras, Vol. 36 (3ª época), pp. 43-55.

#### **b) Tesinas de especialidad sobre hormigón poroso previas al proyecto**

Gómez, M. (1983)

*"Estudio hidráulico y resistente del hormigón poroso"*. E.T.S.I.C.C.P., Barcelona, Tesina de especialidad.

Tortajada, A. (1985)

*"Estudi hidràulic i resistent del formigó porós"*. E.T.S.I.C.C.P., Barcelona, Tesina de especialidad.

Armengou, J. (1987)

*"Estudio hidráulico, resistente y de colmatación del hormigón poroso"*. E.T.S.I.C.C.P., Barcelona, Tesina de especialidad.

---





## **ANEJO 1**

# **ESTUDIO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA JUNTA DE UNIÓN ENTRE HORMIGONES**

### **A1.1.- RAZÓN DE SER**

El comportamiento adherente entre capas de diferentes materiales siempre ha sido objeto de especial interés. En esta misma línea se sitúa el comportamiento de la junta que constituyen el hormigón de base, ya sea hormigón compactado u hormigón vibrado, y el hormigón poroso de la capa de rodadura.

Desde el punto de vista experimental, cara a conocer la respuesta de esa unión, no existen ensayos simples, unánimemente aceptados. En la experiencia holandesa, para la verificación experimental de la unión entre el hormigón poroso y el hormigón de base se han empleado probetas cilíndricas, sometidas a un ensayo de corte como el descrito en el Anejo 2, el cual puede verse en la figura A1.1.

Este tipo de ensayo tiene en nuestra opinión, dos inconvenientes. Por un lado, desde el punto de vista numérico, no se dispone de un estudio tensional que determine cual es la distribución de tensiones en el plano de la junta y, por otro lado, desde el punto de vista experimental, no se tiene la certeza del tipo de carga que se está transmitiendo en el ensayo. Como alternativa a este tipo de ensayo, el equipo de la U.P.C. propuso un ensayo de análoga configuración si bien con probeta cúbica, tal como puede verse en la figura A1.2. y se detalla en el anejo 2.

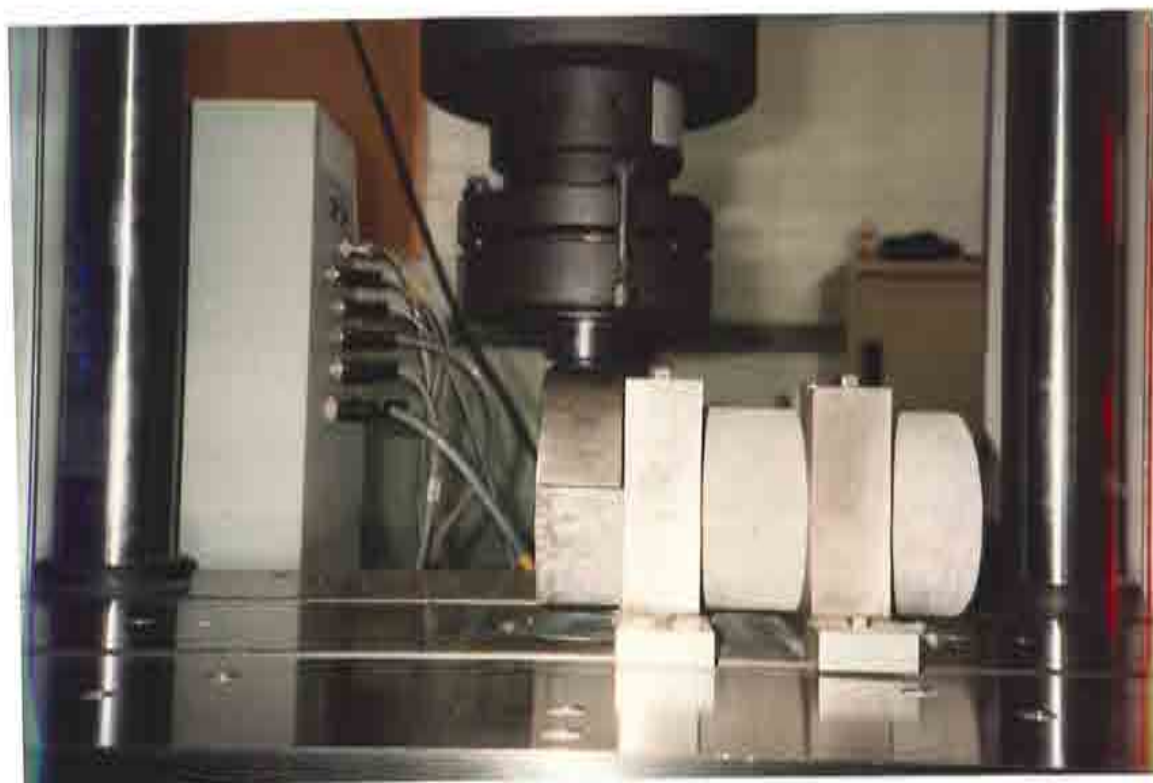


Figura A1.1.- Ensayo de corte con probeta cilíndrica, según experiencia holandesa.

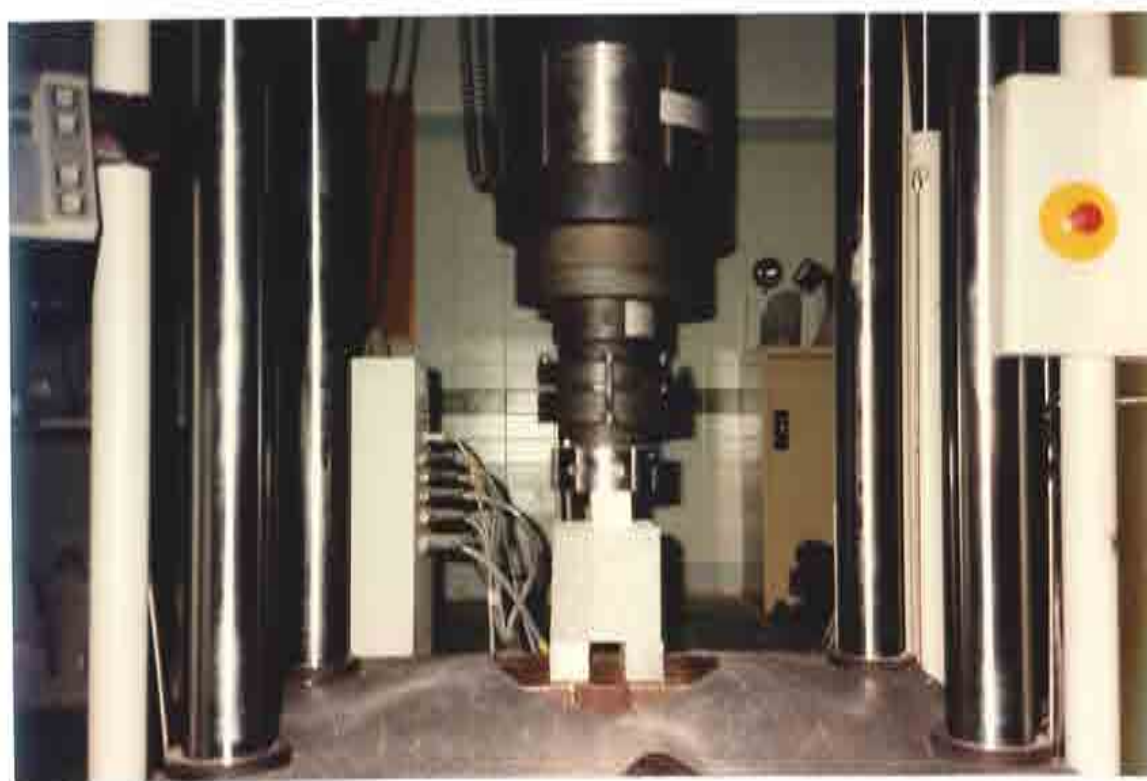


Figura A1.2.- Ensayo de corte con probeta cúbica, según experiencia del equipo de la U.P.C.

## A1.2.- ESTUDIO NUMÉRICO

El método propuesto por la U.P.C., tiene desde el **punto de vista experimental** notables ventajas, entre ellas cabe citar:

- Transmisión de cargas conocida y repartida en todo un plano de carga.
- Fácil materialización del ensayo mediante la aplicación de una carga como si fuese un elemento sometido a compresión.
- Simplicidad del tipo de probeta.

Ahora bien estas potenciales ventajas de este tipo de ensayo deben contrastarse, desde el **punto de vista numérico**, con una simulación del mismo. Por esta razón se planteó la contrastación utilizando un programa de elementos finitos en dos dimensiones considerando un comportamiento elástico del material.

