

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS DE ENSAYO

En el presente capítulo, se describen las metodologías de ensayo de la línea experimental correspondiente a la durabilidad del hormigón reciclado, que comprende la determinación de la porosidad, medidas de resistencia a la penetración de agua y permeabilidad a gases, la caracterización mecánica y el estudio del comportamiento frente a esfuerzos de fatiga.

El estudio experimental implica la ejecución de un ambicioso programa de ensayos, empezando por la caracterización individual de los principales componentes del hormigón reciclado: el cemento, el árido natural y el árido reciclado. Seguidamente, en una segunda etapa, se ejecutan ensayos de caracterización del hormigón reciclado atendiendo a sus propiedades físicas (densidad, porosidad y absorción), durabilidad y propiedades mecánicas, dinámicas y estáticas, para las dosificaciones propuestas.

En lo que sigue, se describen con detalle los protocolos y procedimientos operativos experimentales, estandarizados y propuestos, seguidos en la ejecución de los

ensayos de laboratorio llevados a cabo para la caracterización de los materiales y mezclas empleadas en el desarrollo de esta investigación.

2.1. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO

Dentro de los componentes del hormigón en general, y del hormigón reciclado en particular, el de mayor importancia es el cemento. El cemento es el material aglutinante que mantiene la solidez de los morteros y los hormigones que se fabrican con él. Se trata, como es bien sabido, de un material hidráulico pues, en presencia de agua, sus componentes se transforman en otros que forman estructuras cristalinas rígidas e interconectadas entre sí. En el transcurso de la investigación, se han empleado dos tipos de cemento. En las fases primera y segunda, se utilizó un CEM I 42,5 R/SR. En la tercera fase, se utilizó un cemento con una clasificación resistente mayor que el anterior, un CEM I 52,5 N/SR.

La evolución temporal del aglutinante de clínker Portland es ampliamente conocida. El número de estudios realizados en cuanto a la caracterización de este cemento supera muy ampliamente el de cualquier otro. En general, este hecho facilita, en muchos aspectos, el entendimiento de los resultados que se derivan de los análisis de los hormigones con incorporación de áridos reciclados.

2.1.1. Densidad real del cemento

En el caso que nos ocupa, el cemento se presenta lo suficientemente fino como para poder considerar la porosidad del material despreciable y asemejar el volumen relativo del sólido al volumen real. Para la ejecución de este ensayo se han seguido las especificaciones recogidas en la norma UNE 80103:1986 [106]

La densidad real, viene definida como la relación existente entre el peso de una muestra de cemento seco y el volumen real o de la parte sólida del mismo, es decir, excluyendo, si los tuviera, los poros accesibles y los inaccesibles. La determinación de la densidad real se realiza mediante un picnómetro, tal y como se describe a continuación.

Operativamente, para el caso del cemento, se pesa una cantidad de muestra en un papel limpio (P_i) y, seguidamente, se vierte éste en un matraz de Le Chatelier un líquido no reactivo, Fig. 16, hasta una altura cualquiera de la escala inferior del cuello del matraz y se anota el volumen alcanzado (V_i).

