

3

METODOLOGÍA: MATERIALES Y MÉTODOS

Para abordar el objetivo del trabajo, efectos de la puesta en obra de la durabilidad, comparando dos tipos de hormigón, uno convencional vibrado y otro autocompactante, se determinó que era primordial el estudio de la porosidad en todas sus vertientes y su efecto en el ataque por sulfatos, ya que se trataba de concretar el estudio en un ambiente tipo Qb. Para ello es imprescindible partir de unas probetas físicas en las que poder determinar ambos parámetros.

Después del diseño de mezclas, para ratificarlas en unos casos y para ajustarlas en el caso de los hormigones autocompactantes, es necesario realizar unas amasadas de prueba en las que se tantea la proporción adecuada de aditivo que es conveniente echarle para una adecuada fluidez, sin que se presenten los fenómenos de exudación ni de segregación, confeccionando los distintos tipos de probetas. Una de ellas servirán para caracterizar y determinar la resistencia a compresión del hormigón y otras diseñadas para verificar el efecto del espesor de hormigonado, tratando de emular los procesos de puesta en obra: llenado, vibrado, tiempo de llenado, etc.

Siendo imprescindible intentar la localización de los posibles defectos bajo los granos mediante inspección con lupa binocular, para evaluar la posible exudación, a la vez que permite la selección de las muestras que se han de ensayar en el porosímetro de mercurio.

El otro estudio ha consistido en someter otras probetas representativas de las mismas zonas a un ataque por sulfatos.

3.1. CONFECCIÓN DE HORMIGONES

Las propiedades de un hormigón vienen definidas y condicionadas por las características, calidad y proporción de sus componentes. A continuación se

exponen, tanto las características de las materias primas usadas, como las de las mezclas utilizadas.

3.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Los materiales empleados en la fabricación de los hormigones objeto de estudio, tanto del autocompactante como el de referencia convencional, han sido los disponibles en la zona, que se aplican, en general, a la confección de hormigones. Todos ellos cumplen las prescripciones de la Instrucción EHE vigente, según los suministradores. Algunas de sus características se describen a continuación.

3.1.1.1. Cemento

El cemento utilizado ha sido un I 42,5 R/SR facilitado generosamente por Cementos Cosmos del grupo Cimpor. Sus características se recogen en el anexo 1.

En realidad, se ha pretendido que el cemento empleado contuviese cenizas volantes en cierta proporción, es decir, se deseaba que hubiese sido un II/A-V, ya que este tipo parece ser más efectivo para lograr la autocompactabilidad de los hormigones. Pero, ante la dificultad de conseguirlo en la fecha en que se necesitaba, se optó por elaborarlo en el laboratorio mezclando el CEM I con un 15% de una ceniza volante. Las características de esta adición se recogen en el anexo 2.

3.1.1.2. Filler

Se ha utilizado un filler calizo procedente de la trituración de mármol de Macael. Se trata de carbonato cálcico prácticamente puro cuyas partículas pasan en un 90% por el tamiz de 0,063 mm.

3.1.1.3. Árido

Los áridos utilizados para ambos tipos de hormigones, procedentes del río Dílar, eran de naturaleza rodada y triturada y previamente a su comercialización se habían sometido a un proceso de lavado. El árido rodado presentaba una mineralogía variada siendo fundamentalmente de naturaleza calizo-dolomítica, con algunos granos esquistosos, mientras que el árido triturado poseía una naturaleza dolomítica pura. Fueron suministrados generosamente por la empresa “Hormigones Los Quintos”.

Se encontraban separados en tres fracciones: una arena 0/4, una gravilla 2/8 y una grava 4/16. La granulometría de las fracciones se recoge en el gráfico de la Figura 41 y Figura 42, representado el rodado y el triturado respectivamente.

Para formar la grava global del árido rodado, las fracciones 2/8 y 4/16 se mezclaron en las proporciones del 28% y 72%, respectivamente, ya que la mezcla obtenida con esos porcentajes se ajusta perfectamente a la granulometría de Fuller para el árido grueso de tamaño 16.

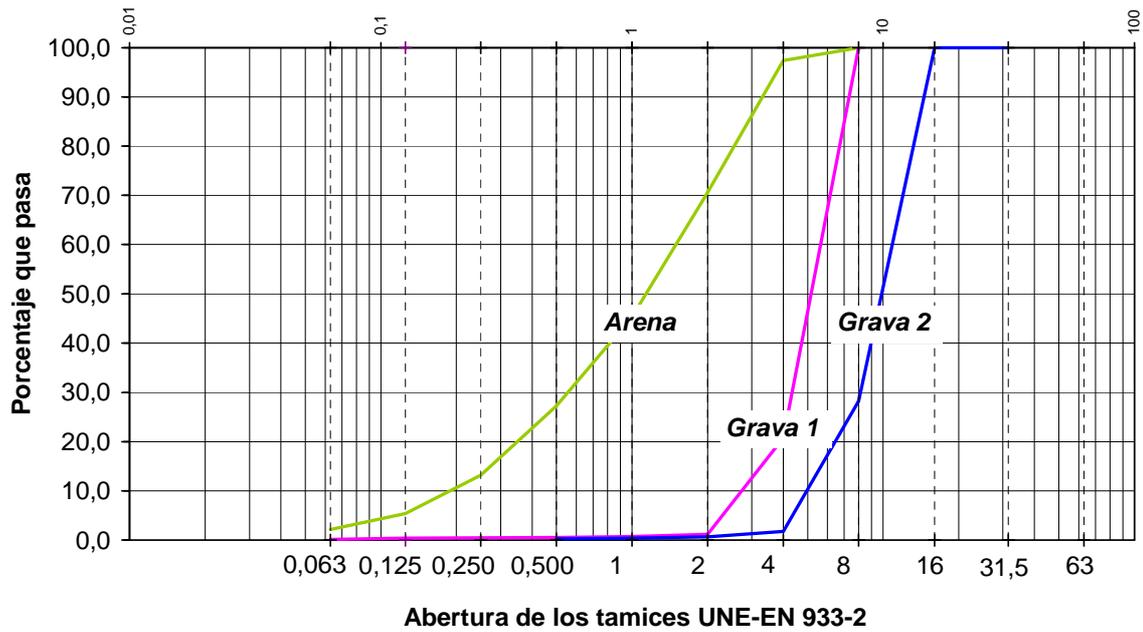


Fig. 41: Granulometría de las fracciones de los áridos usadas para la fabricación de los hormigones

Para el árido triturado la grava global se obtuvo de igual forma, tal y como se aprecia en el gráfico de la Figura 42.

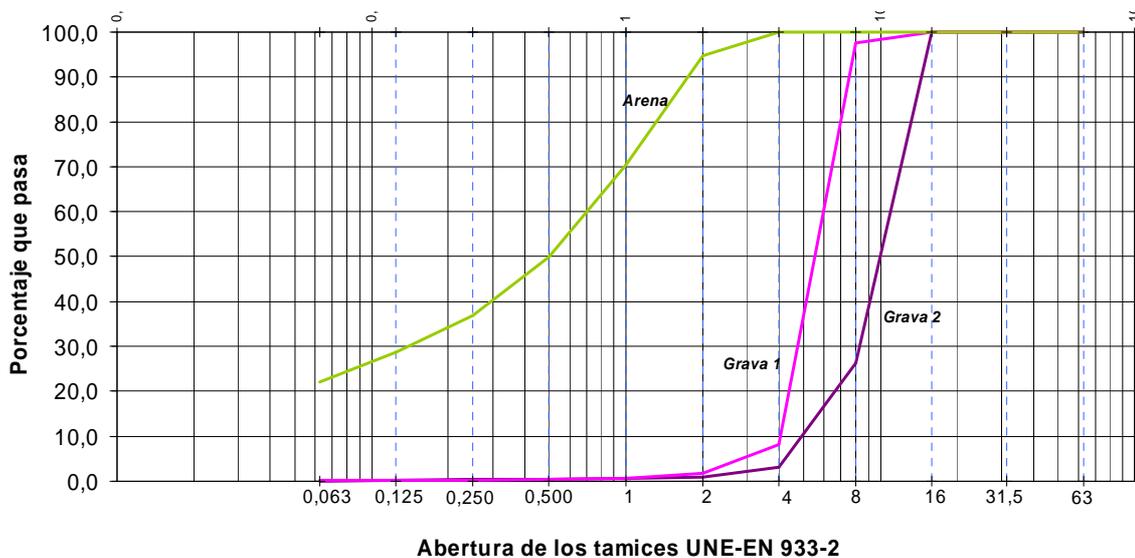


Fig. 42: Granulometría de las fracciones de los áridos usadas para la fabricación de los hormigones

En el laboratorio se han determinado algunas características de los áridos que son necesarias para el cálculo de la dosificación de los hormigones. Los resultados de las distintas determinaciones se recogen en las Tablas 11 y 12, correspondientes al árido rodado y al triturado.

Fracción	Densidad kg/m ³	Absorción %	Densidad de relleno kg/m ³	Equivalente de arena	VA g/100g de finos
Arena	2.855	0.50	----	80	0.89
Grava	2.741	0.80	1.671	----	----

Tabla 11: Características ensayadas del árido rodado.

Fracción	Densidad kg/m ³	Absorción %	Densidad de relleno kg/m ³	Equivalente de arena	VA g/100g de finos
Arena	2.864	0.48	----	74	0.25
Grava	2.800	0.47	1.632	----	----

Tabla 12: Características ensayadas del árido triturado.

3.1.1.4. Aditivo

Se utilizó un mismo aditivo superplastificante, tanto para el HAC como para el de referencia, sólo que en dosis diferentes. Se trataba de un aditivo de última generación basado en polímeros de éter policarboxilatos, de marca comercial Glenium C303 SCC, que fue suministrado generosamente por la firma BASF. Sus características se recogen en el anexo 3.

3.1.2. DOSIFICACIÓN DE LOS HORMIGONES

Los hormigones del estudio se han dosificado sobre la base de que, tanto el autocompactante como el convencional de referencia, tenían que poseer la misma relación agua/cemento y la misma dosis de cemento a fin de que puedan ser comparables los valores de porosidad, es decir, que las variaciones que pudieran detectarse no puedan ser atribuibles a diferencias de los valores de estos parámetros.

3.1.2.1. Dosificación del hormigón autocompactante

El procedimiento para dosificar el HAC ha seguido, por un lado, las prescripciones mínimas de la EHE para la clase de exposición ambiental Qb [40] y, por otro, ha tenido como base el método del profesor Okamura [60] [61] con las modificaciones de otros investigadores [65].

Cemento y agua

Como se sabe, las especificaciones de la EHE para ese tipo de ambiente son la relación agua/cemento, cuyo valor máximo es de 0,50, y la cantidad de cemento, que deberá ser como mínimo de 300 kg/m³. Los hormigones se han dosificado con este valor mínimo de cemento y con la cantidad de agua correspondiente a la relación A/C máxima indicada, por tanto, de 165 l/m³.

Árido grueso

El procedimiento de dosificación seguido para el HAC parte de la base de que los granos de esta fracción deberían quedar lo suficientemente distantes unos de otros como para que puedan moverse con relativa libertad sin apenas verse interaccionados por otros granos del árido grueso. Esto significa que la grava deberá estar en una proporción tal que, suponiéndola uniformemente repartida, deje entre sus granos una masa de mortero que les permita girar y desplazarse sin verse coaccionados por el rozamiento con otros granos de grava.

Los preconizadores de este método de dosificación han estimado que la dosis de árido grueso por metro cúbico para lograr dicho objetivo y, por tanto, para que el hormigón pueda ser autocompactante en este aspecto, deberá estar en torno al 50% de su densidad de relleno (véase la Figura 43).

No obstante, la dosis adecuada dependerá, evidentemente, del tamaño, naturaleza y morfología de las partículas de la propia grava, de las de la arena y de las del filler, por lo cual, la cantidad definitiva de árido grueso ha sido determinada mediante ensayos.

En nuestro caso, la proporción indicada ha tenido que disminuirse ya que se observó un excesivo rozamiento entre las partículas del árido grueso cuando se realizaron las amasadas de prueba y se ensayaron las propiedades de autocompactabilidad del hormigón. Por experiencias previas en el laboratorio se optó por la proporción del 45%

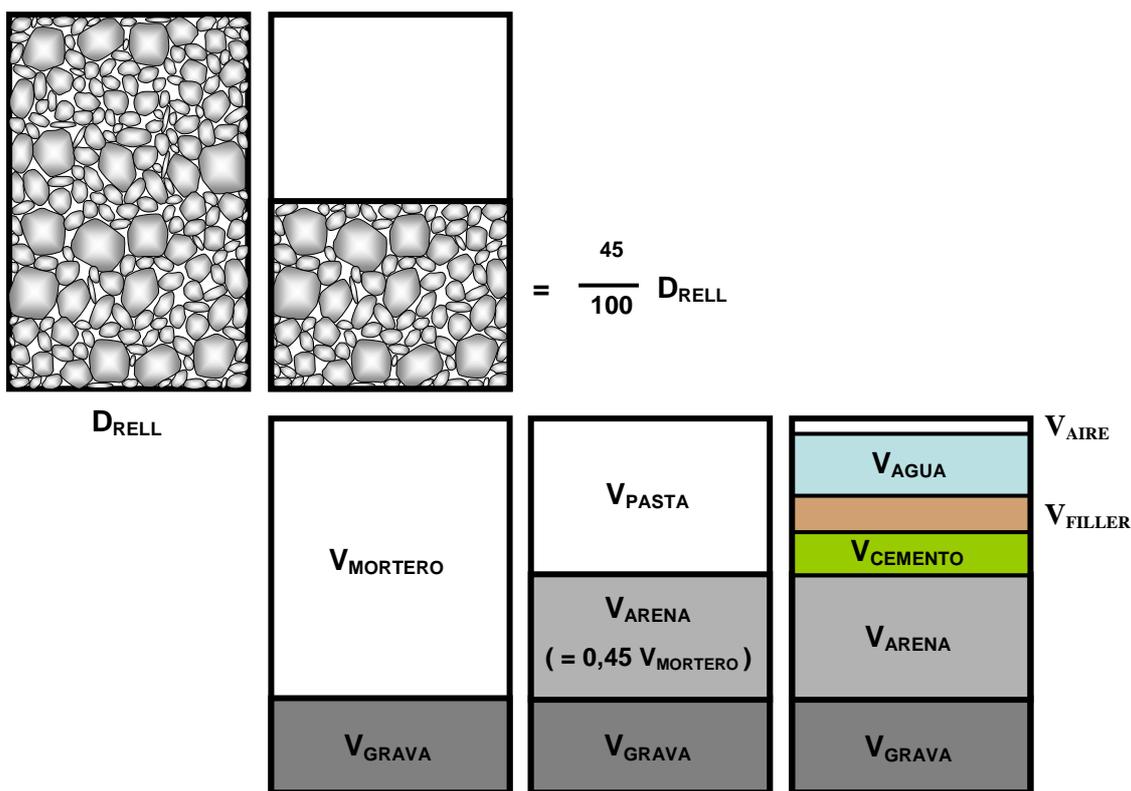


Fig. 43: Diagrama conceptual volumétrico de la dosificación del HAC

Árido fino

Según se ha indicado, el mortero juega el importante papel de actuar como medio blando en el que, por un lado, los granos de árido grueso pueden moverse con relativa facilidad y, por otro, impide su segregación. El mortero requiere, por tanto, una viscosidad moderada. Y no podría estar constituido sólo por pasta ya que las características físico-mecánicas del hormigón resultante serían realmente inaceptables.