En la figura A1.3 puede verse la malla de elementos finitos utilizada en la que, evidentemente, se ha simulado tanto la probeta de hormigón como los elementos metálicos utilizados en la transmisión de las cargas. Como puede apreciarse, en las zonas previsiblemente de mayor tensión, se ha utilizado una retícula menor de la malla.

En la simulación de la probeta se han considerado los dos tipos de hormigones existentes (hormigón compactado y hormigón poroso), tal como puede verse en la citada figura. Asimismo, entre ambos hormigones se ha considerado la existencia de un elemento junta con un comportamiento elástico de la misma. La razón de ser del empleo de la hipótesis de comportamiento elástico responde a que este estudio es una primera aproximación al problema, si bien se considera que se debe profundizar en esta dirección, tal y como se está haciendo en la tesis doctoral de M.A. Pindado.

Los estudios realizados han considerado diferentes niveles de carga. Los resultados que se presentan a continuación corresponden a una carga uniformemente repartida de  $100 \text{ kp/cm}^2$ , ó lo que es lo mismo, una carga de  $500 \text{ kp/cm}$  de ancho.

En la figura A1.4 se presentan los resultados obtenidos para el caso denominado Caso 1, en el cual se ha tomado un módulo de deformación longitudinal del hormigón poroso de  $250.000 \text{ kp/cm}^2$  y un coeficiente de Poisson de 0,2. En ella puede verse tanto las direcciones de las tensiones principales como la magnitud de las mismas.

Un primer comentario sobre esta figura debe incidir en que el tipo de ensayo no refleja exactamente un ensayo de corte puro, si bien el resultado es muy satisfactorio desde el punto de vista ingenieril, pudiéndose aceptar el mismo, tal como se pretende demostrar a continuación. En dicha figura puede observarse que en la zona inferior de la probeta existe unas pequeñas tracciones que indican un comportamiento de flexión.



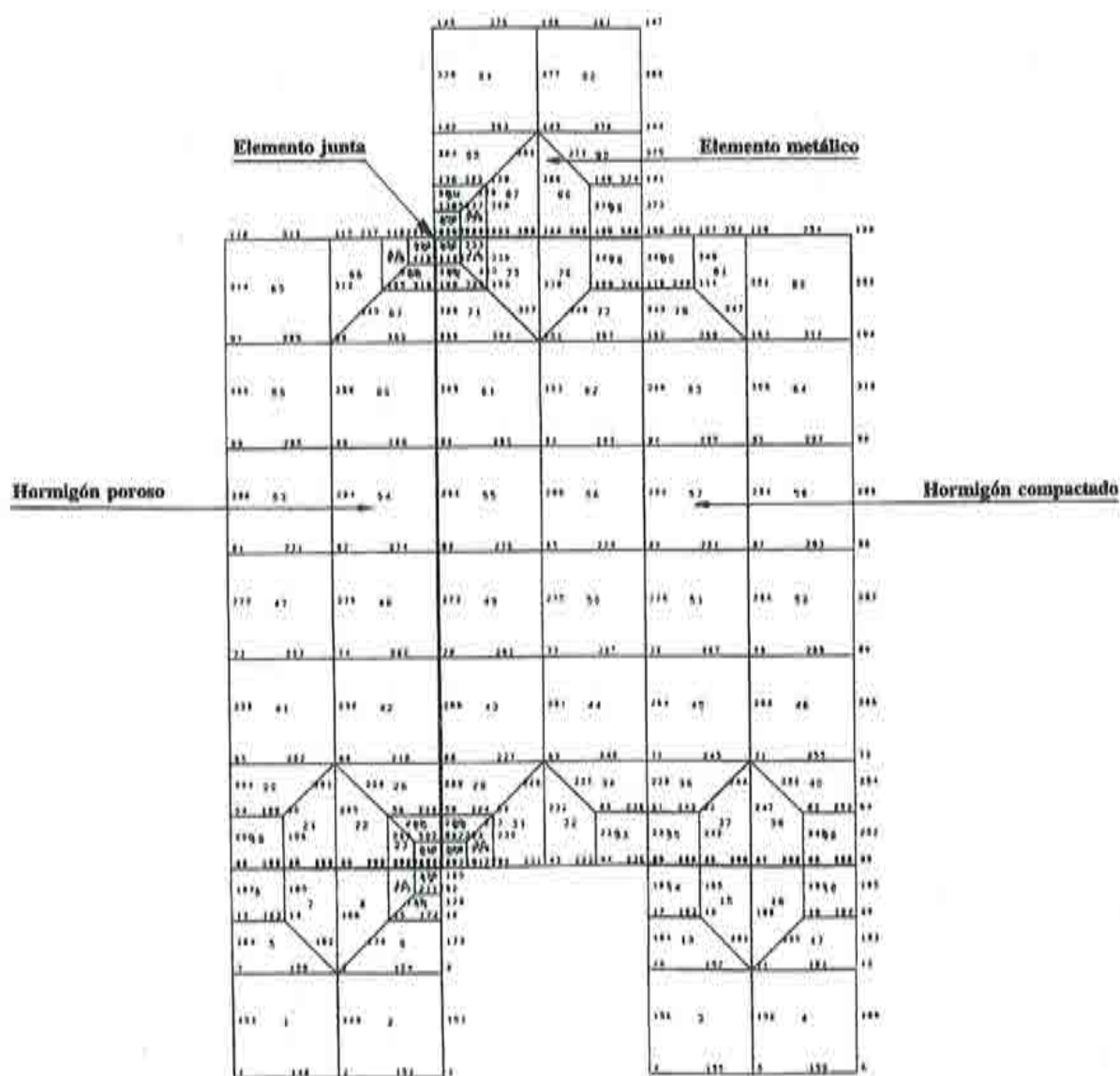


Figura A1.3.- Malla de elementos finitos empleada en la simulación numérica.



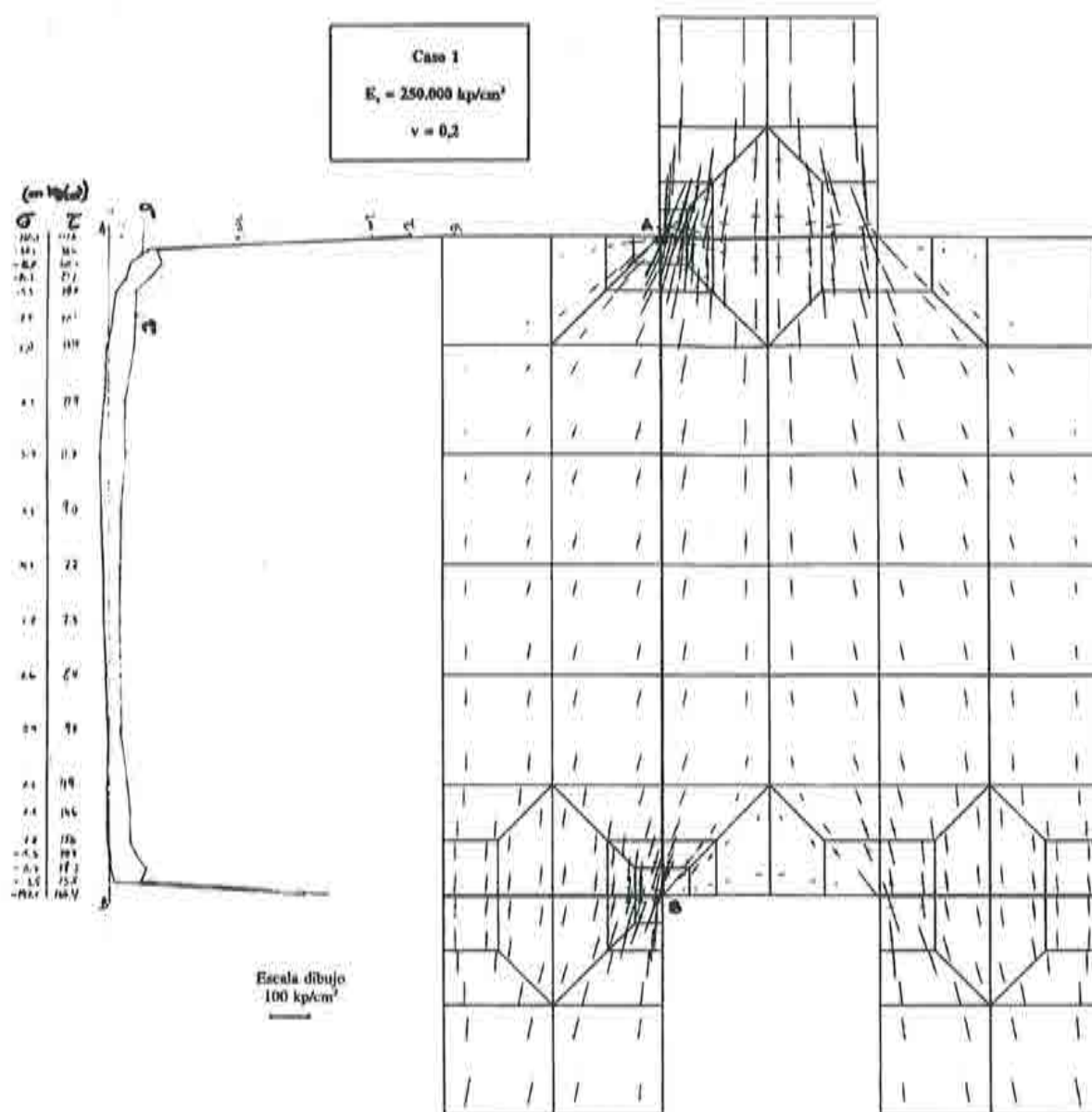


Figura A1.4.- Resultados correspondientes al denominado caso 1.