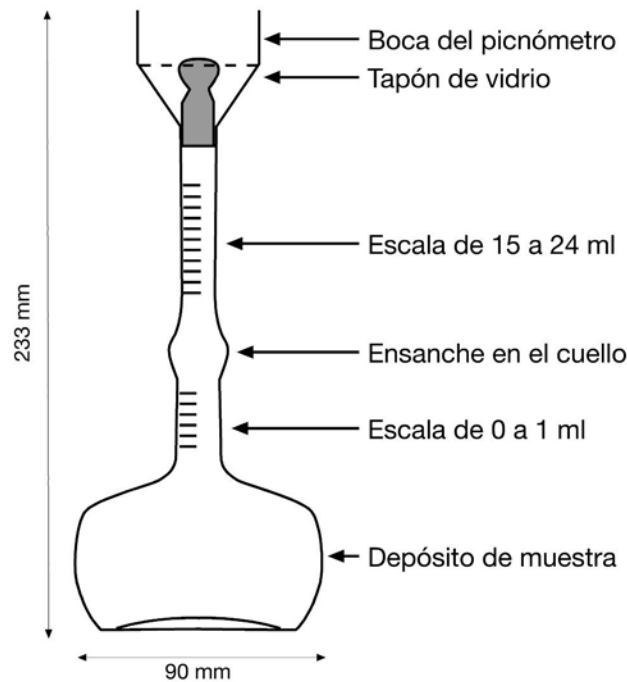


Fig. 16. Esquema del matraz de Le Chatelier (250 ml) para la determinación de densidades reales de materiales granulares.

Se va introduciendo, con ayuda de una varilla helicoidal, una parte del cemento pesado anteriormente hasta lograr que el líquido, superando el ensanche del matraz, alcance una altura cualquiera de la escala superior de su cuello y anotando el volumen (V_2) correspondiente. Se pesa, junto con papel limpio, el material sólido sobrante (P_2), de tal manera que se asume que la masa de cemento introducida en el matraz es $P_1 - P_2$. En estas condiciones, la densidad real vendrá dada por:

$$D_R = \frac{P_1 - P_2}{V_2 - V_1} \quad (1)$$

2.1.2. Superficie específica Blaine

Una vez obtenida la densidad, se procede a determinar la finura del cemento mediante un permeabilímetro Blaine siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 196 [107,108]. Este ensayo refleja una característica íntimamente ligada al valor hidráulico del material, la superficie específica de las partículas del cemento que tiene

gran influencia en la velocidad de las reacciones químicas durante el fraguado y primer endurecimiento.

El ensayo está basado en la resistencia que ofrece un cierto volumen de cemento al paso, a través de él, de aire a presión atmosférica y en condiciones de temperatura de laboratorio. Una columna de aceite es la responsable de generar un vacío en el interior del tubo Blaine que se compensa con la permeabilidad de la muestra. Midiendo la velocidad de bajada de la columna de aceite puede determinarse la superficie específica Blaine (Fig. 17).

En cuanto al procedimiento operatorio, en primer lugar, se pesa una cantidad de muestra, que será función de la densidad del cemento, pues su finalidad es el llenado de un volumen específico.



Fig. 17. Permeabilímetro Blaine para la determinación de la finura del cemento.

Tras el llenado del volumen del cilindro, se cierra herméticamente el sistema para poder llevar la columna de aceite, mediante vacío, hasta una altura por encima de la marca superior del tubo del equipo. A continuación, se destapa el sistema, exponiendo la muestra a la presión atmosférica que permitirá compensar el vacío generado en el interior del tubo entre la muestra y la columna de aceite. El aire

comienza a fluir a través de la capilaridad del cemento en polvo a una velocidad que llevará una correspondencia directa con la velocidad de bajada de la columna de aceite. Cuando el nivel superior de la columna de aceite alcance la marca superior del tubo se comienza a registrar el tiempo. Cuando el mismo nivel alcance la segunda marca del tubo se registra el tiempo transcurrido.

En general, se realizarán un mínimo de tres mediciones del tiempo para, con ellas, obtener un valor medio $\langle t \rangle$ y resolver la fórmula que proporciona la superficie específica Blaine. La siguiente expresión permite calcular el valor de la superficie específica Blaine en función de la constante de calibración k del aparato ($k=2,641$ para el equipo utilizado) y la densidad del cemento.

$$S_{Blaine} = 524,2 \cdot k \cdot \frac{\sqrt{\langle t \rangle}}{\rho} \quad (2)$$

2.1.3. Composición química elemental

La realización de estos análisis, se ha llevado a cabo, por un lado, utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM – 5800 LV equipado con microanálisis por energía dispersiva de rayos X, Fig. 18.



Fig. 18. Microscopio electrónico de barrido utilizado en los análisis.

Se han realizado tres determinaciones distintas en otras tantas zonas de cada muestra, y los resultados obtenidos son presentados como los correspondientes valores medios.