Okamura y colaboradores habían estimado que, para conseguir estos objetivos, la proporción de pasta en el mortero de los HACs debería ser del orden del 60%, la cual la consideran constituida por el agua, todos los finos menores de 0,125 mm (el cemento, el filler adicionado y los finos del árido) y por el aire ocluido. Este método de dosificación establecía, entonces, que para permitir la necesaria movilidad de la mezcla, impedir la segregación del conjunto y no disminuir en exceso determinadas características mecánicas del hormigón endurecido, la proporción de arena ($>0,125$) debería ser del 40% respecto al volumen del mortero. Otros investigadores posteriores [8] han considerado más conveniente elevar esta proporción de arena al 50% del volumen del mortero.

La experiencia existente en el laboratorio sobre dosificaciones de hormigones autocompactantes con los materiales disponibles en la zona nos ha llevado a considerar el empleo de una dosis intermedia, equidistante de los

valores señalados, es decir, del 45%, y esa proporción ha sido la que se ha fijado definitivamente para la cantidad de arena en el mortero al dosificar estos hormigones.

El cálculo de la cantidad de arena ($>0,125$) se puede realizar fácilmente una vez establecida la proporción de grava respecto a la densidad de relleno que se pretende adicionar (Gr%). Como la proporción de arena en el mortero se ha fijado en el 45%, el volumen de arena en el hormigón será:

$$V_{ARENA (\geq 0,125)} / m^3 = \frac{45}{100} \cdot \left(1 - \frac{45}{100} \cdot D_{RELL}\right)$$

Filler (finos menores de 0,125 mm, exceptuando el cemento)

El cálculo de la dosis de finos ($<0,125$ mm) necesaria para formar la pasta requiere primeramente calcular el volumen de ésta, el cual se obtendrá restando al metro cúbico los volúmenes ya establecidos de grava y de arena.

La pasta, como se ha comentado anteriormente, puede considerarse constituida por agua, cemento, finos, aire ocluido e incluso, la parte sólida de aditivo (que no se ha tenido en cuenta por ser insignificante, dadas las dosis que se emplean). Los volúmenes de cemento y de agua ya están fijados desde el inicio al tener que ajustarnos a las prescripciones de la EHE. El volumen de aire, en cambio, no se conoce inicialmente y sólo puede conocerse tras su determinación empírica en el hormigón fabricado; no obstante, para poder realizar el cálculo de la cantidad de filler, puede estimarse que el volumen de aire en el hormigón se encuentra en la proporción de un 2%, corrigiendo después la dosificación si su valor es diferente del estimado.

Establecido todo ello, la dosis de filler que adicionemos será la diferencia entre la cantidad total necesaria de finos menores de 0,125 mm y la aportada por la arena y por la grava ($V_{\text{finos árido}}$). El volumen de filler adicionado ($V_{\text{FILLER ad.}}$) se obtendrá, entonces, de la relación:

$$V_{\text{FILLER ad.}} / m^3 = 1 - V_{\text{GRAVA}} - V_{\text{ARENA}} - V_{\text{CEM}} - V_{\text{AGUA}} - V_{\text{AIRE}} - V_{\text{finos árido}}$$

Aditivo

En estos hormigones se ha optado por confeccionar el hormigón autocompactante sin recurrir a agentes modificadores de la viscosidad sino que ésta se ha intentado conseguir únicamente con la dosis conveniente de finos. Por tanto, como aditivo sólo se ha empleado un superplastificante de los conocidos como de última generación, a base de policarboxilatos. Su marca comercial es

Glenium 303 SCC. Aunque si bien es cierto, se utilizaron otras muchas marcas en tanteos previos, como Flow 400, Structuro 343, Chryso 196, etc., el Glenium 303 es el que mejores resultados daba en cuanto a cantidad empleada (la menos posible), y escasa o nula segregación y exudación.

Por lo variables que pueden resultar las formulaciones comerciales de los aditivos y por la influencia que parece tener en su dosis la naturaleza y contenido del cemento y del fino, la proporción conveniente del superplastificante se ha tenido que determinar a través de las amasadas de prueba mediante la observación del hormigón obtenido, especialmente en lo relacionado con la segregación, y de acuerdo con los valores mostrados de los parámetros de autocompactabilidad más comunes (escurrimiento y embudo en V).

Correcciones

Evidentemente, el contenido de humedad de los áridos y su absorción se han tenido en cuenta a la hora de calcular tanto sus propias cantidades como la cantidad de agua de la amasada. Asimismo, se ha tenido en cuenta la proporción de finos (<0,125 mm) que presentan los áridos para calcular las cantidades definitivas que tienen que adicionarse de grava y de arena e, incluso, la proporción de grava que posee la arena y el contenido de arena que presenta la grava. Todo ello ha hecho que las dosis de los distintos componentes realmente utilizados en el diseño de los hormigones no difieran de las calculadas inicialmente.

3.1.2.2. Amasadas de prueba

Debido a la innumerable cantidad de amasadas realizadas previamente para otros trabajos en los que se estudiaban la durabilidad en otros ambientes, se tiene una considerable experiencia en la dosificación; por ello, se hicieron muy pocas amasadas de prueba.

En el laboratorio se disponía de dos tipos de árido, uno triturado y otro rodado, así que para ver el efecto de cada uno de ellos en el hormigón se decidió hacer amasadas de prueba con cada uno; obteniendo como resultado que con el rodado era más fácil de conseguir las propiedades de autocompactabilidad, debido a las propiedades físicas de éste.

Por consiguiente, tras evaluar los resultados y como el hormigón que se había hecho con el árido rodado cumplía con creces todos los ensayos característicos para un HAC, se decidió no hacer más tanteos y dar por buena la dosificación estudiada.

Las dosificaciones establecidas son las que figuran en la Tabla 13.

Designación	Cantidades en kg/m ³						
	Agua	Cemento	Filler	Arena	Grava 1	Grava 2	SP
G45/A45 R	172	350	262	805	266	673	4.6 (2%)
G45/A45 T	172	350	125	1097	283	509	8.8 (1,9%)

Tabla 13: Dosificaciones de los HAC seleccionadas para realizar el estudio.

Las granulometrías de las distintas dosificaciones se pueden observar en las Figuras 44 y 45.

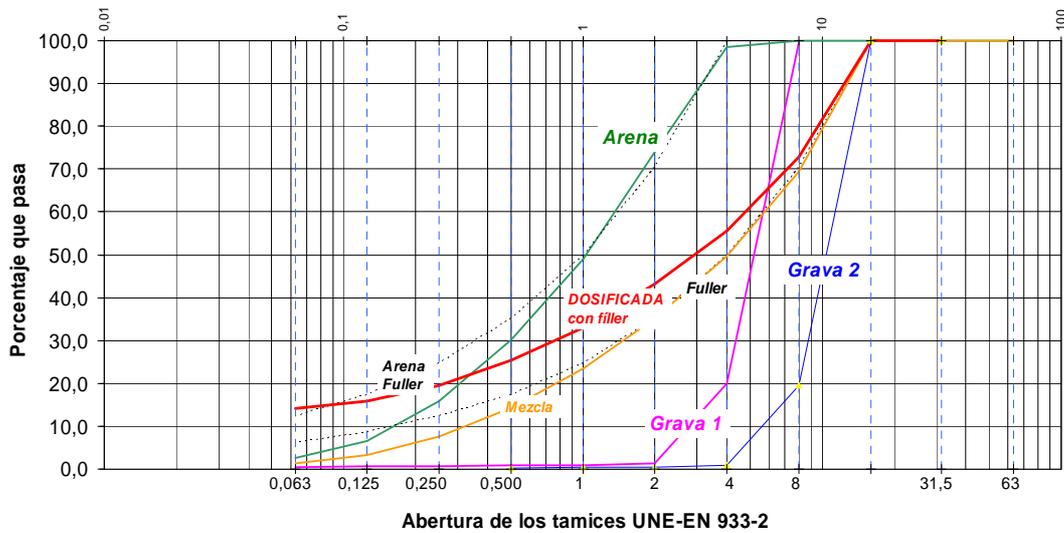


Fig. 44: Granulometría de la mezcla de las fracciones del árido rodado y del filler con la que se ha confeccionado el hormigón autocompactante

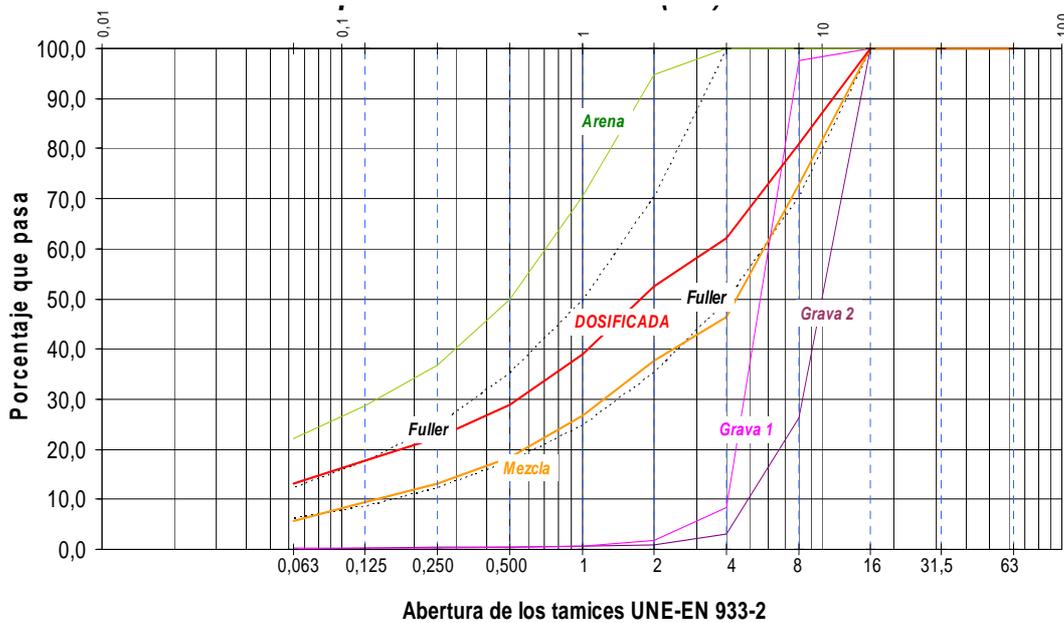


Fig. 45: Granulometría de la mezcla de las fracciones del árido triturado y del filler con la que se ha confeccionado el hormigón autocompactante

El aspecto del hormigón realizado con el árido rodado se puede apreciar en la figura 46. Los valores del ensayo de escurrimiento y del embudo en V, se exponen en la Tabla 14.



Fig. 46: *Aspecto de la torta en el ensayo de escurrimiento del hormigón obtenido con la dosificación G45/A45 de árido rodado.*

El aspecto del hormigón realizado con el árido triturado se puede apreciar en la Figura 47.



Fig. 47: *Aspecto de la torta en el ensayo de escurrimiento del hormigón obtenido con la dosificación G45/A45 de árido triturado*

Designación	Ensayo de escurrimiento		Embudo en V	Observaciones
	T ₅₀ (s)	d _f (cm)	T _V (s)	
G45/A45 R	4,3	75	9,0	Torta homogénea
G45/A45 T	5,0	65	10,0	Ligera segregación

Tabla 14: Resultados de los parámetros medidos en los HAC resultantes de las amasadas.

Se ha optado por la dosificación de G45/A45 (designada así por contener una cantidad de grava igual al 45% de su densidad de relleno y un 45% de arena en el mortero) debido a que como ya hemos dicho anteriormente, en estudios previos para otros tipos de ambiente fue la que mejores resultados de autocompactabilidad dio, centrados en los límites recomendados por la Instrucción de Hormigón Estructural [8], (véase la Tabla 15) con la mayor proporción de árido.

Con esta dosificación se realizaron amasadas de mayor volumen para determinar el conjunto de los ensayos de autocompactabilidad y para confeccionar los distintos tipos de probetas aplicables el estudio.

Ensayo	Parámetro medido	Rango admisible
Escurrecimiento	T ₅₀	T ₅₀ ≤ 8 seg
	d _f	550 mm ≤ d _f ≤ 850 mm
Embudo en V	T _V	4 seg ≤ T _V ≤ 20 seg
Caja en L	C _{bL}	0,75 ≤ C _{bL} ≤ 1,00
Escurrecimiento con anillo J	d _{Jf}	≥ d _f -50 mm

Tabla 15: Valores recomendados por la Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08, para los parámetros de autocompactabilidad.