Por otro lado la dirección de las tensiones principales en el elemento junta no siguen exactamente un ángulo de 0 y 90 grados, sino que existe una pequeña variación respecto a estos valores.

La distribución de tensiones no es totalmente simétrica respecto a un plano horizontal situado en el plano medio de la probeta, sino que existen pequeñas variaciones consecuencia de sistema de aplicación de la carga. Por otro lado, la no simetría respecto a un plano vertical, responde lógicamente a la no simetría de los hormigones constituyentes de la probeta.

Hay que llamar la atención a que en los puntos A y B de la citada figura A1.4, se produce un estado biaxial (triaxial) de compresiones, similar al que se obtiene en una ensayo de tracción indirecta, justo debajo de los puntos de aplicación de las cargas. Sin embargo, a poca distancia de esos puntos (en el entorno de los 1,25 cm), la distribución de tensiones tanto normales como tangenciales es muy uniforme.

En la figura A1.5 se presentan los resultados obtenidos para el caso denominado Caso 2, en el cual se ha tomado un modulo de deformación longitudinal del hormigón poroso de 175.000 kp/cm<sup>2</sup> y un coeficiente de Poisson de 0,3. En ella puede verse tanto las direcciones de las tensiones principales como la magnitud de las mismas.

En general el resultado de los dos casos presentado es similar, existiendo pequeñas variaciones en los valores de las distintas variables estudiadas como consecuencia de los distintos datos de partida, si bien desde el punto de vista de comportamiento general no introduce cambios.

### A1.3.- INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

A la luz de los resultados mostrados en las figuras anteriores puede en primera aproximación, darse las siguientes expresiones para el cálculo de las tensiones tangenciales respuesta en el momento de la rotura:

$$\text{Rotura por un sólo plano: } \tau = \frac{F_{rot}}{0,85 * a * b}$$

$$\text{Rotura por dos planos: } \tau = \frac{F_{rot}}{2 * 0,85 * a * b}$$

donde:

a y b son en este caso 15 cm correspondientes al lado de la probeta cúbica.

$F_{rot}$  es la carga de rotura obtenida en el ensayo (en toneladas)

$\tau$  es la tensión tangencial de rotura en el plano de la junta (en kp/cm<sup>2</sup>)

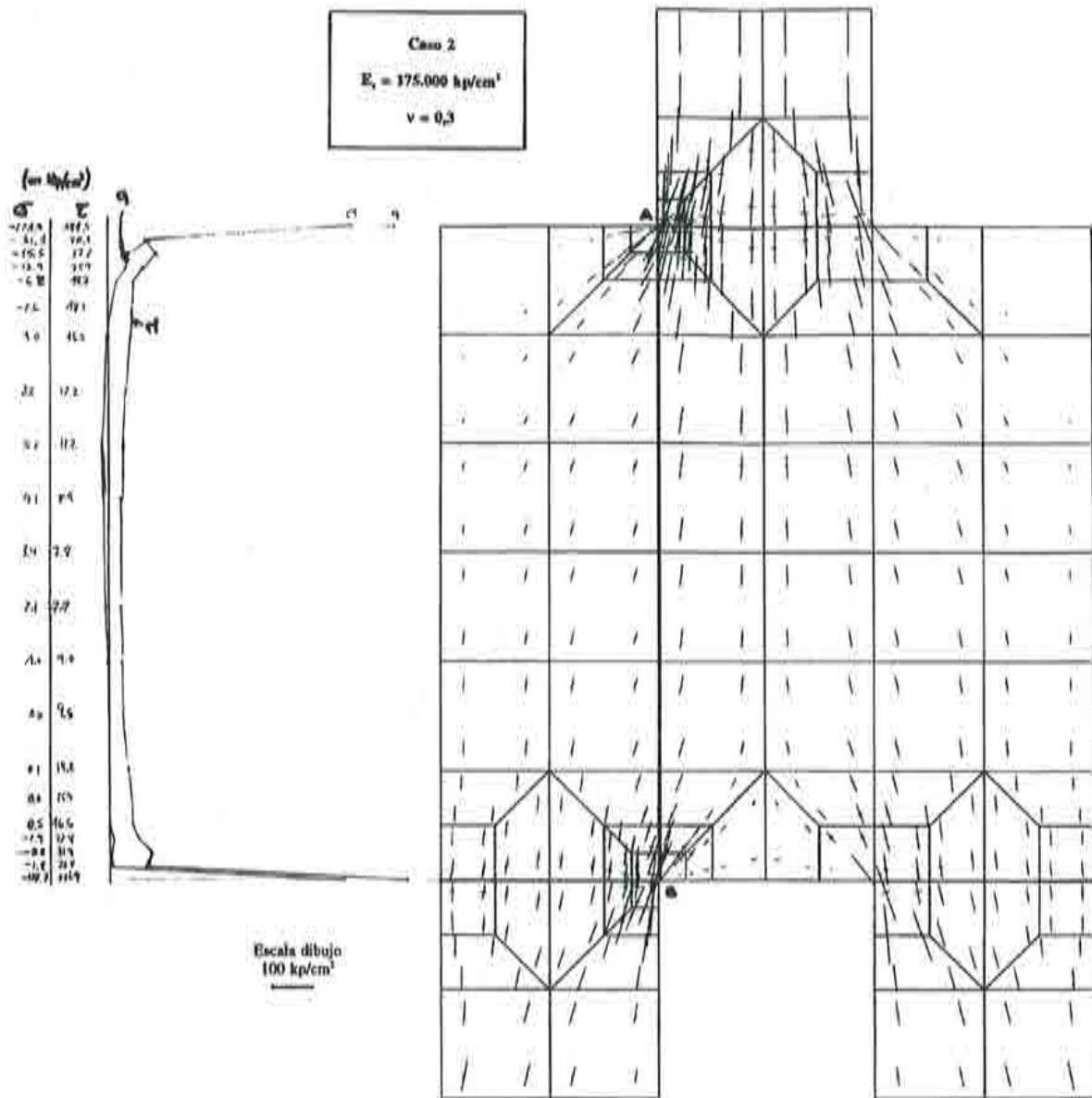


Figura A1.5.- Resultados correspondientes al denominado caso 2.

El coeficiente de 0,85 es la consecuencia de considerar sólo la parte de sección donde las tensiones se pueden considerar que tienen una distribución uniforme. Por otro lado, el coeficiente 1 ó 2 surge de la consideración de tomar uno ó dos planos de rotura. Este planteamiento es coherente con los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, en los que en algunas de las probetas con lechada adherente que rompían por dos planos, la carga de rotura era algo superior a dos veces la carga de rotura correspondiente a cuando la rotura se producía por un sólo plano de rotura.

Hay que llamar la atención en relación a que en estos ensayos, la temperatura se mantiene constante durante la realización del mismo, esto es, no se tiene en cuenta su influencia dado que se está buscando la respuesta. Ello es claramente diferente de la sollicitación, que por razones térmicas, puede producir un despegue en algunas de las losas del tramo experimental del Arroyo del Culebro. Asimismo en estos ensayos no se tiene en cuenta el tema de efectos escala, lo cual es una hipótesis razonable para ensayos de laboratorio del tipo que aquí nos ocupa.