Para la cuantificación de los elementos presentes en la muestra, se ha utilizado la corrección estándar ZAF 4. Esta técnica permite, asimismo, la observación microscópica de las muestras, por lo que también es posible discernir algunos detalles morfológicos, si fueran de interés.

Por otro lado, se ha podido hacer una valoración química semicuantitativa del porcentaje en peso de los óxidos presentes en el cemento. Para ello, la técnica utilizada ha sido la espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF). Además, se ha procedido, también, a cuantificar la cantidad de azufre y carbono mediante combustión.

2.1.4. Composición mineralógica

La técnica manejada para la obtención de la composición mineralógica de los cementos ha sido la difracción de rayos X (XRD). Para la caracterización por difracción de rayos X, se ha utilizado un difractómetro convencional modelo PHILIPS PW 1820. El método empleado ha sido el del polvo cristalino (método de DEBYE – SCHERRER, modificado por sustitución de la cámara de registro fotográfico por un detector proporcional), realizándose un barrido angular de la muestra entre $2\theta_i = 3^\circ$ y $2\theta_f = 80^\circ$, siendo θ el ángulo de Bragg (Fig. 19 y Fig. 20).

El equipo que se utiliza en este ensayo consiste en:

- Difractómetro PHILIPS PW 1820.
- Tubo generador de rayos X con anticátodo de Cu ($\lambda = 1.542 \text{ \AA}$).
- Generador de alta intensidad de corriente trabajando a 40 kV.
- Software de adquisición automatizada de datos.

En cuanto a la preparación de la muestra, en el caso de los cementos, no se hace necesario triturar y hacer pasar el material por el tamiz de 0,063 mm como paso

previo al análisis, como es habitual con otro tipo de muestras. La finura del cemento utilizado es adecuada para proceder a su análisis con tan solo secar la muestra, en estufa ventilada, durante un periodo mínimo de unas 24 horas a fin de eliminar toda la humedad residual.



Fig. 19. Detalle del goniómetro utilizado por el difractómetro donde puede apreciarse el lugar donde se aloja el tubo de rayos X.



Fig. 20. Detalle de la muestra de cemento en el momento de su colocación.

Con la configuración adecuada, se obtiene, como ya se ha comentado, un difractograma con 2θ desde 3° hasta 80° , con intensidad de 1 segundo de detección por cada paso de $0,05^\circ$. La duración del ensayo es, bajo esta configuración, de 25 minutos.

Una vez obtenido el difractograma, mediante la ley de Bragg es posible calcular la distancia interplanar asociada a los picos más importantes, así como la intensidad de los mismos en relación al pico de mayor altura. La interpretación del difractograma

obtenido se realiza en base al método HANAWALT, haciendo uso de las fichas compiladas en el *Powder Diffraction File Search Manual* publicado por la *American Society for Testing Materials* (ASTM) [109], pudiéndose identificar así la composición mineralógica de los cementos en polvo antes de hidratar.

Se analizaron los dos tipos distintos de cementos. El 42,5 R/SR es un cemento comercializado por Cementos Portland Valderrivas, que finalmente fue clasificado como clase resistente 52,5 N/SR tras los buenos resultados obtenidos en las investigaciones realizadas bajo el amparo del proyecto RECNHOR (primera y segunda fase) por los distintos participantes. El cambio de catalogación eleva la clase resistente de 42,5 MPa a 52,5 MPa y se clasifica como de resistencia inicial ordinaria "N" dentro de la clase 52,5.

2.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS NATURALES Y RECICLADOS

Durante el proceso de caracterización de los áridos naturales y reciclados, utilizados posteriormente en la elaboración del hormigón de control y reciclado, se han llevado a cabo ensayos composicionales, atendiendo a sus características macroscópicas, se ha efectuado su caracterización geométrica y dimensional, y se ha evaluado propiedades físicas como densidad, porosidad y absorción y, finalmente, propiedades mecánicas.