3.1.2.3. Dosificación del hormigón convencional

El hormigón de referencia convencional se ha dosificado también con los valores de la relación agua/cemento y de la dosis de cemento según los límites prescritos en la EHE para la clase de exposición ambiental Q_b, por tanto, las cantidades de cemento y de agua también se encontraban determinadas desde el principio.

Para conseguir que la consistencia de este hormigón fuera la apropiada, es decir, para que fuese plástica de forma que pudiera ser compactado mediante vibración, ante la imposibilidad de poder modificar la cantidad de agua, se empleó un aditivo plastificante, concretamente el mismo que se utilizó en el HAC, sólo que en menor dosis.

El porcentaje de las distintas fracciones de árido se calculó para que la mezcla junto con los 50 kg/m³ de cemento en exceso respecto a los 300 kg de base, se ajustara a la curva de Fuller de tamaño 16, mediante tanteo gráfico, análogo al recomendado por Dreux [18]. La mezcla del árido puede observarse en la Figura 48.

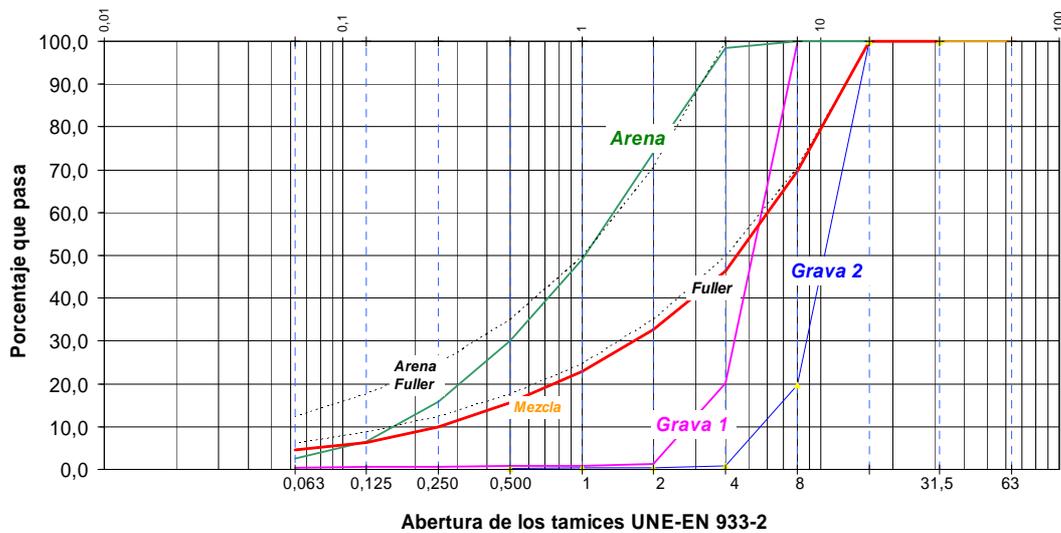


Fig. 48: Granulometría de la mezcla de las fracciones del árido rodado y del filler con la que se confeccionó el hormigón convencional de referencia

De este hormigón fue necesario hacer nada más que una única amasada de 150 litros para confeccionar tanto las probetas necesarias para el estudio como las normalizadas para la determinación de resistencias.

3.1.3. CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE EN ESTADO FRESCO

De la propia definición de estos hormigones se desprenden sus propiedades esenciales:

Fluidez, para discurrir de forma uniforme por los encofrados y no bloquearse en secciones estrechas y fuertemente armadas.

Viscosidad y cohesión moderadas para mantener la homogeneidad y evitar segregación.

Cómo cuantificar dichas propiedades ha sido, y aún hoy lo es, el reto de los investigadores, pues se pretende evaluar un equilibrio, no muy claro, entre tensión de fluencia y viscosidad, pero con técnicas indirectas tales como: medir la velocidad en el extendido de una porción de hormigón, la capacidad de paso por determinadas secciones, la nivelación final e incluso su aspecto en el acabado.

El estudio se inicia con los ensayos descritos en las últimas “Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante” (2002 y 2006), muchos de los cuales terminan siendo propuestos e incluidos en la actual Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08, en su Anejo 17 que establece las Recomendaciones para la utilización del hormigón autocompactante, el cual, en su artículo 31.5 establece textualmente la forma de evaluar la docilidad de estos hormigones:

La caracterización de la autocompactabilidad se realiza a través de métodos de ensayo específicos que permiten evaluar las prestaciones del material en términos:

- De fluidez, mediante ensayos de escurrimiento según UNE 83.361 o de ensayos de escurrimiento en embudo en V, según UNE 83.364.
- De resistencia al bloqueo, mediante ensayos del escurrimiento con anillo J, según UNE 83.362 y mediante ensayos de la caja en L, según UNE 83.363.
- De resistencia a la segregación.

3.1.3.1. Métodos de ensayo y criterios de valoración

A continuación se describen cada uno de los ensayos que han servido para caracterizar las propiedades de los hormigones estudiados, el proceso seguido y los resultados obtenidos.

Caracterización de fluidez. Ensayo de escurrimiento UNE 83.681:2007

Según las Directrices europeas para hormigón autocompactante del 2006, el resultado de este ensayo indica la capacidad de llenado del hormigón autocompactante. El tiempo T_{50} es también una medida de la velocidad de flujo y por lo tanto de la viscosidad del autocompactante.

Esta norma especifica un método para caracterizar la fluidez del hormigón autocompactante en el que intervengan áridos de tamaño máximo no superior a 25 mm, mediante la determinación del escurrimiento final y el tiempo invertido

al dejar fluir el hormigón libremente tras introducirlo en un molde en forma de tronco de cono.

La determinación se lleva a cabo a través de los siguientes pasos:

Se coloca la bandeja sobre una superficie plana y horizontal libre de vibraciones o sacudidas externas. Se humedece la bandeja y el molde inmediatamente antes del ensayo, sin dejar agua libre.

Se sitúa el molde centrado sobre la bandeja ayudándose de la marca circular de 200 de diámetro, y se mantiene en posición presionando las asas hacia abajo, asegurando que el hormigón no sale por debajo del cono.

Se llena el molde de una sola vez a partir de una sola muestra de unos 10 litros, ayudándose opcionalmente de una tolva. Este llenado se realiza sin compactación alguna, eliminando el sobrante de la parte superior del cono.

No debe dejarse el cono lleno más de 30 s. Durante este tiempo se quita el hormigón derramado, si lo hubiera, de la bandeja y se asegura de que ésta está completamente húmeda, pero sin sobranes de agua.

A continuación, se eleva verticalmente el cono de forma continua, sin interferir en el flujo del hormigón en un tiempo comprendido entre 2 y 3 segundos. Para tomar el tiempo T_{50} , hay que accionar el cronómetro justo en el momento que el cono deja de estar en contacto con la bandeja y detenerlo cuando la masa de hormigón alcance algún punto del círculo de 500 mm con una resolución de 0,1 s. Sin tocar la bandeja o el hormigón, se mide el diámetro máximo de la extensión del flujo y se registra como d_{f1} . Entonces se mide el diámetro perpendicular al d_{f1} y se registra como d_{f2} (Figuras 49 y 50).

El ensayo se considera correctamente ejecutado si la diferencia entre los diámetros perpendiculares es menor a 50 mm.

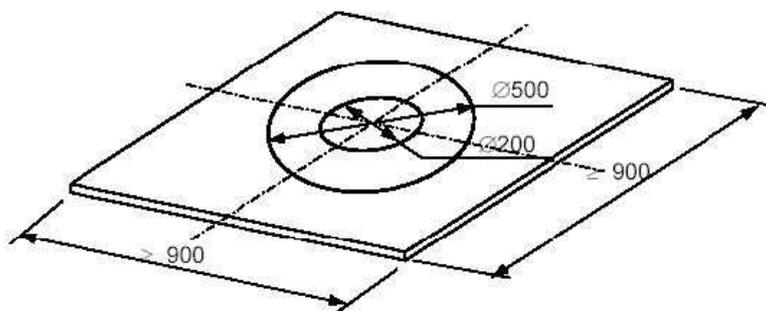


Fig. 49: Medidas del ensayo de escurrimiento



Fig. 50: *Ensayo de extensión de flujo*

Hay que comprobar si se produce o no segregación en el borde perimetral del hormigón así como la posible exudación, o la mayor concentración del árido grueso en la zona central de la masa del hormigón. La pasta de cemento/mortero puede segregarse de los áridos gruesos, haciendo un anillo de pasta/mortero extendido unos milímetros más allá de los áridos gruesos.

El escurrimiento d_f es el valor medido de los determinados en las dos direcciones perpendiculares entre sí.

Este ensayo, de fácil ejecución, se ha realizado con el cono invertido, tal y como se refleja en los primeros estudios que se consultaron. Aunque la norma es clara en la forma de su ejecución: asiento sobre su diámetro mayor (200 mm) y uso opcional de tolva de llenado, se ha considerado que tal y como se ha realizado permite cuantificar mejor el tiempo que la torta tarda en alcanzar la marca de 500 mm para la determinación del T_{50} .

Por otro lado, la colocación del cono invertido facilita el llenado y evita riesgos de derrame que pueden ocasionar alguna perturbación en el ensayo. En cuanto a la influencia que pueda tener en el desparramado creemos que es irrelevante.

Si la grava junto con el mortero llegan cohesionados hasta el borde de la torta, indicará que la cohesión y la viscosidad son suficientes para mantener la mezcla homogénea (véase la Figura 51), aunque por otro lado, también puede ocurrir que este borde final de torta llegue cohesionado, pero exista una acumulación central de grava debido a la segregación (Figura 52).



Fig. 51: Borde final de torta de un hormigón cohesionado.



Fig. 52: Torta con acumulación central de grava.

Si no existe esa cohesión y la pasta llega antes al borde de la muestra que el mortero se produce un halo variable de unos milímetros a centímetros, en mezclas tendentes a la exudación. En nuestro caso debido a la similitud de la dosificación en agua y polvo (cemento y finos), las exudaciones que al principio se produjeron fueron provocadas por un exceso de aditivo (Figura 53).



Fig. 53: Frente de la torta con salida del mortero con respecto a la grava

Se ha puesto de manifiesto la dificultad existente para cuantificar la exudación y segregación a través de la medida del halo que se produce al final

del extendido, puesto que aunque se han controlado todos los parámetros externos, como pueden ser nivelación de la superficie de trabajo y limpieza de ésta, debido a dicho proceso de limpieza (mediante pistola hidráulica), es inevitable que en la superficie de la mesa quede algo de humedad, aumentando así el diámetro del halo (Figura 54).



Fig. 54: Halo final de extendido con excesiva agua en la superficie de la mesa de ensayo.

El ensayo del índice de estabilidad visual (IEV) propuesto en la “Guía Práctica del Hormigón Autocompactante” [8], pretende establecer la estabilidad de la torta en función de los criterios que se reflejan en la Tabla 16.

IEV	CARACTERÍSTICAS	VALORACIÓN
0	Ausencia de segregación y lechada bordeando el hormigón en el ensayo de extensión de flujo.	Utilizables según la pieza hormigonada y el sistema de puesta en obra.
0.5	El mortero no está desprendido de la pasta pero hay una pequeña evidencia de segregación o de burbujas de aire en la superficie	
1	Indica que no hay segregación en la masa del hormigón pero que existen evidencias de un pequeño asentamiento o de burbujas de aire.	
1.5	Ya empieza a aparecer una pequeña banda de mortero alrededor de la masa del hormigón.	
2	Esa banda de mortero puede llegar a estar hasta 10mm.	Requeriría ajustes en la dosificación
3	Segregación evidente con una banda de mortero alrededor de la masa total superior a 10.	

Tabla 16: Valoración de los hormigones según sus características de cohesión y viscosidad

Quizás este sistema de valoración podrá ser válido para evaluar la continuidad respecto a distintas amasadas pero siempre que su dosificación sea común. Durante la realización de este estudio se ha podido constatar que para unos valores muy próximos de IEV, por ejemplo, de 0.5 - 1.5, en el ensayo de embudo V se han reflejado cambios muy significativos. Por lo que es probable que no arroje toda la información que a primera vista podría parecer cuando se trate de evaluar hormigones diferentes.

Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Ensayo del escurrimiento con anillo Japonés UNE 83632:2007

Este ensayo constituye un complemento del anterior ensayo de escurrimiento con la inclusión de otro parámetro denominado coeficiente de bloqueo, medido al introducir el hormigón en un molde como en el caso anterior pero ahora haciéndolo pasar a través de unas barras metálicas dispuestas en formas de anillo (Figura 55). Éstas modificarán el tiempo de escurrimiento y la extensión final.

Para la realización del ensayo se coloca la bandeja sobre una superficie similar a la del ensayo anterior. Después de colocar el cono se sitúa el anillo centrado sobre la bandeja, concéntrico al molde, ayudándose de una marca circular de 300 ± 1 mm (véase la Figura 56). Al igual que el ensayo anterior, se presionan las asas contra la bandeja para evitar el que el hormigón fluya entre ambos.

A continuación, se eleva verticalmente el molde, tirando de las asas. Esta operación debe realizarse de forma continua en un tiempo comprendido entre 2 y 3 segundos. En el momento de elevar el molde, y de manera simultánea, se acciona el cronómetro y se detiene cuando la masa alcanza visualmente la marca de 500 mm de diámetro.

Una vez cesa completamente el movimiento del hormigón, se miden con la regla los diámetros finales alcanzados en el desparramado en dos direcciones perpendiculares d_{f1} y d_{f2} y se determina su media siendo esta el valor del ensayo.

Al igual que el anterior, el ensayo se considera aceptable si la diferencia entre ambas medidas no supera 50 mm.