## **ANEJO 2**

### **PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO**

#### **Fabricación.**

El hormigón ha sido fabricado en una central de hormigonado CEMEX, modelo IMV-250, que se encuentra en el laboratorio del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la U.P.C. La capacidad nominal de dicha central es de 250 l., sin embargo, nunca se superan los 200 l con el objeto de que su funcionamiento sea el idóneo.

El orden de vertido fue el siguiente: árido grueso, árido fino, cemento, agua, y en último lugar el polímero o superfluidificante. El tiempo de amasado era de unos 3 minutos, lo que resultaba suficiente para una correcta mezcla.

Una vez realizada cada amasada, lo primero que se hacía era un ensayo de consistencia. Esta medida se hacía a partir del cono de Waltz sobre mesa vibrante.

Como la densidad estaba predeterminada, el hormigón poroso debía ser pesado antes de rellenar las probetas. Estas pesadas se realizaban con una báscula con una precisión de 25 gramos.

Las probetas cilíndricas de 15 x 30 cm realizadas dentro de moldes metálicos eran

compactadas con un martillo KANGO.

La secuencia de operaciones que se seguía era la siguiente:

- Se pesaba la primera mitad de su contenido
- Se introducía en el molde
- Con el martillo KANGO se compactaba ese volumen.
- Posteriormente, se procedía a colocar un anillo metálico en la parte superior de la probeta, con el fin de que al verter el resto del material, éste no se derramase.
- Se pesaba el resto del hormigón
- Se vertía y se compactaba

El proceso de compactación empleado por alemanes y holandeses era diferente. Las probetas preparadas por INTRON eran compactadas durante 1 minuto en una mesa vibrante, mientras que, las preparadas por VDZ lo eran apisonadas por un pisón con un plato del mismo área que la superficie de la probeta.

#### **Conservación.**

Las probetas, sin desmoldear, eran cubiertas con plásticos durante las primeras 24 h. Cumplidas éstas se procedía al desmoldeo de las probetas.

Tras identificar a cada probeta con un número, éstas eran almacenadas según su composición

Las probetas sin polímeros eran almacenadas de la siguiente manera:

- Las probetas españolas eran almacenadas a 20° C y una humedad del 95 %.
- Las probetas holandesas y alemanas eran almacenadas durante 6 días en agua a 20° C y posteriormente a 20° C y una humedad del 65 %.

Las probetas con polímeros eran almacenadas de la siguiente manera:

- Las probetas españolas eran almacenadas a 20° C y una humedad del 50 %.
- Las probetas holandesas y alemanas eran almacenadas a 20° C y una humedad del 65 %.

#### **Determinación de la densidad aparente.**

La densidad aparente de las probetas se obtiene a partir del cociente entre el peso de la probeta seca y del volumen del molde que la contiene. El peso seco de la probeta es el mismo empleado para la determinación de la porosidad accesible. Señalar aquí que si bien el secado en las muestras alemanas y holandesas se hizo a 105° C en el caso de las probetas

españolas este tuvo lugar a una temperatura de 60° C durante un período de 24 h.

### **Determinación de la porosidad accesible.**

Los valores de la porosidad accesible fueron obtenidos a partir de dos métodos: el método Intron y el método estándar.

La determinación de la porosidad accesible ( $n$ ) se obtiene, de forma general, a partir de la siguiente expresión:

$$n = 1 - \left[ \frac{(P - P')}{V} \right]$$

donde:

P : peso seco  
P' : peso sumergido  
V : volumen

Sin embargo los métodos empleados para obtener esos valores son diferentes:

#### **Método 1 (método Intron).**

Después de ser secadas a 105° C las probetas a ensayar son saturadas al vacío. Posteriormente se pesa un recipiente lleno de agua con la probeta en su interior y se vuelve a pesar lleno de agua pero sin la probeta en su interior. Lógicamente la diferencia entre esos pesos es el valor de P'. A continuación la probeta es secada por un secador centrífugo. El peso de esa probeta es el valor de P. A partir de esos valores y del volumen de la probeta se puede obtener la porosidad accesible.

El hecho de proceder a un secado centrífugo es debido a que éste permite drenar el agua de los poros más grandes (accesibles), mientras que los poros más pequeños permanecen saturados con agua. En esos poros más pequeños, calificados de difícilmente accesibles, se producen fenómenos de capilaridad, formación de meniscos, etc, que originan una retención de agua y por tanto la contribución de esos huecos al proceso de filtración es casi nula. Debido a eso si queremos correlacionar bien las propiedades hidráulicas del material con la porosidad, ésta debe hacer referencia tan sólo a los poros accesibles.

#### **Método 2 (método estándar).**

Este segundo método es igual al primero salvo que la probeta no es saturada en vacío ni posteriormente sometida a un proceso de secado centrífugo. La probeta seca es pesada en un recipiente que luego se va rellenando lentamente con agua. De esa manera tenemos los dos pesos necesarios para la determinación de  $n$ . El proceso de llenado debe hacerse lentamente



para que el agua vaya rellenoando todos los poros y desplazando al aire que irá saliendo por la parte superior de la probeta.

Se procedió a realizar una comparación entre ambos métodos que aparece en la figura A2.1, observándose que la porosidad accesible media era la misma, por lo que ambos métodos fueron aceptados.

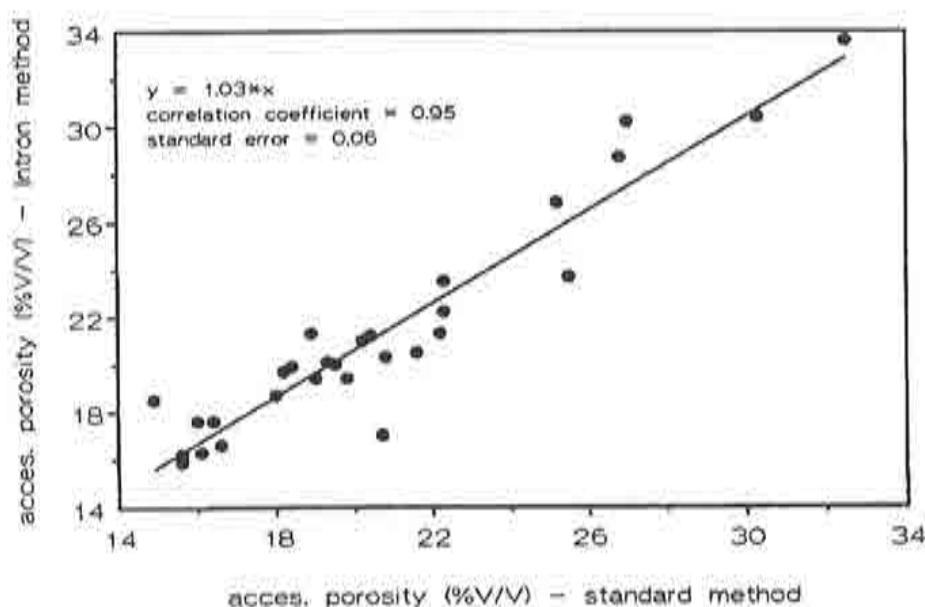


Figura A2.1.- Correlación entre los resultados de porosidad accesible obtenidos por los métodos Intron y estándar.

### Determinación de la permeabilidad.

El parámetro fundamental a utilizar en la caracterización hidráulica del hormigón poroso es el coeficiente de permeabilidad,  $k$ .

$$k = \frac{v}{i}$$

donde:

- $v$ : velocidad media de filtración (caudal filtrado por unidad de área)
- $i$ : gradiente hidráulico (cociente entre la carga de agua y la altura de la probeta)

La determinación de la permeabilidad se hizo a partir de un permeámetro de carga constante cuyo esquema se puede apreciar en la figura A2.2. En él el valor de la carga de



agua,  $H$ , se podía mantener constante en cada valor deseado.