A continuación, se describe con detalle la metodología empleada en cada ensayo, así como la referencia a la normativa correspondiente, cuando sea el caso. Por su parte, la caracterización de los áridos naturales y reciclados se ha realizado por separado, comparándose, después, los resultados que proporcionan unos y otros y las consideraciones que, como premisas, serán necesarias para su utilización en hormigones reciclados. Además, se han realizado mezclas, con distintos porcentajes, de árido natural y reciclado para descartar y despejar dudas en cuanto a su posible incompatibilidad y estudiar el comportamiento de las mezclas de distintos materiales y porcentajes.

2.2.1. Composición macroscópica

En lo referente a la caracterización composicional del árido reciclado, como paso previo a su caracterización física, se ha procedido a realizar una separación visual de los componentes del mismo en seis grupos bien diferenciados: 1) mortero y árido natural con mortero adherido; 2) grava y gravilla procedente del hormigón original; 3) asfalto ó árido contaminado con material bituminoso; 4) cerámicos; 5) yeso y 6) fracción menor de 1 mm. Esta separación se ha realizado manualmente e identificando visualmente cada uno de los componentes.

Aunque en las tres fases de la investigación el árido utilizado se encontraba catalogado de igual forma y su procedencia (Planta La Palentina, TECHREC, Madrid) es la misma, se analizaron las dos tandas recibidas en el laboratorio por separado: la correspondiente a la primera y segunda fases, por un lado, y a la tercera, por otro.

La cantidad de muestra analizada ha sido de aproximadamente 3 kg. Una vez alcanzado y registrado el peso seco, un proceso de eliminación de humedad en estufa de ventilación forzada, se procedió a la identificación visual de los componentes (Fig. 21). Una vez separados, se procedió a registrar el peso de cada uno de ellos para, finalmente, referirlas al peso total de la muestra mediante la siguiente expresión:

$$F_i = \frac{P_i}{P} \times 100 \quad (3)$$

siendo:

- F_i la fracción de componente i , expresada en tanto por ciento.
- P_i la masa de componente, expresada en gramos.
- P la masa total de la muestra analizada, expresada en gramos.

Estos ensayos se iniciaron en el año 2006 y se ha seguido el mismo procedimiento, considerándose como el más adecuado a las características del árido, hasta el año 2010. En el año 2009 se redactó la primera norma referente a este tipo de análisis, vigente desde enero de 2010, *UNE-EN 933-11:2009 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados* [110]. Una vez revisada la normativa, se concluyó que el método aquí utilizado se ajusta a los requerimientos de la misma salvo en lo que se refiere a la determinación del volumen de partículas ligeras, prácticamente inexistentes en los áridos reciclados estudiados en las investigaciones que recoge esta Tesis.

Por tratarse de, en este caso, un árido reciclado procedente de la trituración de hormigones estructurales, los grupos con mayor representación son los de *mortero y árido natural con mortero adherido* y *grava y gravilla* procedente del hormigón original. En esta partida se incluyen, además de los áridos naturales y los formados exclusivamente por mortero, los conjuntos de grava o gravilla que se encuentran adheridos a un volumen de mortero aproximadamente igual o superior al de ellos

mismos. Se espera que la presencia de áridos de mortero, cuya resistencia es claramente inferior a la de la grava o gravilla, así como mayor su porosidad, juegue un papel predominante en las propiedades finales del hormigón.

Se aprecia, también, que entre las gravas y gravillas con mortero adherido, el volumen del mortero es inversamente proporcional al volumen de las gravas. Es decir, cuanto mayor es el tamaño del árido reciclado, menor cantidad de mortero adherido es probable que se encuentre.



Fig. 21. Separación de componentes por inspección visual del árido reciclado procedente de hormigón.

Los componentes clasificados aquí como *asfalto* se encuentran en pequeñas proporciones; sin embargo, es importante determinar su contenido porque podría tener una influencia relevante en la posterior adhesión con el nuevo mortero, durante la fabricación del hormigón reciclado con ellos.

Otros elementos apreciados en menor medida son los cerámicos, principalmente restos de tabiquería y sanitarios. También, otros materiales en proporciones que se encuentran por debajo del 1%, como es el caso del *yeso* o la *fracción fina*, los cuales podrían tener efectos que condicionan a la resistencia del hormigón reciclado, los primeros, o influencia sobre la demanda de agua de amasado, los segundos.