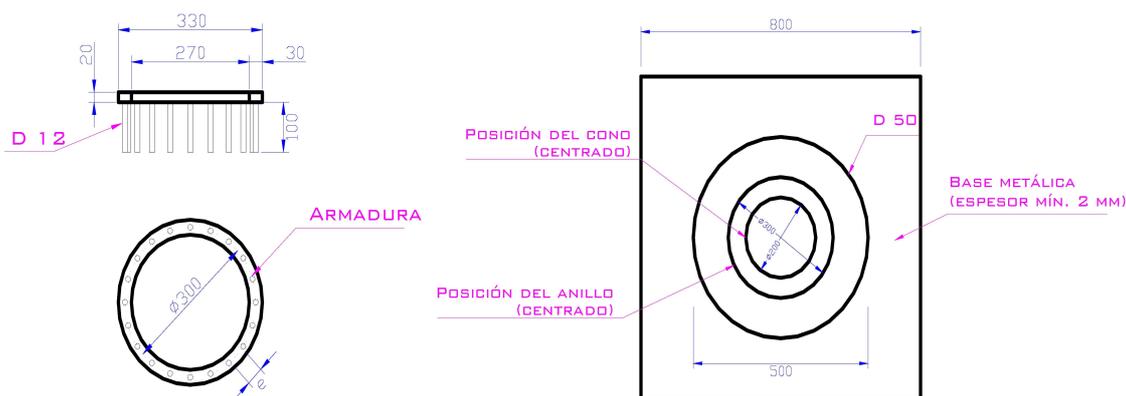


Figura 55: Dimensiones del anillo y disposición para la realización del ensayo.



Figura 56: Colocación del cono y el anillo para la realización del ensayo.

Se mide la distancia vertical entre el borde superior del anillo y la superficie del hormigón en dos puntos de la circunferencia interna del anillo, situados aproximadamente en el punto medio del espacio de dos barras. Uno de estos puntos está situado lo más próximo posible a la intersección de la circunferencia interna del anillo con uno de los diámetros en el que se determinó el extendido, d_{f1} . El otro punto estará situado lo más próximo posible a la intersección de la circunferencia interna del anillo con el diámetro en el que se determinó d_{f2} (Figura 57). Restando estas diferencias de la altura total del anillo, 120 mm, se obtiene la altura designada como H1, como el promedio de las dos determinaciones.

A continuación se repite el proceso pero midiendo ahora en los correspondientes puntos externos del anillo. Y de igual manera, restando estas distancias a la altura del anillo, se obtiene ahora la altura designada como H2, así mismo como promedio de estas dos últimas determinaciones.

También puede observarse si se produce segregación o la posible exudación de la pasta en la zona perimetral (Figura 58), la mayor concentración de árido grueso en la zona central de la masa del hormigón, etc.



Fig. 57: Medida de una altura después de la relación del ensayo del anillo J



Fig. 58: *Ejemplo de anillo exudado*

El escurrimiento, d_{jf} , es el valor resultante de $(df1+df2)/2$, redondeando a los 5 mm. El tiempo de escurrimiento T_{j50} , es el tiempo empleado, en segundos, en alcanzar el diámetro correspondiente a 500 mm.

El coeficiente de bloqueo C_{bE} se calcula mediante la expresión:

$$C_{bE} = (H2/H1) \times 100$$

Para este ensayo existen dos modalidades en función de que el tamaño máximo del árido sea menor o mayor de 20 mm utilizando distinto número de barras, 20 ó 12, con diámetros de 20 ó 28. En este trabajo se ha utilizado el primero por ser el tamaño del árido 16 mm.

Este ensayo es el único propuesto por la EHE en su Artículo 86.3.1., para el caso de hormigones densamente armados o pretensados. Por tanto parece que sólo habrá que recurrir a él en los ensayos de recepción de hormigón en obra en situaciones especiales, siendo el ensayo anterior el propuesto de forma general.

Determinación del tiempo de flujo. Ensayo del embudo en V. UNE 83.364.:2007

Según las Directrices Europeas para hormigón autocompactante de 2006, este ensayo se usa para valorar la viscosidad y la capacidad de llenado del hormigón autocompactante.

La determinación se realiza según la citada norma UNE llenando un embudo con forma de V con hormigón fresco y anotando el tiempo que tarda el hormigón en salir del embudo, siendo éste, el tiempo de flujo del embudo en V.

El embudo en forma de V de sección rectangular (Figura 60) se ajustará a las medidas indicadas en la Figura 59.

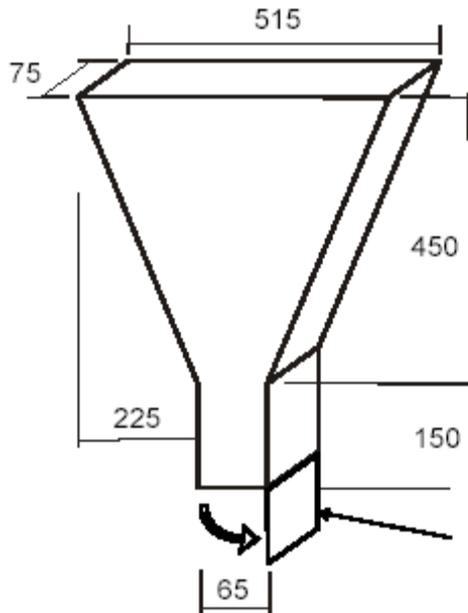


Fig. 59: Dimensiones del embudo V



Fig. 60: Embudo utilizado en laboratorio para la realización de ensayos

El ensayo se iniciará limpiando y humedeciendo el embudo y la compuerta inferior. Se cierra la compuerta y se pone la muestra de hormigón en el embudo, sin compactación alguna; después se enrasa la parte superior con la barra metálica, igualando la superficie del hormigón a la parte superior del embudo. Se pone el recipiente debajo del embudo para recoger el hormigón en su caída. Pasados 10 ± 2 s del llenado del embudo, se abre la compuerta y se toma el tiempo t_v con una resolución de 0,1 segundos, desde el inicio de la apertura de la compuerta y hasta que se pueda ver por primera vez, verticalmente a través del embudo el interior del recipiente. El tiempo de flujo del ensayo del embudo en V es t_v .

En función de los ensayos realizados, el tiempo transcurrido entre el llenado, enrasado y la apertura de la trampilla puede hacer fluctuar los resultados de forma destacada en varios segundos, sobre todo si el hormigón presenta signos incipientes de inestabilidad o de segregación. Aspectos que no siempre se han visto reflejados en el ensayo del extendido sin confinamiento.

Respetar el tiempo de 10 segundos desde el llenado y la apertura de la trampilla, es un aspecto que puede pasar desapercibido pero resulta imprescindible para conseguir la repetibilidad de los ensayos en una misma amasada. Ensayos realizados justo después del vertido, siempre han arrojado valores inferiores a cuando se ha producido un retraso desde la toma de la muestra hasta la finalización del ensayo. Esta diferencia será tanto mayor cuanto menor estabilidad presente el hormigón.

El tiempo del embudo determinado a los 5 minutos, abandonado por los investigadores y tampoco incluido en la nueva instrucción, penaliza en extremo a los hormigones por leves que fuesen los síntomas de segregación, y asimismo pondrían de manifiesto una gran estabilidad.

Este ensayo es posible que sea el que mejor evalúa tanto la fluidez como la capacidad de paso para un hormigón como el estudiado. Pequeños indicios de segregación implican un retraso muy considerable en el tiempo final obtenido con este ensayo e incluso el bloqueo.

Caracterización de la fluidez. Método de la caja en L UNE 83.363.:2007

El ensayo de la caja en L se aplica para evaluar la capacidad de paso del hormigón autocompactante, es decir, de fluir a través de aperturas estrechas incluyendo el espaciado entre las barras de la armadura y otras obstrucciones, sin segregación ni atasco.

La citada norma especifica un método para caracterizar la fluidez en presencia de barras de hormigón autocompactante en estado fresco y en cuya composición no intervengan áridos de tamaño máximo superior a 25 mm, mediante la determinación del coeficiente de bloqueo y el tiempo de escurrimiento al deslizar el hormigón dentro de un espacio confinado.



Fig. 61: *Caja en L utilizada para la realización de ensayos*

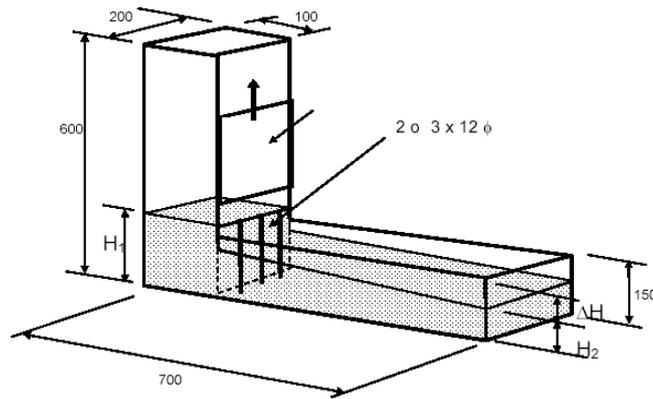


Fig. 62 : Dimensiones de la caja en L

El molde (Figuras 61 y 62) es fabricado con material no atacable por la pasta de cemento y no absorbente; se compone de dos cuerpos huecos, con la superficie interna lisa, uno vertical y otro horizontal. Ambos cuerpos están separados por una compuerta de accionamiento exterior que se desplaza por el interior de unas vías.

Los juegos separadores de barras metálicas lisas, espaciados a lo ancho de la caja en L, a una distancia máxima entre la cara interior del cuerpo vertical y el eje de las barras de 50 mm, estarán formados por tres barras de 12 mm de diámetro para tamaño de árido igual o menor a 25 mm y espaciadas de forma equidistante en toda la sección.

Si el tamaño es menor de 25 mm solo se dispondrán dos barras de 16 mm de diámetro también espaciadas de forma equidimensional en la sección de la caja.

La porción utilizada para el llenado de la caja debe de ser de al menos 13 litros; la medición del tiempo se realizará en segundos y con aproximación de mm.

Para realizar el ensayo se coloca el molde sobre una superficie plana y horizontal, libre de todo tipo de vibraciones. Se humedece el molde, sin dejar agua libre y se comprueba que la compuerta este asegurada y no deje escapar hormigón.

La tolva se llena de una sola vez con una sola muestra; se enrasa y, a continuación, se levanta rápidamente la compuerta en un tiempo comprendido entre dos o tres segundos. Simultáneamente a la apertura de la compuerta, se acciona el cronometro y se mide el tiempo transcurrido hasta que la muestra alcanza el extremo del molde horizontal.

Una vez cesa completamente el movimiento del hormigón, se mide la distancia vertical entre borde superior del hormigón y la del cuerpo vertical y en

su parte central. Restando esta distancia de la altura interior del cuerpo vertical (600 mm), se obtiene una altura H1. A continuación se mide la distancia vertical entre borde superior del cuerpo horizontal y la superficie del hormigón, también en el centro de la misma. Restando esta distancia de la altura interior del cuerpo horizontal (150 mm), se obtiene la altura H2, según lo mostrado en la figura 58.

Se ha comprobado que valores dentro de los parámetros contemplados para el ensayo del embudo han resultado insuficientes para el nivelado de la caja y, por el contrario, hormigones que presentan en la torta signos evidentes de exudación la han nivelado.

Los ensayos propuestos para la caracterización de la autocompactabilidad recogidos en el apartado 31.5. del Anejo 17 de la EHE-08, mediante los métodos del embudo V y de la caja en L, se realizarán únicamente en la central de producción del hormigón, como ensayos previos, para ajustar la dosificación, y como ensayos característicos, no siendo aplicables a los de control en obra.

A continuación, en la Tabla 17, se resumen los parámetros que pueden evaluarse con cada uno de los ensayos estudiados y, al mismo tiempo, con la asignación de rombos se pretende reflejar la valoración que en el desarrollo de este trabajo se ha podido estimar.

ENSAYOS CONTEMPLADOS EN LA EHE 2007 PARA CARACTERIZAR HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE					
ENSAYO	Escurrecimiento	Anillo J		Caja en L	Embudo en V
NORMA	UNE 83.661:2006	UNE 83.362:2007		UNE 83.363:2007	UNE 83.364:2007
Parámetro	Extendido	Extendido j	H1-H2	Nivelación	Tiempo vertido
Capacidad de relleno	◇◇	◇	◇	◇	◇
Resistencia al bloqueo	x x	◇◇	◇◇	◇◇	◇◇
Segregación /Exudación		◇	◇		◇

x no adecuado ; ◇ adecuado; ◇◇ bastante adecuado; valoración visual

Tabla 17: Valoración de los ensayos en función de la información que aportan

3.1.4. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

La resistencia a compresión se ha determinado para caracterizar los hormigones estudiados y poder relacionarla con otros parámetros esenciales del estudio, ya que el hormigón no se ha dosificado para obtener una resistencia concreta, sino que se hace fijando tanto la relación A/C como la cantidad de cemento a los límites especificados por la Instrucción EHE-08.

Al fijar estos mismos parámetros en los dos tipos de hormigones y someterlos al mismo proceso de curado, la resistencia sólo estará condicionada por el grado de compactación de las probetas y la influencia de la dosis de filler, que es bastante superior en el autocompactante. La incidencia de la proporción de aditivo se considera irrelevante.

Para la ejecución del ensayo se prepararon con cada uno de los hormigones cuatro parejas de probetas cúbicas de 150 mm. Antes de proceder a su llenado, se les aplicó un desencofrante. Las probetas correspondientes al hormigón convencional se llenaron en dos tongadas compactándolas mediante vibrador de aguja (Figura 63), mientras que las probetas de autocompactante se confeccionaron rellenando los moldes de una sola tongada y sin ningún tipo de compactación forzada (Figura 64). Transcurridas 24 horas de la realización de esta operación, se procedió al desmoldado.



Fig. 63: Llenado y vibrado en dos tongadas de los moldes de hormigón convencional



Fig. 64: Probetas enmoldadas e identificación del hormigón autocompactante

El curado de las probetas se realizó sumergiéndolas en agua (Figura 65) a una temperatura próxima a 20 °C durante 3, 7, 14, 28, 60, 180 y 210 días según el plazo en el que se pretendía determinar la resistencia.