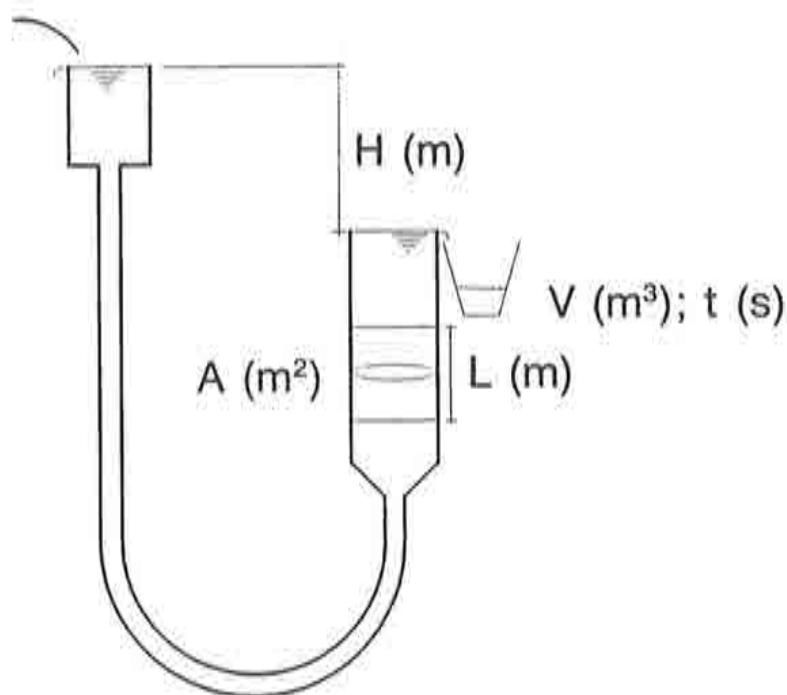


Figura A2.2.- Esquema del permeámetro empleado.

El valor del coeficiente  $k$  se obtendría entonces a partir de:

$$K = \frac{V}{A \cdot i \cdot t}$$

donde:

$k$ : coeficiente de permeabilidad (m/s)

$V$ : volumen de agua que ha circulado a través de la probeta durante el período de tiempo  $t$  ( $m^3$ )

$A$ : área de la probeta ( $m^2$ )

$i$ :  $H/L$  gradiente hidráulico

$t$ : duración del ensayo (s)

El ensayo debe iniciarse una vez que ya se haya establecido un flujo estable.



**Rotura a flexotracción.**

Según procedimiento de ensayo UNE 83-305.

**Rotura a tracción indirecta "Ensayo brasileño".**

Según procedimiento de ensayo UNE 83-306.

**Rotura a fatiga.**

El procedimiento de ensayo para la determinación de la resistencia a fatiga aparece en el Capítulo 5.

**Determinación de la resistencia al corte.**

Dos han sido los métodos empleados para determinar la resistencia al corte entre el hormigón poroso y un hormigón denso (convencional).

**Método UPC**

La resistencia al corte entre el hormigón poroso y la capa inferior de hormigón denso fue determinada de acuerdo con un ensayo cuyo esquema aparece en la figura A2.4.

Las probetas ensayadas consistían en cubos (150 x 150 x 150 mm) fabricadas en laboratorio.

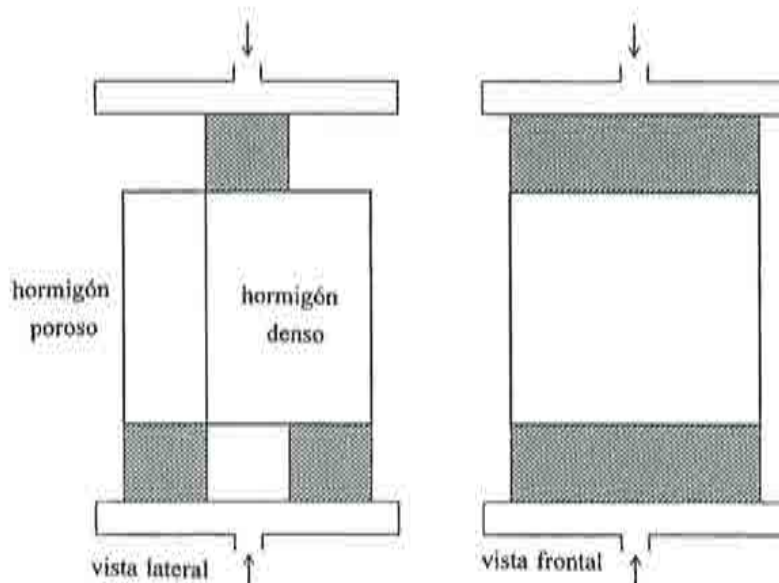


Figura A2.4.- Esquema del ensayo por el método UPC para la determinación de la resistencia al corte.

El espesor de la capa de hormigón poroso era de 50 mm (es decir, 1/3 de la altura de las probetas). Una simulación de este ensayo por elementos finitos mostró que la distribución de las tensiones era más o menos uniforme en la superficie de contacto entre ambos materiales.

### Método Intron

El esquema de este ensayo se puede apreciar en la figura A2.5.

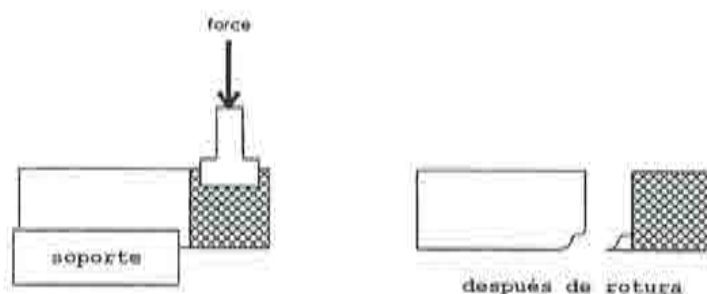


Figura A2.5.- Esquema del ensayo por el método Intron para la determinación de la resistencia al corte.

Para este ensayo se procedía a la extracción in situ de testigos de 100 mm de diámetro. El procedimiento de ensayo era el siguiente; en un principio se fijaba el extremo del testigo de hormigón denso en el aparato de ensayo como se puede ver en la figura A2.6. El plano de unión entre el hormigón poroso y el denso debe ser perpendicular al eje de la probeta y debe ser colocado exactamente en el borde de la parte fija del aparato. Posteriormente la probeta es cargada a una velocidad de 100 N/s.

### **Determinación de la pérdida por desgaste "Ensayo Cántabro"**

Para esta determinación se empleó el ensayo el ensayo Cántabro. Este ensayo desarrollado originalmente para medir el desgaste en mezclas bituminosas es una modificación del ensayo Los Angeles empleado para la determinación del desgaste de los áridos.

El ensayo Los Angeles tiene lugar en una máquina consistente en un cilindro hueco, de acero, con sus extremos cerrados y que gira en posición horizontal, como se puede observar en la figura A2.7. En su interior se introduce una muestra del árido a ensayar junto a una carga abrasiva (esferas de fundición o de acero). Una vez introducidas éstas se hace girar el cilindro a velocidad constante un número determinado de vueltas. Realizado el ensayo se tamiza la muestra resultante por un determinado tamiz y se pesa lo retenido en él. La diferencia entre el peso original de la muestra y el peso final de la misma al final del ensayo expresado en % del peso inicial es conocida como coeficiente de desgaste Los Angeles.



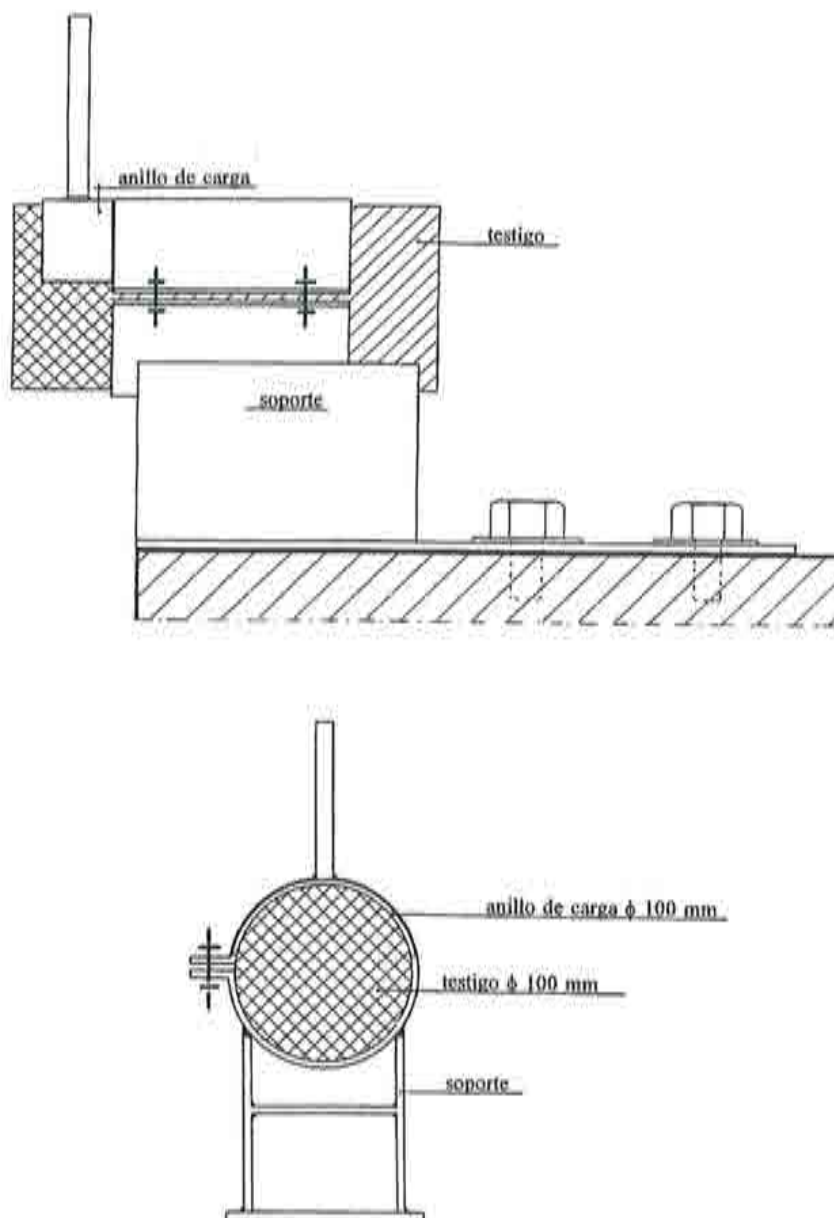


Figura A2.6.- Ensayo Intron de determinación de la resistencia al corte.