2.2.2. Propiedades geométricas y dimensionales

Se describen, a continuación, las técnicas y metodologías empleadas en la caracterización geométrica y dimensional de los áridos utilizados en las tres fases de la investigación.

La primera de las etapas ha supuesto la completa caracterización granulométrica, identificando, en cada caso, el huso granulométrico correspondiente. A continuación, se hace una detallada descripción del método empleado en la determinación del porcentaje en finos de los áridos y se procede a la identificación de las partículas blandas que en ellos se encuentran. Finalmente, en lo relativo a la caracterización dimensional, la técnica que se describe en el apartado correspondiente relata los pasos seguidos en cuanto a la determinación del índice de lajas y el coeficiente de forma de los áridos.

2.2.2.1. Análisis granulométricos

El ensayo de clasificación granulométrica se realiza de acuerdo con la norma *UNE – EN 933, partes 1 y 2: “Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado”* [111,112]. En ella, se especifica, tanto la cantidad de muestra a emplear, de acuerdo con el tamaño máximo del árido, como el procedimiento del ensayo. Siguiendo la metodología establecida en estos documentos, se procede, inicialmente, al cuarteo mediante rifles hasta conseguir una masa mínima de muestra de 10 kg, tal y como corresponde a un tamaño máximo del árido $D = 20$ mm, que es el estimado para la partida de árido reciclado recibida en el laboratorio (Fig. 22).



Fig. 22. Procedimiento de cuarteo del árido reciclado mediante rifles (izq.) y pesaje (dcha.).

La muestra reducida, así obtenida, se introduce en una estufa a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta llegar a peso constante, tras lo que se determina el peso seco (P_d),

Fig. 23. A continuación, se lava la muestra por inmersión en agua y se pasa por el tamiz de 0,063 mm. Después de secar nuevamente la muestra en estufa, se determina el peso seco tras el lavado (P_2), calculando, así, la masa de los finos eliminados durante dicha operación ($P_1 - P_2$).

Seguidamente se realiza un primer análisis granulométrico sobre la muestra completa, utilizando la siguiente serie de tamices UNE [111]:

0,063 – 0,125 – 0,250 – 0,5 – 1 – 2 – 4 – 8 – 16 – 20 – 32,5 – 40

Tras descartar los tamaños de partículas superiores a los 20 mm e inferiores a los 4 mm, se vuelve a practicar un análisis sobre la fracción reducida 4/16 mm, utilizando, en este caso, la siguiente serie de tamices:

4 – 8 – 16 – 20

Se utiliza, en ambos casos, una tamizadora de vaivén (Fig. 24), estableciendo en 2 minutos el tiempo estándar de tamizado.



Fig. 23. Procedimiento de secado del árido en estufa a 110 ± 5 °C.

Los resultados de los ensayos realizados se presentan, en cada caso, bajo la forma de las curvas granulométricas correspondientes, que son representaciones que muestran el porcentaje de árido que pasa por cada tamiz frente a la abertura de mallas del mismo, expresada en milímetros.

Asimismo, se calcula para cada fracción, el valor del módulo granulométrico correspondiente; este parámetro se obtiene sumando los porcentajes retenidos acumulados de la serie de tamices [0,125 – 0,250 – 0,5 – 1 – 2 – 4 – 8 – 16 – 32,5], y dividiendo por 100 el resultado final. El módulo granulométrico del árido reciclado, para un mismo tamaño máximo de árido, presenta pequeñas variaciones dependiendo, principalmente, del sistema de machaqueo empleado y, en menor medida, de la calidad del hormigón original.



Fig. 24. Tamizadora de vaivén para análisis granulométricos.

2.2.2.2. Determinación del contenido de finos

Es bien sabido que el árido reciclado genera finos durante su manipulación debido al desprendimiento de pequeñas partículas de mortero adherido a su superficie. La presencia de partículas finas en la superficie del árido reciclado, procedentes de la pasta de cemento del mortero antiguo, puede originar problemas de adherencia entre éste y la nueva pasta de cemento, además de provocar un aumento en la cantidad de agua de amasado necesaria para alcanzar la consistencia requerida.