Fig. 65: Piscinas donde se sumergen las probetas para su curado

Antes de proceder a su rotura en la prensa de compresión, se dejó transcurrir unas horas para conseguir un cierto secado de las probetas después de sacarlas de la piscina de curado.

La rotura de las probetas se llevó a cabo siguiendo el procedimiento descrito en la norma “Ensayo de hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a compresión de probetas” UNE-EN 12939-3.

Se secaba el exceso de humedad de la superficie de las probetas, limpiando los posibles restos de material que pudieran quedar y se colocaba en los platos de carga de la prensa de forma centrada, apoyada sobre una de sus caras paralelas a la dirección de llenado y en dirección perpendicular a éste, de forma que la aplicación de la carga se hace sobre dos caras perfectamente lisas, sin necesidad de refrentado, ya que se habían formado sobre las paredes del molde (Figura 66).

Prácticamente todas las probetas objeto de este estudio han sufrido una rotura satisfactoria conforme a lo especificado en la norma UNE-EN 12390-3.



Fig. 66: Realización de ensayo de compresión y equipos

3.1.5 CONFECCIÓN Y CONSERVACIÓN DE LAS PROBETAS ESPECÍFICAS PARA EL ESTUDIO

Ante la imposibilidad de disponer de estructuras reales ni tampoco de poder confeccionar elementos esbeltos a escala real como, por ejemplo pilares, pero siguiendo con el empeño de emular las condiciones reales para intentar reproducir los efectos de la puesta en obra, se elaboran unas probetas con suficiente altura para que, se pudiese manifestar la segregación y/o exudación, en el caso de producirse. Esta fue de un metro por considerar suficiente para verificar si se producen los defectos antes mencionados por efecto del llenado o del vibrado.

Se ha buscado una sección estrecha y en la que los encuentros de los encofrados forman ángulos mayores y menores de 90° para ver si condicionan algún tipo de bloqueo que incida en la calidad del acabado de las aristas y comprobar si, con ello también se pone de manifiesto algún tipo de segregación (Figura 67).



Fig. 67: Forma y altura de los moldes para las probetas prismáticas

El vertido del hormigón en estos moldes se realiza mediante caída libre de una altura de unos 10 cm sobre la parte superior del molde (Figura 68). El llenado se realiza en concordancia con las características de cada tipo de hormigón, en los HAC de una sola vez, con la aportación de una única muestra de hormigón, y las probetas confeccionadas con hormigón vibrado se llenan en dos tongadas de medio metro de altura (Figura 69).



Fig. 68: Llenado de los moldes de hormigón autocompactante



Fig. 69: Llenado de los moldes de hormigón vibrado

En cuanto al hormigón vibrado, es posible que en las primeras tongadas la energía suministrada sea mayor que en las de la segunda capa pues, al vibrar estas últimas, el molde vuelve a transmitir cierta vibración a las primeras. Ha

sido un hecho inevitable que en la obra quizás no sería tan significativo ya que las cantidades de hormigón suelen ser mucho mayores.

Para no afectar a las probetas una vez llenas, el hormigonado se realiza en el mismo sitio donde los moldes van a permanecer inmóviles durante 24 horas, evitando para el caso del autocompactante, que se produzcan alteraciones con el movimiento.

Después de permanecer sumergidas durante 7 días en agua y en unas piscinas confeccionadas para ello, se completa el curado de estas probetas en el exterior para tratar de reproducir situaciones habituales en obra (Figuras 70, 71).



Fig. 70: *Piscina de curado*



Fig. 71: *Exposición de las probetas al ambiente externo*

Si con este sistema de confección se produjese una segregación o exudación se manifestaría más o menos acusada en función de la altura. Por ello, se han seleccionado para estudiar estas posibles diferencias las zonas superior, baja y central de las probetas tomando segmentos de unos 20 cm de longitud de las zonas mencionadas, una vez descartado 1 cm de la parte superior al considerarlo poco representativo al haberse podido alterar especialmente por secado u otras causas. A esos trozos de 20 cm, se les han hecho unos cortes centrales extrayendo una lámina de 1 cm de espesor que posteriormente servirá para distintos ensayos, figura 72.



Fig. 72: *Preparado de las probetas para su estudio*

En la Figura 73, puede verse el esquema de confección de las probetas.

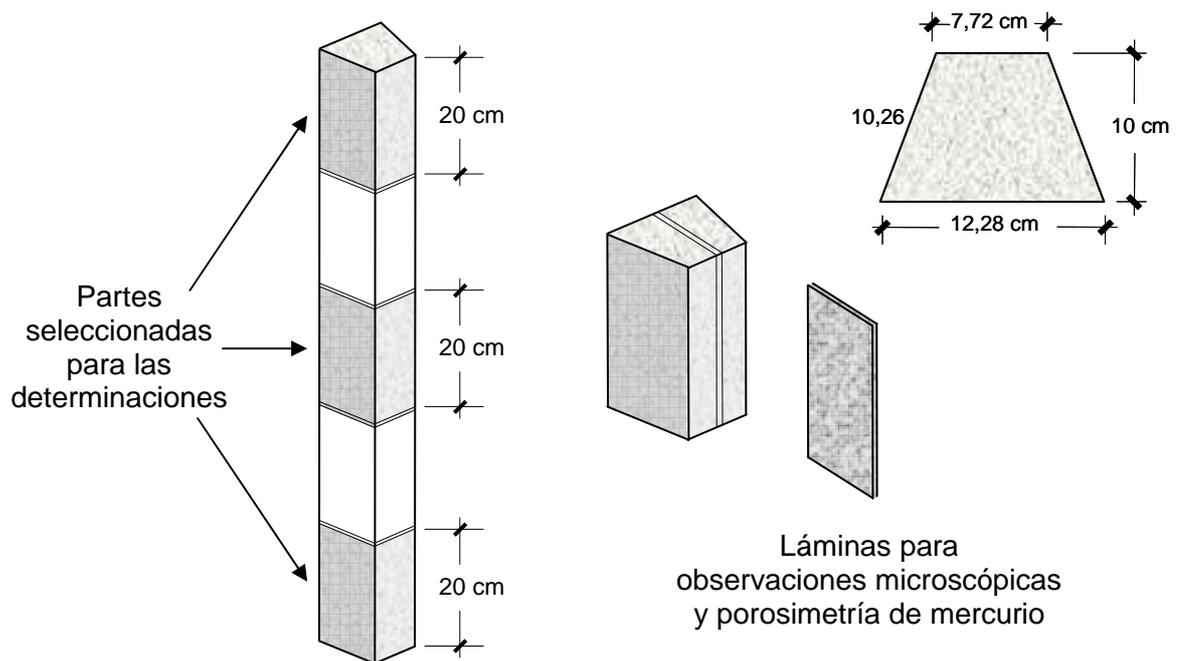


Fig. 73: Esquema de las probetas específicas elaboradas para el estudio

3.2. DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD

La porosidad juega un papel fundamental en la durabilidad, ya que a través de ella se producen los fenómenos que afectan a su vida útil, por tanto, en este trabajo se hace imprescindible su determinación.

El hormigón tiene un sistema de poros internos y espacios vacíos más o menos comunicados entre sí; su tamaño, proporción y continuidad hacen que sea permeable a gases, líquidos y con ellos a ciertas sustancias disueltas en el agua como los sulfatos.

3.2.1. POROSIDAD

Se considera porosidad total a la relación del volumen de poros referido al volumen total del material, incluyendo tanto los poros accesibles como los no accesibles al agua. Puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$P = V_p / V_s \times 100$$

donde, P es la porosidad total, V_p es el volumen total de poros respecto al volumen, y V_s es el volumen total del material.

Para la determinación de esta porosidad se hace necesario calcular las densidades, tanto real como aparente, de los hormigones estudiados. Relacionando ambos parámetros, podemos conocer la porosidad o proporción de huecos a través de la fórmula:

$$P = 1 - D_{ap} / D_{real}$$

donde, P es la porosidad, D_{ap} es la densidad aparente, y D_{real} es la densidad real.

En cada una de las partes escogidas (altas, medias y bajas), se calcularon la porosidad y la absorción por inmersión en agua, con el fin de obtener una idea tanto del volumen de vacíos existentes en nuestros hormigones, como del volumen de poros accesibles.

3.2.1.1. Determinación de la densidad real

Se entiende por densidad real el peso por unidad de volumen de sólido. Depende de la proporción en que participan cada uno de los diferentes materiales constituyentes del hormigón, es decir, se trata de cuantificar la densidad del conjunto de las partes sólidas de los componentes del hormigón.

Al carecer de una norma específica para la determinación de la densidad real del hormigón, se realiza mediante picnómetro, siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 1097-7:2000 “Determinación de la densidad real del filler”, ya que el hormigón fue molturado previamente hasta adquirir las características de un filler.

Este método de ensayo se basa en la sustitución de un líquido de densidad conocida por la muestra de ensayo pudiendo determinar así el volumen desplazado por ésta. El volumen se determina dividiendo la masa del líquido desalojado por su densidad.

Para ello se trocearon y molieron probetas cúbicas sobre las que se determinó su resistencia con anterioridad, a fin de obtener una cantidad de muestra inicial significativa suficiente, dada la heterogeneidad en la composición del hormigón (Figura 74).

La reducción de la muestra se realizó mediante cuarteos sucesivos para mantener la representatividad.

El proceso de molturación se inicia con el destrozo de las probetas y la trituración de los trozos en una machacadora de mandíbulas (Figura 75), para terminar molturando una porción de este material en un molino de ágata (Figura 76).



Fig. 74: Rotura de probeta cúbica antes de la molturación final



Fig. 76: Molturación de las muestras en un molino de ágata



Fig. 75: Machacadora de mandíbulas donde se realizó la trituration inicial de la muestra

Este molido continuó hasta que la totalidad de la muestra seleccionada se hizo pasar por el tamiz antes referido, UNE 0,125, para que tanto el material más blando como el de mayor dureza estuviesen representados.

Después del desecado en estufa y enfriado en un desecador, mediante el proceso de reducción por cuarteo mencionado, se tomaron las cantidades necesarias, entre 30 y 40 gramos, para la realización de los ensayos en los picnómetros previamente tarados (Figura 77).

El procedimiento operatorio se inició realizando todas las pesadas. Se pesa el picnómetro limpio y seco con su tapón (m_0). Se pesa el picnómetro con la muestra (m_1). Se añade agua hasta cubrir la muestra de ensayo.

Se coloca el tapón en el picnómetro y se introduce en el desecador (Figura 78), haciendo el vacío durante cinco minutos, hasta obtener una depresión de 3 kPa. Se deja el picnómetro en el desecador de vacío a esta misma presión durante 30 minutos.



Fig. 77: Muestras molidas en molino de ágata y picnómetros usados



Fig. 78: Proceso de vacío de los picnómetro

Seguidamente, se restaura la presión ambiental, se extrae el picnómetro y se termina de llenar con agua, se deja hasta que la temperatura se estabiliza a 20 °C. Después se coloca el tapón provocando que el agua salga por el tubo capilar, quedándose esta forma perfectamente enrasado.

Se seca la parte exterior y se vuelve a pesar, obteniendo con ello la masa total del picnómetro conteniendo la submuestra de ensayo y el líquido (m_2).



Fig. 79: Submuestras molidas y picnómetros con las muestras ensayadas

Los resultados de la densidad real D_{real} se obtiene a través de la expresión:

$$D_{real} = [(m_1 - m_0) / V - [(m_2 - m_1) / \gamma_a]$$

siendo, V el volumen del picnómetro y γ_a la densidad del agua.

La densidad real será la media aritmética de los dos valores obtenidos para cada una de las submuestras.

En los ensayos realizados en laboratorio se usaron dos picnómetros con características diferentes, los cuales se calibraron previamente (Tabla 18).

DESIGNACIÓN	PESO (m_0) (g)	VOLUMEN (cm^3)
Picnómetro 1	46,88	54,61
Picnómetro 2	33,26	57,53

Tabla 18: Características correspondientes al tarado de los picnómetros

3.2.1.2. Determinación de la densidad aparente

La densidad aparente es la relación entre la masa del material seco y el volumen total de una muestra.

Para su determinación se utilizó la norma “Ensayos de hormigón endurecido. Densidad del hormigón endurecido”, UNE-EN 12390-7, en la que se describe el método para calcular la densidad del hormigón endurecido, conociendo la masa y el volumen de las probetas, mediante el método de la balanza hidrostática, basada en el Principio de Arquímedes (Figura 81).

La densidad aparente se determinó por duplicado de cada una de las partes elegidas de las probetas prismáticas de 1 metro de altura.

El procedimiento para calcular el volumen se basó en determinar la masa de la probeta bajo dos condiciones: saturada en agua y secada en estufa. Para conseguir el estado de saturación, las probetas se sumergieron en agua a 20 ± 2 °C hasta que la variación de peso transcurridas 24 horas de inmersión fue inferior al 0,2 % (Figura 80). El valor de la masa de la probeta saturada en agua (m_s), se obtuvo secando la superficie de las probetas con un paño húmedo antes de cada pesada.



Fig. 80: *Probetas sumergidas en agua para su saturación*

El volumen de la probeta se calcula mediante la fórmula:

$$V = (m_a - m_w) / \gamma_a$$

donde

V es el volumen de la probeta

m_a es la masa de la probeta al aire

m_w es la masa aparente de la probeta sumergida

γ_a es la densidad del agua a 20 °C



Fig. 81: *Proceso para obtener la masa de la probeta sumergida y saturada en agua mediante balanza hidrostática para la determinación de la densidad*

A continuación se pesa la muestra seca. Para ello se introduce la muestra en estufa a (105±5) °C hasta que la variación de peso transcurridas 24 horas resulta inferior al 0,2 %. Antes de cada medida, se deja enfriar la probeta hasta temperatura ambiente en un recipiente hermético seco o en un desecador. Se determina el valor de la masa de la probeta desecada en estufa (m).