Las variaciones que introduce el ensayo Cántabro en relación al ensayo Los Angeles son básicamente dos; en primer lugar, no se introduce carga abrasiva y en segundo lugar que lo que se introduce es una muestra compacta. Por ello, al final la diferencia de pesos a considerar es la existente entre la muestra antes y después de ser ensayada.

Las probetas de hormigón poroso ensayadas no tenían las dimensiones estandarizadas de las probetas Marshall empleadas en el ensayo Cántabro para mezclas bituminosas sino que eran probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y un grosor de 10 cm.



Figura A2.7.- Máquina Los Angeles.

El procedimiento de ensayo era por tanto:

- Se pesa la probeta a ensayar .
- Se introduce en la máquina Los Angeles y se hace girar el tambor de ésta a la misma velocidad normalizada en la NLT-149 de 3.1 a 3.5 rad/s (30 a 33 r.p.m.) durante 300 vueltas.
- Se vuelve a pesar lo que queda de la probeta. La pérdida de peso se expresa en % respecto al peso inicial de la probeta.

#### **Determinación del módulo de elasticidad dinámico.**

La determinación del módulo E dinámico se hace a partir del valor de la velocidad de propagación de los ultrasonidos a través del hormigón. Eso es así porque la velocidad con que se transmiten las pulsaciones ultrasónicas a través de un material sólido depende de la

densidad y elasticidad de dicho material. A partir de la formulación matemática que relaciona ambas se obtiene que:

$$E_{din} = \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \cdot \rho \cdot v^2$$

donde:

$E_{din}$ : módulo E dinámico (Pa)

$\rho$ : densidad (Kg/m<sup>3</sup>)

$v$ : velocidad de propagación (m/s)

$\nu$ : coeficiente de Poisson (0.2)

El ensayo consiste en colocar un transductor emisor de ultrasonidos en una cara de la probeta y un transductor receptor en la otra cara. Ambos transductores deben estar unidos al material por medio de un agente acoplante que evite una pérdida de señal debido a un inadecuado acople acústico.

A partir del tiempo entre la emisión de los ultrasonidos y su recepción, y de la distancia entre ambos transductores se calcula la velocidad de propagación de los mismos. A partir de ese valor de la densidad y del coeficiente de Poisson se obtiene el módulo E dinámico.

El valor que se tomó, en todos los casos, para el coeficiente de Poisson fue de 0.2.

### **Resistencia superficial y desgaste**

Este ensayo tiene como objeto determinar la variación de la resistencia superficial con el tiempo. Los equipos utilizados, de la marca Wehner-Schulze, eran una maquina pulimentadora y una maquina de ensayo de la resistencia superficial. En estos ensayos eran utilizadas probetas planas de 225 mm de diámetro.

La maquina de ensayo de la resistencia superficial medía el estado de la superficie de la probeta antes y después de ser sometida a diferentes estados de pulimento (los correspondientes a 0, 30.000, 60.000 y 90.000 rotaciones).

### **Maquina pulimentadora.**

Esta maquina permite una rápida simulación de los efectos del tráfico en la superficie ensayada. El efecto de las ruedas de los vehículos se consigue mediante tres rodillos cónicos de caucho que describen trayectorias circulares sobre la superficie de ensayo.

El soporte de los rodillos está fijado en el extremo inferior de un eje vertical de transmisión. En la figura A2.8 aparecen los principales componentes de esta máquina.

El soporte de los rodillos está por debajo de la superficie creando en la misma una presión de 0.3 a 0.4 MPa bajo los rodillos. La velocidad de rotación es aproximadamente de 35 Km/h mientras que la velocidad de rotación del soporte es de 1000 r.p.m.

Durante el proceso de pulimento sobre la superficie de ensayo se suministra continuamente agua conteniendo polvos de cuarzo abrasivos (<0.9 mm) con el doble propósito de acelerar el proceso de pulimento y mantener refrigerados los rodillos.

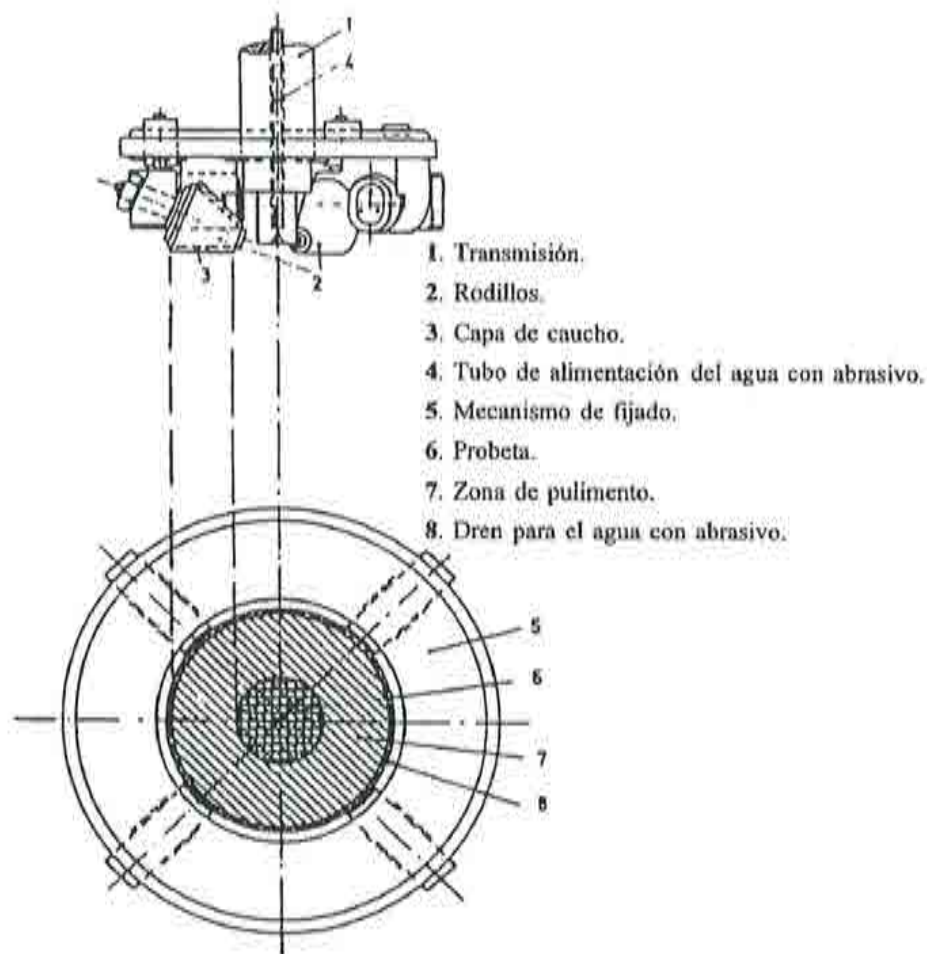


Figura A2.8.- Máquina pulimentadora.

### Máquina de ensayo de la resistencia superficial.

Esta consiste en tres patines de caucho girando sobre la superficie de ensayo bajo un flujo uniforme de una película lubricante de 1 mm de agua. Cada uno de esos patines de caucho tiene un área de contacto de aproximadamente 5 cm<sup>2</sup> y simula un elemento de la huella de una rueda. La probeta se fija sobre un anillo que puede girar. En el perímetro de ese anillo se coloca un dinamómetro para medir la fuerza de fricción. En la figura A2.9 se pueden apreciar los principales componentes de la máquina.