El ensayo de determinación del contenido de finos se realiza siguiendo las indicaciones especificadas en la norma *UNE-EN 933-2/1M:1999. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas* [111]. Tras la obtención del peso seco de la muestra antes y después del lavado,

como se ha indicado anteriormente, se procede al cálculo del porcentaje de finos presentes en ella, determinándose la cantidad de finos que pasan por el tamiz de 0,063 mm mediante la siguiente expresión:

$$f = \frac{(P_1 - P_2) + P}{P_1} \times 100 \quad (4)$$

siendo P la cantidad de muestra recogida en el fondo de tamiz tras la realización del análisis granulométrico de la fracción completa del árido y P_1 y P_2 son los pesos de la muestra antes y después de ser tamizada. Aunque teóricamente no debería recogerse nada en el fondo de tamiz tras el tamizado, puesto que el último tamiz de la serie es el de 0,063 mm de abertura y las fracciones inferiores a este tamaño fueron eliminadas durante el lavado previo, sin embargo se acumulan cantidades apreciables de fracción fina que se desprende de la superficie del árido durante el tamizado y cuyo origen es, como ya se ha indicado, la presencia de pasta de cemento procedente del mortero original que recubre a las partículas de árido reciclado.

2.2.2.3. Determinación del contenido de partículas de tamaño inferior a 4 mm

Al igual que lo que ocurre con las fracciones más finas, los áridos gruesos reciclados presentan un mayor contenido de partículas de tamaño inferior a 4 mm debido a su elevada friabilidad, que provoca la generación de tales partículas incluso durante la propia manipulación, una vez clasificados. La determinación de su contenido, también, se encuentra especificada en la norma *UNE-EN 933-2/1M:1999. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas* [111], y se cuantifica mediante el valor del porcentaje acumulado de árido que pasa por el tamiz de 4 mm de abertura.

2.2.2.4. Determinación del índice de lajas

En cuanto a la forma del árido reciclado, existe disparidad de criterios dependiendo del método de ensayo empleado, aunque, en general, se considera que el árido grueso reciclado presenta una forma adecuada para la fabricación de hormigón.

Los métodos de determinación de la forma de los áridos reciclados van desde el uso de técnicas de microscopía hasta la evaluación a través del índice de angulosidad, pasando por la estimación del coeficiente de forma o del índice de lajas.

Este último parámetro se determina de acuerdo con el procedimiento indicado en la norma *UNE – EN 933 – 3: “Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas”*. El ensayo se realiza únicamente sobre partículas cuyos tamaños estén comprendidos entre 4 y 80 mm, descartándose todas las demás. Para ello, se dividen las muestras por tamizado en un conjunto de fracciones granulométricas d/D_i (tamaño mínimo/tamaño máximo), de tal forma que se pesan y se rechazan aquellas partículas cuyos tamaños sean menores de 4 mm o superiores a 80 mm; esta cantidad de árido constituye el llamado total de masa rechazada. Por otra parte, con los resultados del porcentaje retenido acumulado de las fracciones restantes, se obtiene la curva granulométrica de cada una de las muestras consideradas.

Una vez obtenidas y pesadas todas las fracciones granulométricas especificadas, se criba cada una de ellas de forma manual durante 1 minuto utilizando el tamiz de barras correspondiente en cada caso, que es aquel cuya separación entre las barras es precisamente igual a $D/2$ (Fig. 25), y se pesa la cantidad de árido de cada fracción que pasa a través de dicho tamiz.



Fig. 25. Tamiz de barras para la determinación del índice de lajas.

De esta forma, se calcula el índice de lajas (IL) para cada fracción granulométrica, definido en porcentaje como la relación entre el peso de árido reciclado que pasa por el tamiz de barras correspondiente (P_2) y el peso inicial (P_1) de cada una de las fracciones:

$$IL = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \quad (5)$$

Se define entonces el índice de lajas global (IL global) como la relación entre los sumatorios de dichas masas para todas las fracciones consideradas, expresando el resultado redondeado al número entero más próximo.