Como resultado del ensayo la densidad se calcula usando el valor determinado para la masa de la probeta y su volumen, usando la fórmula:

$$D = m / V$$

donde

D es la densidad respecto a las condiciones de la probeta
m es la masa de la probeta desecada en estufa
V es el volumen determinado

3.2.2. DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN

La absorción puede considerarse relacionada con la porosidad accesible y, por tanto, es un factor clave en la durabilidad del hormigón. La absorción del hormigón curado depende de la absorción de cada componente del hormigón, así como del proceso de fabricación, especialmente el curado y, sobre todo, de la relación A/C y dependerá también de la exudación.

Para evaluar este parámetro se saturaron las muestras en agua como ya se ha descrito con anterioridad y, una vez alcanzado un peso constante, se procedió al pesado de las mismas. A continuación se secaron en estufa a 100 °C, durante 24 horas hasta alcanzar el peso constante (Figura 82) y se anotaron dichas lecturas como peso seco.



Fig. 82: Muestras preparadas para su secado en estufa

La diferencia de pesos seco y saturado sumergido referido al primero, expresa la capacidad de absorción:

$$AB = (m_{\text{sat}} - m_{\text{seco}}) / m_{\text{seco}}$$

Los resultados de absorción se presentan en la Tablas 31 y 32 del siguiente capítulo, para los dos tipos de hormigón.

3.2.3. OBSERVACIONES MICROSCÓPICAS

Con el fin de intentar apreciar los fenómenos de exudación, se observaron en el microscopio láminas de los hormigones confeccionados extraídas de las partes altas, medias y bajas.

Se intentó observarlas con un microscopio metalográfico por disponer de hasta 500 aumentos pero pronto se descartó al no poder disponer de con capacidad de reflejar bien el haz de luz. Al intentar pulirlas más, los productos originados por la abrasión parecían colmatar los contornos del árido, enmascarando las zonas de contacto de éste con la pasta.

Se utilizó, entonces, un microscopio de la marca Olympus SZ61, de 80 aumentos con cámara fotográfica incorporada (Figura 83).

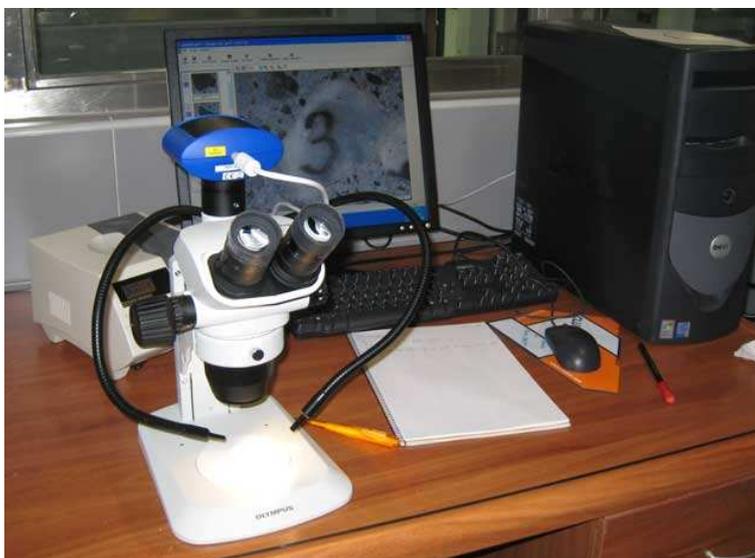


Fig. 83: *Equipo para las observaciones microscópicas*

Para preparar las muestras, se procedió a coger unos trozos de lámina de las zonas superiores de las piezas elaboradas, ya que, de presentarse la exudación, en éstas sería de forma más significativa y con mayor probabilidad (Figura 84).

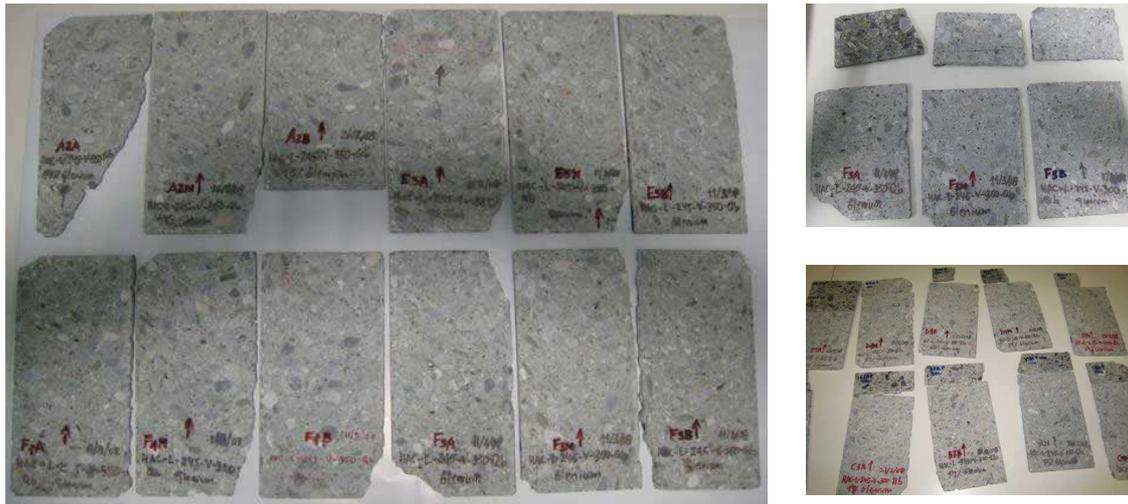


Fig. 84: Láminas y fragmentos para las observaciones microscópicas

En un intento de resaltar las zonas de transición pasta-árido y distinguirlas con mayor facilidad se pulieron las muestras y después se lavaron para eliminar el material que se hubiera podido introducir en las oquedades.

Aunque mejoró la información extraída de las distintas observaciones siguió siendo bastante confusa. Por ello, se procedió a colorear las muestras, previamente pulidas, en unos casos con una disolución alcohólica de fenolftaleína (Figura 85) y en otros con colorantes, como los líquidos penetrantes utilizados en las técnicas de soldadura (Figura 86), con disolución de azul de metileno (Figura 87), e incluso, se impregnaron con resinas en vacío.

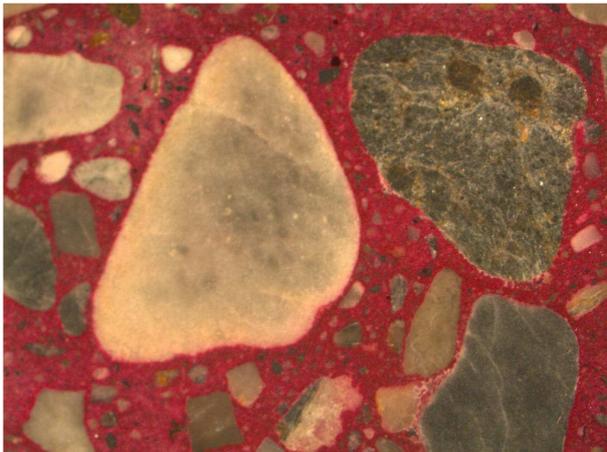


Fig. 85: Muestra coloreada con fenolftaleína

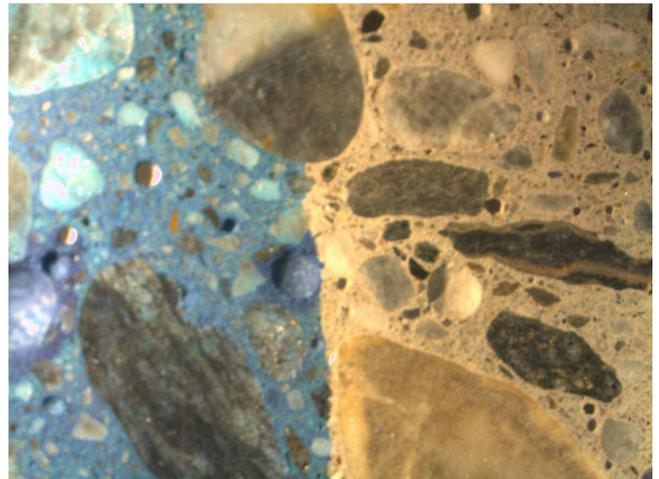


Fig. 86: Muestra coloreada con azul de metileno

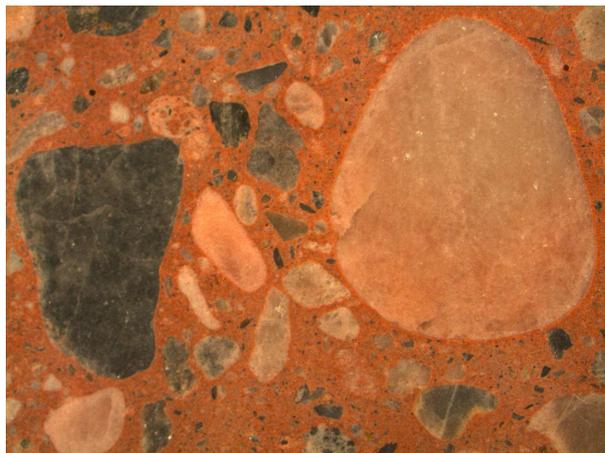


Fig. 87: *Muestra coloreada con líquido penetrante*

Estimando que la zona de transición, por tener una mayor concentración de fases cristalinas-alcálinas, sería más sensible al ataque con los ácidos que el resto, se atacaron las muestras con una disolución diluida de un ácido débil, en concreto de ácido cítrico (Figura 88). Al atacar un poco la superficie de las láminas permitió apreciar mejor defectos acumulados bajo la superficie de los áridos. Con esta técnica sí se pudieron apreciar algunas diferencias en la zona de transición pasta-árido.

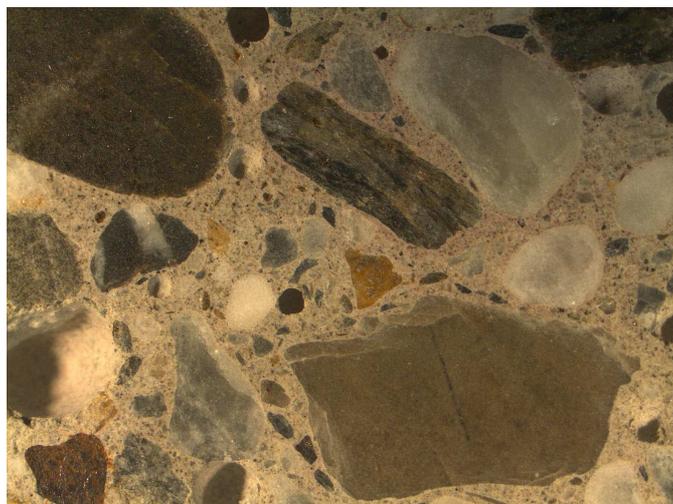


Fig. 88: *Muestra pulida y atacada con ácido cítrico*

3.2.4 POROSIMETRÍA DE MERCURIO

Entre las técnicas más utilizadas para medir la porosidad de un material, se pueden citar: las técnicas de observación directa, por ejemplo la microscopía óptica y electrónica; y técnicas indirectas, en las cuales se determina la distribución y el tamaño de poros a partir de una variable, como pueden ser, las medidas de ondas acústicas, el análisis de imagen acoplado a un microscopio electrónico, porosimetría de mercurio y adsorción de gases.

Para el estudio de la porosidad capilar en este trabajo se ha utilizado el método de ensayo indirecto denominado porosimetría por inyección de mercurio (MIP) que se fundamenta en la presión necesaria que hay que ejercer para que el mercurio penetre, dada la alta tensión superficial que posee y dadas sus propiedades no humectantes hacia el hormigón, debido a que su ángulo de contacto es mayor de 90° [49], según se aprecia en el esquema de la Figura 89.

Es decir, la oposición que ejerce este líquido al entrar en contacto con el sólido es tan grande que no permite reacción alguna entre ellos, produciendo capilaridad negativa, al no mojar a los sólidos y precisando una presión P para su introducción, que será inversamente proporcional al radio r de los capilares:

$$P \cdot r = 2 \sigma \cos \alpha$$

Expresión conocida como ecuación de Washburn.

donde,

σ es la tensión superficial del mercurio, y
 α el ángulo de contacto sólido-líquido.

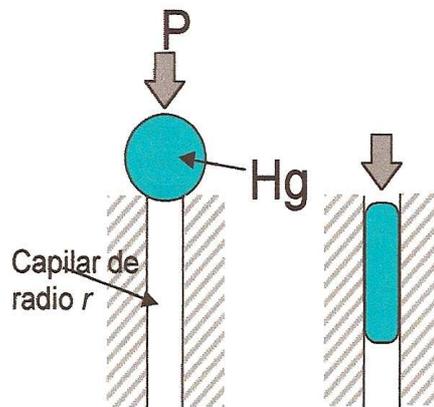


Figura 89: Presión necesaria para producir la penetración del mercurio.

Asumiendo la constancia de σ y α , el producto de la presión por el radio permanece constante, lo que significa que al ir aumentando progresivamente la presión el mercurio irá penetrando en poros cada vez más angostos.

Dado que en el caso del mercurio, $\alpha = 140^\circ$ y $\sigma = 480 \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}$, a temperaturas medias la ecuación de Washburn se transforma en:

$$r = 1530 / P$$

donde, el radio de los capilares r viene expresado en μm y P en kg/cm^2 [81].

En definitiva, el ensayo porosimétrico consiste en inyectar mercurio a presión y registrar el volumen de mercurio absorbido. Para cada intervalo de presión considerado, el volumen de mercurio absorbido nos indica el volumen de poros de la muestra hasta un determinado intervalo de tamaño.

La técnica de porosimetría de mercurio nos ha permitido estudiar la macro y mesoporosidad de las muestras ya que el umbral de presión que puede ejercerse es de $4218 \text{ kg}/\text{cm}^2$ (60000 psi) que suele ser el límite máximo de presión que alcanzan los porosímetros más avanzados permitiendo que el mercurio penetre en capilares hasta un radio igual a 2 nm [81].