Durante el ensayo, los patines de caucho son inicialmente acelerados hasta una velocidad de 100 Km/h momento en el cual el motor es desconectado y los patines descienden hasta la superficie de ensayo. La rugosidad de la superficie frena los patines desarrollándose una fuerza de fricción proporcional a la velocidad instantánea. Esa fuerza es registrada por el dinamómetro. El coeficiente de la fuerza de frenado es función de la carga vertical y del brazo de palanca (debido a la excentricidad de los patines).

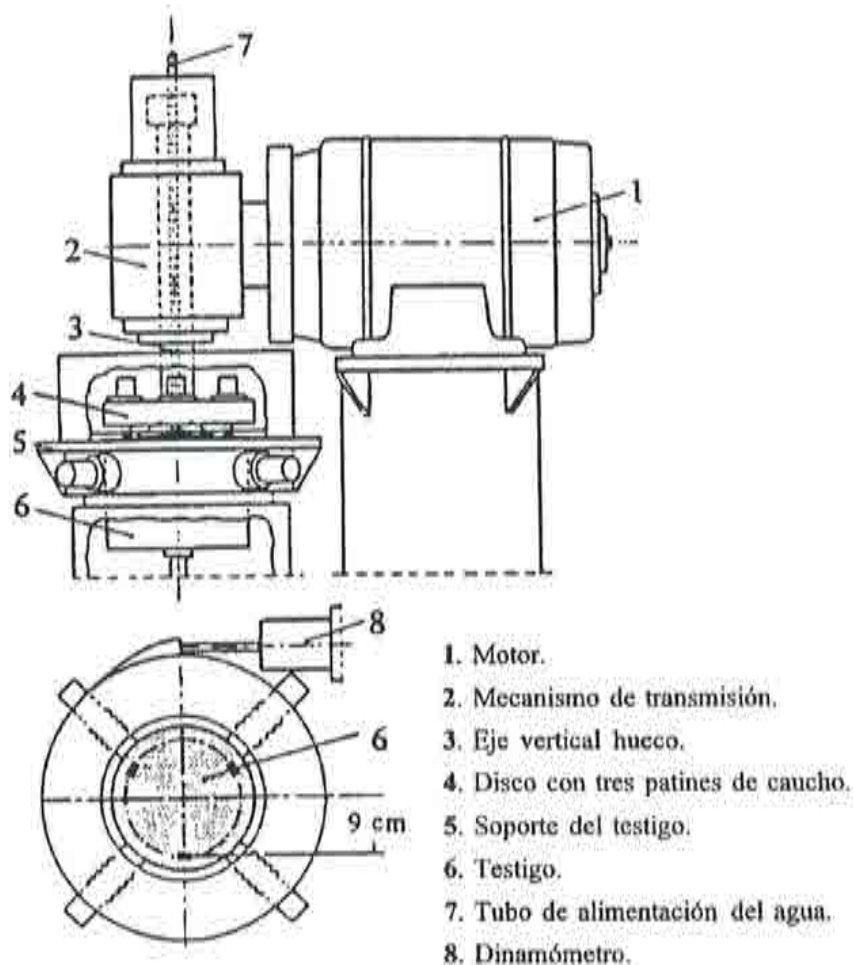


Figura A2.9.- Máquina de ensayo de la resistencia superficial.

Este ensayo simula el proceso de frenado de un vehículo en el que la rueda sufre una trabada brusca, y en condiciones de superficie mojada. Por ello este ensayo se corresponde con el método de bloqueo de la rueda remolcada (T-M) que también mide la fuerza de fricción en superficies mojadas, y que es explicado dentro de las mediciones realizadas in situ. Las medidas de ambos métodos presentan una buena correlación.

A parte del ensayo descrito anteriormente que en su conjunto representa un programa estándar de simulación de tráfico se llevó a cabo otro programa especial de simulación del

mismo. Para este ensayo la superficie de las probetas eran preparadas mediante un chorro de arena durante 5 minutos, después de lo cual se medía la resistencia superficial (según el procedimiento descrito anteriormente). A continuación esa medición era repetida el número de veces necesario hasta que no se observara ninguna variación en el valor del coeficiente de fricción obtenido (aproximadamente 12 veces). Este ensayo se realizaba 2 veces.

Para cualquiera de los dos ensayos, el estándar y el superficial, se podía elegir el valor de la velocidad.

### **Resistencia a ciclos hielo-deshielo.**

El ensayo para determinar esta resistencia se efectuaba a partir de testigos de 100 mm de diámetro extraídos de cubos transcurridos 14 días desde su fabricación. Tras esto las probetas eran almacenadas a 20° C y una humedad relativa del 65 % hasta los 28 días en que eran limpiadas y todas las partículas sueltas retiradas. En ese instante se iniciaba el ensayo. En Alemania se empleaban cubos de 100 mm de lado que eran almacenados a 20° C y una humedad relativa del 65 %. Transcurridos esos días se iniciaba el ensayo.

Antes de someter una probeta al ensayo ésta era sumergida en agua con un 3 % de NaCl durante 24 horas, seguido por un período de 7 1/2 horas destinado a escurrir ese agua. En ese instante se iniciaban los ciclos de hielo-deshielo, cada uno de los cuales consistía en:

- la probeta es congelada a -20° C durante 16 horas y a una humedad relativa del 65%.
- deshielo a +20° C durante 7 1/2 horas siendo almacenada bajo agua con una solución al 3 % de NaCl.
- escurrimiento de 1/2 hora.

Cada 10 ciclos se determinaba la pérdida de peso mediante la recogida, secado y pesado de las partículas sueltas. Para cada dosificación se ensayaban 5 probetas.

Asimismo, a parte del ensayo estándar anterior se realizó otro en el cual se mantenía la parte inferior de la probeta (1 cm) sumergida en una solución al 3 % de NaCl. Este ensayo se ajusta más a la realidad puesto que la parte inferior de una capa de rodadura de hormigón poroso puede estar saturada de agua. En invierno (con deshielo durante el día y congelación durante la noche) el hormigón puede ser duramente atacado por la acción de esos ciclos hielo-deshielo sobre esa zona saturada. De hecho, como se comprueba a partir de los resultados obtenidos, este segundo método es más destructivo que el primero y se recomienda su empleo para el ensayo de la resistencia a ciclos de hielo-deshielo en capas de rodadura de hormigón poroso por ser más realista.



### **Resistencia a ciclos de mojado-secado.**

Es un ensayo destinado a medir la durabilidad del polímero en el hormigón poroso puesto que, en la práctica, el polímero puede degradarse por la alternancia de los ciclos de mojado y secado.

Los ensayos se realizaban con probetas transcurridos 28 días desde su fabricación. Cada ciclo duraba 14 días y consistía en un período de 2 días durante el cual los prismas eran almacenados bajo agua y en otro de 12 días en el cual eran almacenados a 20° C y a una humedad relativa del 65 % permitiendo su secado. Después de un número fijo de ciclos eran ensayados a flexión. Simultáneamente se ensayaban otros prismas de referencia que habían estado continuamente almacenados bajo unas condiciones de 20° C y humedad relativa del 65%.

### **Resistencia a la radiación ultravioleta (UV).**

Este ensayo se llevó de acuerdo con la norma DIN 53387-1. Estos ensayos se llevaron a cabo sobre prismas (40 x 40 x 160 mm) y cilindros (100 mm de diámetro y 70 mm de altura). Tras esas radiaciones las probetas eran sometidas a ensayos de flexión, desgaste, etc. y los valores de los mismos se comparaban con los obtenidos en probetas no sometidas a radiaciones UV. Para poder evaluar correctamente la influencia de la radiación, las probetas no sometidas a radiaciones ultravioleta fueron almacenadas bajo las mismas condiciones del ensayo.

Los ensayos se realizaron bajo las siguientes condiciones:

- temperatura de 55° C en la superficie superior.
- humedad relativa del 80 %.
- duración total de la radiación de 1500 horas (a las probetas se las daba la vuelta tras 750 h).

### **Ensayo de colmatación.**

El objetivo de este ensayo era determinar las propiedades hidráulicas del hormigón poroso como función de la cantidad de suciedad (en forma de arena 0/1 mm) presente. Los ensayos se realizaron sobre probetas cilíndricas  $\phi$  150 x 125 mm). Las paredes laterales fueron selladas y la probeta introducida en un tubo de plástico ( $\phi$  150 x 600 mm). Ese tubo se llenaba con agua hasta un nivel de 600 mm sobre la superficie superior de la probeta, nivel que era mantenido (ensayo de permeabilidad a carga constante). La diferencia entre este ensayo y la situación real es que en el ensayo el flujo de agua es tan sólo vertical y no horizontal.

Después del establecimiento de la permeabilidad inicial, arena fina (0/1 mm) era

dispersada en el agua y arrastrada por éste hacia el interior de los poros de la probeta. El agua era removida para prevenir la deposición de arena en la parte superior de la probeta. Durante el ensayo, la permeabilidad era medida constantemente.

Después del ensayo, la probeta era secada y pesada para obtener la cantidad de arena retenida en la probeta. A partir de la densidad de la arena y la porosidad de la probeta se calculaba la pérdida de porosidad, estableciéndose una curva que relaciona el porcentaje de poros ocluidos con el coeficiente de permeabilidad.

### **Características térmicas.**

#### Conductividad térmica.

La determinación de la conductividad térmica  $\lambda$  se efectuó por medición del flujo térmico que atravesaba una probeta de  $0,5 \times 0,5 \times 0,15$  m desde una cara que se mantenía a  $30^\circ \text{C}$  hasta la otra cara que se mantenía a una temperatura inferior, de  $10^\circ \text{C}$ . Por lo cual los valores obtenidos son los correspondientes a la conductividad térmica a una temperatura de  $20^\circ \text{C}$  (valor medio entre las dos caras).

El procedimiento de ensayo fue el siguiente:

- acondicionamiento de la probeta, mediante su colocación en una cámara climática de forma que se alcance una temperatura uniforme en toda la masa de hormigón de  $10^\circ \text{C}$ , este proceso duraba 24 h. Después se iniciaba el ensayo propiamente dicho.
- durante el ensayo se mantiene una cara (cara fría) a una temperatura constante de  $10^\circ \text{C}$  mientras que la otra se calienta hasta los  $30^\circ \text{C}$ . Se inicia en ese momento un régimen no estacionario de transmisión de calor en la probeta que culmina al cabo de unas 24 horas cuando se alcanza el régimen estacionario. Es en ese instante en el que se proceden a realizar las medidas dirigidas a la determinación de la conductividad térmica  $\lambda$ .
- junto a las temperaturas de las caras fría y caliente, se mide la temperatura en el plano medio de la placa de hormigón, a una profundidad de 75 mm. Esta medición se realiza en tres puntos diferentes, con tres sondas distintas, colocadas a la misma profundidad y en el mismo plano y formando sus terminales los vértices de un triángulo equilátero de 5 cm de lado.

Se ensayaron 2 probetas, realizándose 12 determinaciones de la conductividad térmica para cada una de ellas, calculándose finalmente esta como promedio de las anteriores.



Difusividad térmica y calor específico.

La difusividad térmica se obtiene a partir de la integración de la ecuación de calor en régimen no estacionario (Fourier) de tal forma que el resultado numérico de las temperaturas obtenidas durante el régimen transitorio de la placa coincidan lo máximo posible con los observados experimentales.

Para determinar este valor se procedió durante el período no estacionario del ensayo de conductividad térmica a medir las temperaturas de las caras fría y caliente y del plano medio cada 2 minutos. Resultados que luego sirven para ajustar el resultado de la integración.

El calor específico,  $c$ , se puede determinar aproximadamente a partir del cálculo de la difusividad térmica a través de la siguiente expresión:

$$c = \frac{k}{K \cdot \varphi}$$

donde:

- $k$ : conductividad térmica.
- $K$ : difusividad térmica.
- $\varphi$ : densidad.

Medidas de albedo y absorción del hormigón.

La medida de las irradiancias solares incidentes y reflejadas se realizó para diferentes horas del día y turbiedades de la atmósfera. Se utilizó un piranómetro de precisión espectral EPPLEY de tipo termoelectrónico sensible a toda la gama de longitudes de onda de la radiación solar.

**Ensayos in situ.**Medidas de la textura superficial.

Las mediciones de la textura superficial in situ se realizaron mediante un Tub Laser-texturometer (LTM) como se puede apreciar en la figura 10. Éste consiste en: una sonda láser, montada sobre una unidad móvil, que mide la distancia vertical entre la sonda y un pequeño punto láser en la superficie de la carretera, de la unidad móvil, que permite mover la sonda a lo largo de la carretera y un ordenador para el control de la posición del láser y el registro, proceso y archivo de los datos.

El procedimiento de ensayo es el siguiente: un rayo láser infrarrojo crea un punto láser en la superficie de la carretera que un sistema de lentes ópticas (que forma un ángulo de 30° con el rayo láser vertical) proyecta hacia la posición de un sensor de silicio. Éste proporciona

una corriente de salida relacionada con la posición del punto de luz en el sensor y, por tanto, con la distancia vertical entre el punto láser en la carretera y el sensor láser. Cuando la sonda láser se mueve a velocidad constante, el punto láser se mueve sobre el perfil de la superficie, obteniéndose una curva que describe la textura de la superficie de la carretera. Después las señales de salida son linealizadas, la señal de distancia así como la señal de intensidad del láser son leídas por un transformador analógico-digital y almacenadas en un ordenador para posteriores análisis.

El LTM básicamente trabaja sobre todo tipo de carreteras en condiciones secas. Para incrementar las propiedades reflectantes de la superficie y asegurar idénticas condiciones respecto a la intensidad de la señal, las superficies son preparadas mediante una delgada capa de pintura blanca como también se puede ver en la figura A2.10. El empleo de esta pintura permite velocidades de barrido de 10 mm/s.



Figura A2.10.- Medición de la textura superficial.

Puesto que todavía no existe una estandarización en la caracterización de la textura superficial de una carretera los procedimientos seguidos y los coeficientes obtenidos han estado de acuerdo con las propuestas y publicadas en el VTI report TF-52-20 "Measurements of Macrottexture by the VTI Mobile Laser Profilometer in the PIARC International Experiment 1992" del Swedish Road and Traffic Research Institute VTI. Adicionalmente, algunas mediciones y procedimientos de cálculo han sido extraídos de la DIN 4762 y la ISO 4287/1.

### Mediciones del ruido.

Las mediciones del ruido rueda/carretera se realizaron de acuerdo a dos métodos; el método trailer y el método estadístico pass-by.

#### **1.- Método trailer.**

El método trailer o remolque proporciona una información continua sobre las propiedades acústicas de las superficies de carretera examinando el ruido producido en el contacto rueda carretera por una rueda de ensayo aislada acústicamente en el interior de un remolque como se puede ver en la figura A2.11.



Figura A2.11.- Medición in situ del ruido generado en el contacto rueda-carretera.

El armazón del remolque es una caja ortogonal abierta inferiormente y revestida en su interior con un material que absorbe el sonido y recubierta por una capota. La rueda de ensayo gira en el interior del remolque aislada acústicamente del ruido exterior.

El ruido de rodadura de la rueda es recogido por 3 micrófonos y transferido al vehículo remolcador donde es grabado en cinta.

Las mediciones del ruido se llevaron a cabo sobre diferentes ruedas de diversas marcas comerciales siendo en todos los casos la presión de 2 bar y la carga de 3,5 KN. En general, los registros se hicieron a velocidades de 60, 80 y 100 Km/h.



## 2.- Método estadístico pass-by. (SPB)

El método SPB es un procedimiento de ensayo diseñado con el objetivo de determinar las diferencias en el ruido generado por el tráfico en diferentes secciones de carretera bajo unas condiciones específicas de tráfico. Las mediciones se llevaron a cabo en carreteras existentes y sobre vehículos, aleatoriamente elegidos circulando en solitario en condiciones de conducción normales.

Este método es el recogido por la norma alemana GESTrO-92. La norma ISO correspondiente no ha sido todavía completada.

### Medidas de la resistencia superficial.

Estas medidas que se hicieron de acuerdo con el método de bloque de la rueda remolcada (Trailer method, T-M), mediante el "Suttgart Friction Meter" (SRM), proporcionan una información continua sobre las propiedades de fricción de la superficie bajo condiciones mojadas. Esta medida de la resistencia superficial está estandarizada en la "Instructions for Skid Resistance and Traffic Safety" de la German Road and Transportation Research Association (FGSV).

El "Suttgart Friction Meter" (SRM), como se puede apreciar en la figura A2.12 es un camión equipado con una rueda adicional que puede ser frenada independientemente del sistema de frenado del camión. La superficie a medir es mojada mediante una película de agua de 1mm de espesor, simulando, por tanto, condiciones de intensa lluvia. La fuerza de fricción entre la rueda bloqueada y la superficie húmeda es medida y registrada.



Figura A2.12.- Medida in situ de la resistencia superficial.