El equipo donde se realizaron los ensayos es un porosímetro de la marca Micromeritics y consta de dos unidades independientes, como puede apreciarse en la figura 90, así como de un ordenador para la recogida y tratamiento de los datos suministrados por ambas unidades de forma integrada.



Figura 90: Porosímetro de mercurio utilizado en las determinaciones.

El procedimiento de ensayo comienza con un proceso de secado suave, para no alterar demasiado la muestra induciendo una retracción forzada al reducir el agua adsorbida mediante un secado enérgico sin llegar a producir microfisuras por retracción. Se optó por efectuar el secado a 60°C en lugar de a $105\text{-}110^\circ \text{C}$, como es lo habitual en los laboratorios para la eliminación del agua. Según la bibliografía consultada [18], parece ser que el aumento de la temperatura de secado conduce a distribuciones de tamaño de poro con diámetros mayores, perdiéndose la porosidad en las zonas de diámetros menores. Esto se debe al

daño microestructural que se produce, por un lado, la descomposición de los productos de hidratación y, por otro, el colapso de poros de diámetros pequeños, por las tensiones producidas durante el secado.

Una vez secada la muestra (Figura 91) e introducida en un contenedor de vidrio denominado penetrómetro (Figura 92), se coloca en la primera unidad del equipo que está conectada a una bomba de vacío con el fin de desgasificarla. Manteniendo la muestra bajo vacío, dicha unidad permite llenar el penetrómetro con mercurio y, seguidamente, determinar la macroporosidad (75 a 7,5 μm). En esta fase se trabajan y se obtienen los resultados conocidos como “a baja presión”.



Fig. 91: Secado de las muestras en estufa a 60°C



Fig. 92: Contenedor de vidrio (penetrómetro)

Después del pesado de la muestra para determinar la densidad aparente y la macroporosidad, se introduce el penetrómetro en la segunda unidad donde se trabaja a una presión mayor (“alta presión”).

Esta segunda unidad consta de dos partes: La unidad de presión constituida por un sistema diferencial de dos pistones cuya relación es 1: 100. El pistón de baja presión trabaja con un tipo de aceite y el de alta presión transfiere ésta al mercurio a través de otro tipo de aceite. La presión máxima que soporta la muestra es de 2000 kg/cm^2 . La unidad de medida del nivel de mercurio está formada por un autoclave donde se introduce el penetrómetro con la muestra en su interior. Cerrado herméticamente el autoclave y lleno de aceite, al incrementarse la presión se determina de forma automática el nivel que presenta el mercurio en el cuello calibrado del dilatómetro. Con cada incremento de presión se genera un descenso apreciable en el nivel de Hg, la bomba de presión se para, se mandan las correspondientes señales a los registros y, de forma automática, se pone de nuevo en marcha la bomba. El intervalo de presiones de trabajo se moverá para los tamaños explorados en un rango de 7 a 0.0037 μm .

Debido a las características del ensayo deberán tenerse en cuenta las siguientes consideraciones negativas:

- a) Básicamente sólo se consideran los poros abiertos, ya que tienen que ser accesibles al mercurio.
- b) Al asumir un modelo de poros cilíndricos se determina un tamaño aparente, que sería el de un poro ideal cilíndrico equivalente.
- c) Se trabaja con presiones elevadas, lo cual puede alterar la geometría del medio poroso, si bien no parecen verse muy afectados los materiales rocosos, los hormigones ni los morteros.
- d) El ensayo utiliza mercurio –material tóxico–, por lo que deben extremarse las normas de seguridad.
- e) Se trata de un ensayo irreversible, ya que una fracción del mercurio queda atrapada en el sistema poroso y éste ya no puede ensayarse de nuevo.

Cabe destacar en su favor:

- La rapidez con que puede llevarse a cabo el ensayo.
- La simplicidad en el análisis de los resultados.
- El amplio intervalo de tamaños analizados (4 ordenes de magnitud).
- La mayor significación de dichos resultados cuando se trabaja en términos relativos. Así, cuando se comparan materiales de la misma naturaleza, aunque la distribución de tamaños puede estar más o menos desplazada en valores absolutos, el resultado siempre es correcto en términos relativos.

Preparación de las muestras

Puesto que el objetivo del estudio era observar diferencias de porosidad que pudieran ser debidas a la puesta en obra entre las distintas partes de las piezas hormigonadas en los dos tipos de hormigones, para la determinación de la porosimetría se cortaron láminas de las partes medias, bajas y altas de las piezas de 1 metro de altura, tanto del hormigón autocompactante como del convencional. Posteriormente, se hizo una cuidadosa selección de las porciones para ensayo en estas láminas, buscando las zonas en las que los áridos gruesos presentaban una posición con su eje mayor horizontal respecto a la dirección vertical de hormigonado debiendo, por lo tanto, poseer una mayor superficie donde la posible de acumulación de agua por exudación podría haber sido más evidente, véanse las Figuras 93 y 94.

El procedimiento de preparación de las muestras continuó con el corte de las porciones seleccionadas para el ensayo mediante una cortadora de mano. A partir de estas porciones y gracias a una cortadora se obtuvieron las muestras adecuadas para el ensayo. El número de muestras seleccionado fue de dos en las láminas de las partes altas, una para las medias y otra para las láminas de las partes bajas de ambos hormigones. Una vez cortadas las porciones de muestras se secaron previamente, tal y como se ha indicado, en estufa a 60° hasta peso constante.



Fig. 93: Láminas con las muestra seleccionadas



Fig. 94: Detalle de las láminas

El peso aproximado de las muestras ha oscilado entre 1,5 y 2,5 gramos, sin poseer una forma ni un tamaño determinado ya que estos factores son poco relevantes para la obtención de los resultados. En la Figura 95 puede apreciarse el tamaño, forma y espesor de algunas de las muestras ensayadas.



Fig. 95: Peso y tamaño de distintas muestras ensayadas

Resultados obtenidos mediante la porosimetría por intrusión de mercurio

El ensayo porosimétrico suministra pares de valores (p, v), donde la presión "p" varía de 0 a 2.000 Kg/cm², y el descenso de nivel en el Hg "v" va de 0 hasta un máximo de 2.000 cm³.

Los valores más bajos de presión son corregidos de acuerdo con la presión real que soporta la muestra, consecuencia del peso de la columna de Hg presente. Una vez corregidos, dichos valores "p" se transforman en tamaños "r" de acuerdo con la ecuación de Washburn.

Los valores correspondientes al descenso en el nivel de Hg "v" deben corregirse de acuerdo con la compresibilidad de éste, para lo cual previamente se realiza un blanco de Hg. Una vez restado el blanco, dichos valores pueden expresarse como volumen poroso respecto al: a) volumen poroso total (%), b) volumen total de la muestra (%) o c) masa de la muestra (cm³/g).

A partir de dichos valores se obtiene la curva de distribución del volumen poroso en función del tamaño de acceso a los poros. Es decir, la curva volumen-presión obtenida puede ser convertida en una curva volumen frente al radio de poro, en volumen o área de poro frente a radio de poro, mediante la aplicación del modelo de Washburn, en el que se considera que los poros de forma cilíndrica se vacían completamente cuando la presión es reducida a cero.

Dicha distribución puede realizarse tanto para la primera como para la segunda inyección, obteniéndose en este último caso la distribución de la porosidad atrapada. En la Figura 96 se han representado dos curvas típicas de intrusión y extrusión en las que los valores correspondientes al descenso en el nivel de Hg no han sido corregidos. Al ser los ángulos de contacto del mercurio distintos para la intrusión y para la extrusión, las curvas no se ajustan convenientemente, es decir, por el efecto de histéresis las curvas no coinciden.

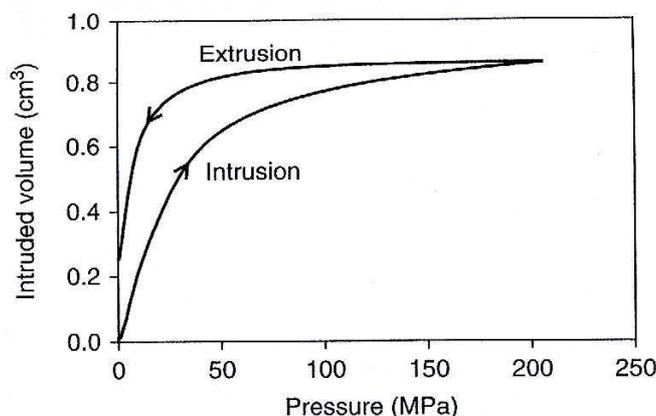


Figura 96: Curva o porograma de presión en el que se observa la porosidad atrapada [24].

Pero ha de tenerse en cuenta que el tamaño de poro medido no siempre es el real puesto que pueden existir "cuellos de botella" a las entradas de las cavidades porosas necesitando que la presión sea mayor para que el mercurio pueda acceder a ellas. Una vez rebasado este obstáculo, el llenado del poro se haría a una presión constante, resultando un registro erróneo, ya que se obtendría que el volumen de poros de radio menor es el volumen de poros (menor) más el volumen de poros que hay a continuación, siendo estos últimos de mayor tamaño [24] [27]. Por ello y por la compleja simetría del sistema poroso, es preferible representar el volumen de mercurio intruido en los poros de forma acumulada, es decir, comenzando con poros de diámetros mayores para continuar con los de menor tamaño, evitando así este tipo de errores y obteniendo un resultado como el que se muestra en la Figura 97.

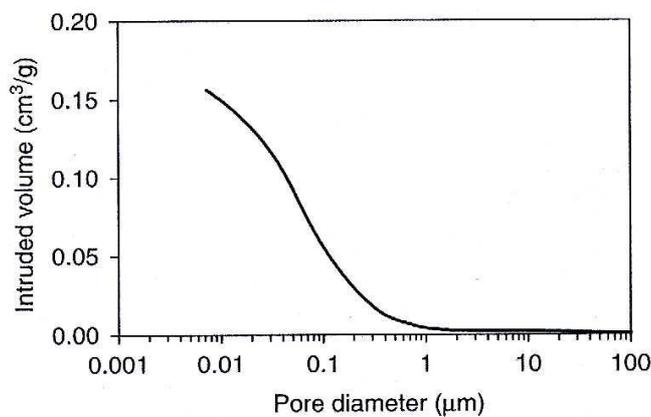


Figura 97: Curva o porograma de volumen acumulado [24].

De esta curva de porosidad acumulada se extraen datos referentes a la porosidad total, al tamaño de poro crítico y al diámetro de poros umbral (Figura 98).

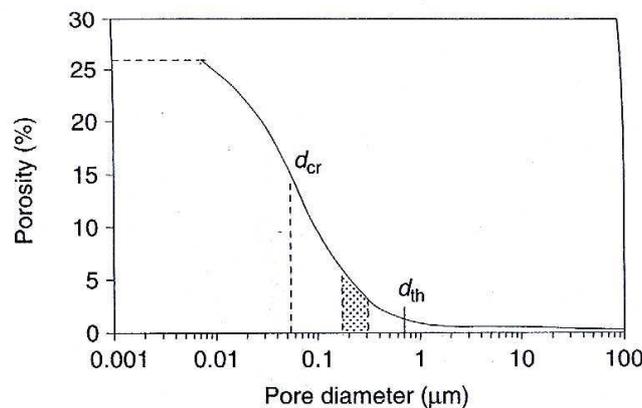


Figura 98: Distribución de tamaño de poro, donde se observa la porosidad total y los diámetros umbral y crítico [24].

La porosidad total se obtiene con el punto correspondiente a la más alta presión y el menor radio de poro en la curva de porosidad acumulada. El tamaño

de poro crítico (diámetro crítico, d_{cr}), corresponde al punto donde la pendiente de la curva es más alta para el mismo gráfico. Los diámetros umbrales (d_{th}) se observan en toda la distribución de tamaño de poro, siendo aquellos en el que después de una pequeña intrusión de mercurio se produce de forma inmediata un incremento brusco en el volumen intruido, es decir, es el diámetro de poro más grande para el que se detecta un volumen significativo de intrusión [27].

En las determinaciones que realizamos las muestras la porosidad total no fue un parámetro muy significativo, ya que al seleccionarlas, sólo interesa la zona de transición pasta-árido de la parte inferior del árido, prescindiendo de la proporción de árido-pasta, que es muy variable por lo reducido de la muestra y por la gran heterogeneidad del hormigón.

Las curvas porosimétricas obtenidas tras el ensayo, además de su valor cuantitativo como curvas de distribución, también pueden actuar como una radiografía o huella dactilar del sistema poroso, siendo denominadas por algunos autores como "espectro de la porosidad".

El denominado "espectro de porosidad" es la curva correspondiente al incremento diferencial de volumen de mercurio intruido (Figura 99). En él se puede distinguir el abanico existente de tamaños de poro, siendo bastante representativo cuando existen diferentes tamaños y pudiendo también estimar el volumen de poros para un rango determinado mediante el área situada por debajo de la curva [27].

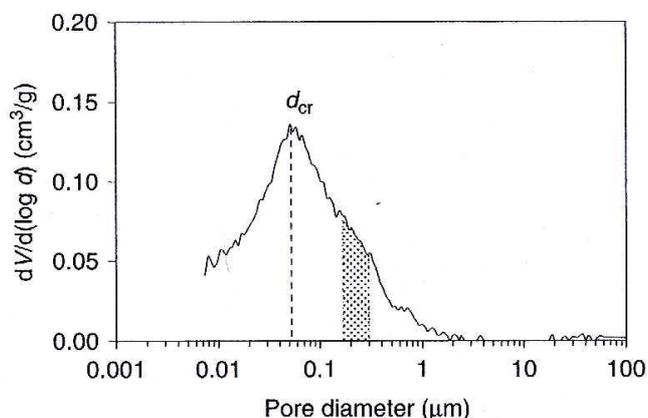


Figura 99: Distribución diferencial del tamaño de poro o espectro de porosidad [24].

Comparando las curvas de distribución o porogramas con las del espectro de porosidad y asociando los resultados obtenidos, se pueden observar de forma más clara los parámetros anteriormente indicados (porosidad total, diámetro crítico y diámetro umbral) y, así, hacer posible una mejor interpretación de los mismos.

Estas dos curvas, el porograma y el espectro de porosidad, han sido las utilizadas en este estudio, ya que son las que mejor han representado los

resultados obtenidos en el ensayo, dando una idea de la distribución, el tamaño y la proporción de poros a lo largo de las probetas de un metro de altura.

3.3. ATAQUE POR SULFATOS

Como ya se ha expuesto anteriormente el principal efecto de los sulfatos es una expansión interna debida a la creación de unos compuestos resultantes de la interacción de los sulfatos con ciertos componentes del clinker en presencia de carbonatos y agua: ettringita y la taumasita. Estos pueden llegar a fisurar la pasta cementicia del hormigón, con todas las consecuencias y peligros que esto acarrea (pérdida de la capacidad resistente, exposición de las armaduras, favorecer el posterior ataque de otras sustancias, etc.).

Las aportaciones de sulfatos pueden ser de varios tipos pero la más simple, la que se encuentra en mayor cantidad en la naturaleza que nos podría afectar en nuestras construcciones en la capital de Granada y alrededores, es el sulfato de calcio dihidratado; más comúnmente conocido como yeso. Éste es el que se ha considerado en el estudio.

El seguimiento de la durabilidad frente a esta sustancia se ha realizado mediante dos técnicas: la velocidad de propagación de ultrasonidos y la difracción de rayos X.

3.3.1. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO DE DURABILIDAD

El estudio de durabilidad se ha llevado a cabo sometiendo unas probetas, tomadas de las confeccionadas inicialmente, al efecto de agua saturada de yeso en condiciones de inmersión parcial.

Para la preparación de las muestras objeto de ensayo, se cortaron trozos de 20 cm de las distintas zonas (altas, medias y bajas) de las probetas confeccionadas inicialmente (prismáticas trapeciales de 1 m de altura). Se seleccionaron dos de HAC y dos de HV cortándolas en sus partes altas, medias y bajas.

Se cubrieron sus caras cortadas con una pintura impermeable para así evitar un ataque directo por la zona seccionada (Figura 100), y se introdujeron en una pequeña piscina, que contenía una pasta formada por arena, yeso y agua (Figura 101). Las probetas se colocaron en posición horizontal, procurando que una parte de la probeta sobresaliera del nivel de la mezcla, a fin de que se asemejara al caso de estructuras semienterradas, como son algunas cimentaciones. Se han mantenido en esas condiciones durante 6 meses, controlando el nivel del agua, para que siempre estuviese a la misma altura. Dicha piscina se emplazó en el laboratorio, a una temperatura media en torno a

20 °C, puesto que el período de ensayo se extendió entre los meses de mayo y octubre de 2008.



Fig. 100: Preparación de las probetas



Fig. 101: Preparación del medio de ataque y piscina

Transcurridos los seis meses, se sacaron las probetas de la piscina, se ensayaron con ultrasonidos y se cortaron rebanadas para observación y difracción de rayos X. De nuevo, los trozos restantes se volvieron a colocar en la piscina, para continuar con el estudio a plazos mayores, pintando previamente las caras seccionadas.



Fig. 102: Colocación de las muestras en el medio de ataque. Izquierda, durante los primeros seis meses. Derecha, probetas para el estudio a plazos mayores.

3.3.2. ENSAYO CON ULTRASONIDOS

El seguimiento del comportamiento de las probetas sometidas al ambiente con sulfatos se ha llevado a cabo en un primer paso mediante la velocidad de propagación de ultrasonidos. Como se sabe, la velocidad con la que se propaga esta radiación depende de la compacidad del material a través de su módulo elástico, el cual se ve afectado por cualquier deterioro producido en la masa del hormigón. Se pretendía, por tanto, evaluar los daños que pudieran sufrir las probetas mediante el cambio de la velocidad de transmisión de los ultrasonidos.

En efecto, para el hormigón endurecido, las variaciones de dicha velocidad están relacionadas con los cambios de cavidades, estructura de poros, fisuras y microfisuras en el material de ensayo. No habría que haber olvidado, por tanto, que durante el progreso de toda la hidratación del cemento la velocidad de los ultrasonidos se incrementa al ir disminuyendo la proporción de poros capilares.

El principio de funcionamiento de esta técnica consiste en enviar unas ondas de alta frecuencia a través de un cierto espesor de hormigón, mediante un transductor electro-acústico (palpador emisor), y registrar el tiempo tarda en atravesarlo, mediante otro transductor, en este caso un palpador receptor. Un circuito electrónico mide el tiempo de tránsito, con el que se determina la velocidad de propagación del impulso ultrasónico.

En el estudio se empleó un equipo de la marca CONTROLS (Modelo 58-E0048) (Figura 103), que trabaja con una frecuencia de 54 kHz. La precisión de las lecturas fue de 0,1 μ s.

La norma seguida para esta determinación ha sido la UNE-EN 12504-4: “Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de impulsos ultrasónicos”.

Para transmisiones directas, la velocidad del impulso se calcula mediante la fórmula:

$$V = \frac{L}{T}$$

donde

V es la velocidad del impulso

L es el espesor de hormigón que atraviesa

T es el tiempo que tarda el impulso en su recorrido

A fin de conseguir que las medidas fuesen fiables y reproducibles hubo que tener en cuenta diversos aspectos. Uno de ellos fue la fijación precisa de la posición de los palpadores para las medidas, ya que puede cambiar sensiblemente el valor de la velocidad al variar la posición del palpador en la pieza. Para ello se optó por dibujar en las caras de las probetas unos círculos con el diámetro del

palpador, a fin de asegurar siempre la medida en los mismos puntos (Figura 104). Se tuvo cuidado de tomar como tiempo de propagación el menor de los valores observados en una misma posición al enfrentar los palpadores ya que cualquier otro valor podría ser debido a un defectuoso acoplamiento del palpador con la superficie del hormigón.



Fig. 103: *Equipo de ultrasonidos*



Fig. 104: *Señalización de los puntos donde se realizaron las medidas*

Al principio se pensó en hacer medidas en las direcciones longitudinales y en las transversales de las probetas, pero posteriormente se desestimó hacerlas en las transversales debido a que para llevar a cabo las medidas hay que utilizar una grasa o gel que asegure la transferencia de los impulsos entre los palpadores y las caras de las probetas. Se consideró que esta grasa podría alterar el estado de la superficie del hormigón y, con ello, afectar el comportamiento frente al ataque por los sulfatos y, por tanto, se pensó que era mejor no hacerlas.

Las medidas iniciales se tomaron en mayo de 2008, antes de ser introducidas las probetas en la disolución saturada de yeso. Transcurridos 6 meses, establecidos como período inicial de ensayo, se extrajeron de la piscina y, tras permanecer varios días en el ambiente del laboratorio con objeto de que se secaran, se midió nuevamente la velocidad de los ultrasonidos (en noviembre de 2008), siguiendo el mismo procedimiento indicado.

Realizadas estas medidas finales con el equipo de ultrasonidos, de las probetas se cortaron rebanadas de 2 cm de espesor (figura 105) para observaciones microscópicas y para el estudio por difracción de R-X.

Los trozos restantes de las probetas, ya de una longitud de unos 14 cm, se introdujeron de nuevo en la piscina de ensayo (figura 101 dcha) tras el correspondiente pintados de las caras seccionadas y la realización de una nueva medida con ultrasonidos.



Fig. 105: Corte de rebanadas de las probetas tras haber estado sometidas al ataque con yeso durante 6 meses

3.3.3. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Para identificar de forma eficiente la formación de sustancias destructivas para el hormigón, como la ettringita o la taumasita, hay que recurrir a la difracción de R-X. Se ha procedido, por tanto, a tomar muestras de distintas partes de las rebanadas de las probetas (figura 106) para conocer en qué zonas se han podido formar las estructuras mencionadas.

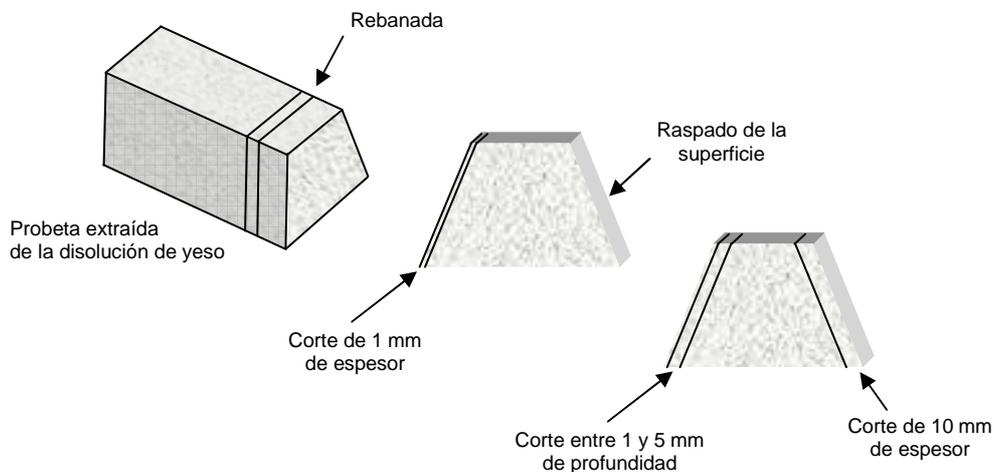


Fig. 106: Partes de las rebanadas de donde se tomaron muestras para difracción de R-X y observaciones microscópicas

Por un lado, se raspó una de las superficies de la probeta que había estado en contacto con la disolución saturada de yeso (figura 107) a fin de intentar conocer la naturaleza de la capa superficial que se podía haber formado, especialmente en la probeta del hormigón autocompactante (véase la figura 105).

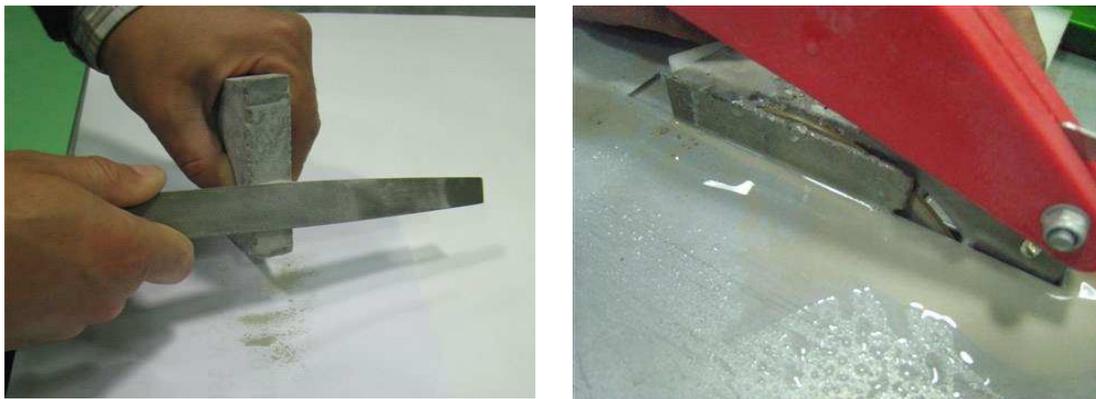


Fig. 107: Raspado de la superficie y corte de una lámina de 1 mm de profundidad de una de las 12 rebanadas sometidas a estudio

Se cortaron también capas superficiales de 1 mm de espesor (figura 107) y a la profundidad comprendida entre 1 y 5 mm con objeto de observar hasta donde podría haber penetrado la formación de ettringita-taumasita. Para contrastar los diagramas con el del material no atacado, se tomaron muestras de la parte central de las rebanadas, una por cada tipo de hormigón, pues se estimó que en el plazo de permanencia de las probetas en el medio era totalmente improbable que se hubiera formado ettringita o taumasita a una profundidad de unos 40 mm por ataque de la disolución saturada de yeso.

El material de estas partes seleccionadas se desmenuzó para intentar eliminar la mayor parte del árido contenido en el mismo y de esa forma favorecer la sensibilidad del procedimiento. Posteriormente, el material enriquecido en pasta de cemento se trituroó hasta que pasara por el tamiz de 0,063 mm a fin de obtenerlo en la forma conveniente para la realización del diagrama de polvo. El conjunto de muestras sometidas al ensayo de difracción de R-X (figura 108) se indica en la tabla 19.



Fig. 108: Equipo de difracción de Rayos-X donde se realizaron los diagramas de polvo de las muestras

<i>Identificación</i>		<i>Cantidades obtenidas de muestras trituradas (g)</i>			
		<i>Raspado</i>	<i>Capa exterior de 1 mm</i>	<i>Franja entre 1 y 5 mm</i>	<i>Zona central</i>
<i>Probeta</i>	<i>Parte</i>				
HAC-E1	ALTA		1,95		11,47
	MEDIA		4,65		
	BAJA		0,90		
HAC-E2	ALTA	0,36		4,51	
	MEDIA			5,09	
	BAJA			5,74	
HV-3	ALTA	0,59	3,31		
	MEDIA		1,98		
	BAJA		0,71		
H V-5	ALTA			8,90	11,82
	MEDIA			5,37	
	BAJA			7,26	

Tabla 19: Muestras y cantidades obtenidas para el ensayo de difracción de Rayos X

3.3.4. OBSERVACIONES MICROSCÓPICAS

Por último, se cortaron también unos trozos de las rodajas para realizar algunas preparaciones microscópicas con la lupa binocular del laboratorio (véase el apartado 3.2.3) con el fin de observar con ciertos aumentos el aspecto de la superficie de hormigón para ver con qué grado ha podido afectar la disolución saturada de yeso a las distintas probetas de ensayo.

Los trozos de hormigón se embutieron en resina y de cortaron con una microcortadora de precisión que permitió obtener una sección sin descascarillamiento en donde poder apreciar la capa que había permanecido en contacto con el medio agresivo (Figura 109).



Fig. 109: Trozos de hormigón embutidos en resina para observar una sección de la superficie sometida al efecto de la disolución de yeso