Tal y como recoge Marta Sánchez en su Tesis Doctoral [98], algunos estudios [113,114] que han empleado el método del índice de lajas para determinar la forma del árido grueso han encontrado diferencias notables entre el árido natural y el árido reciclado [53], siendo mayor el valor del índice de lajas en el caso del árido natural.

2.2.2.5. Determinación del coeficiente de forma

La determinación de este parámetro se realiza mediante el ensayo conforme a la normativa *UNE – EN 933 – 4: “Determinación de la forma de los áridos. Coeficiente de forma”* [115]. Para ello, se separa el árido en fracciones d/D_i , tales como 4/8, 8/16, 16/32,5, que cumplan la condición $D_i \leq 2d_i$ (Fig. 26).

Seguidamente, se clasifican las partículas de cada una de estas fracciones según la relación entre su longitud (L), y su anchura o espesor (E), de tal forma que se consideran partículas no cúbicas aquellas cuya relación L/E sea superior a 3.

Se define, entonces, el coeficiente de forma (SI) mediante la siguiente expresión:

$$SI = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \quad (6)$$

siendo P_1 el peso inicial de la muestra de ensayo para cada fracción considerada y P_2 el peso de las partículas no cúbicas halladas en cada una de ellas.



Fig. 26. Fracciones granulométricas para la determinación del coeficiente de forma del árido reciclado.

En general, los estudios que han valorado el coeficiente de forma del árido reciclado, indican que este coeficiente es muy similar al que puede presentar el árido natural, si bien los tamaños más finos presentan menores valores, es decir, una forma más redondeada [53].

2.2.3. Propiedades físicas de los áridos

La densidad del árido reciclado es inferior a la del árido natural debido, principalmente, a la pasta de cemento que queda adherida a los granos (Fig. 27). Además, la presencia del mortero adherido a los áridos del hormigón original provoca que la textura de los áridos reciclados sea más rugosa y porosa que la de aquéllos, lo cual tiene a su vez una influencia decisiva sobre la capacidad de absorción de agua.

En efecto, la absorción es una de las propiedades físicas del árido reciclado que presenta una mayor diferencia con respecto al árido natural. La absorción es, en todos los casos, superior a la de los áridos naturales, debido a la elevada porosidad del mortero residual adherido; mientras que la absorción del árido natural suele oscilar entre 0 – 4%, la absorción del mortero alcanza valores del 16 – 17%. El rango total encontrado en la bibliografía para el árido grueso reciclado es 0,8 – 13%, con un valor medio total de 5,6% [58].



Fig. 27. Aspecto superficial del árido grueso reciclado en que se aprecian los restos de mortero adherido.



Fig. 28. Fracciones de árido grueso, árido medio y árido fino reciclado.

2.2.3.1. Determinación de densidades reales, relativas, aparentes y saturadas

La determinación de densidades se realiza mediante los procedimientos descritos en la normativa *UNE – EN 1097 – 6: “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua”* [116] y *UNE-EN 1097-3: “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad.”* [117].

Inicialmente se separa la muestra a analizar, tras secado en estufa hasta peso constante, en tres fracciones distintas (Fig. 28):

- Árido fino: fracción que pasa por el tamiz de 1 mm.
- Árido medio: fracción retenida entre los tamices de 1 mm y 4 mm.
- Árido grueso: fracción retenida en el tamiz de 4 mm.

Para la fracción de árido fino (Fig. 29), se procede a determinar la densidad real mediante técnicas de picnometría con ayuda de un volumenómetro de Le Chatelier.



Fig. 29. Detalle de la fracción de árido fino reciclado obtenido.

Para ello, se llena parcialmente el volumenómetro con agua hasta un volumen inicial cualquiera (V_1) por debajo del ensanchamiento del cuello del matraz. A continuación, se pesa el volumenómetro con el agua introducida (Fig. 30) y se obtiene el peso inicial (P_1) del matraz con el agua.

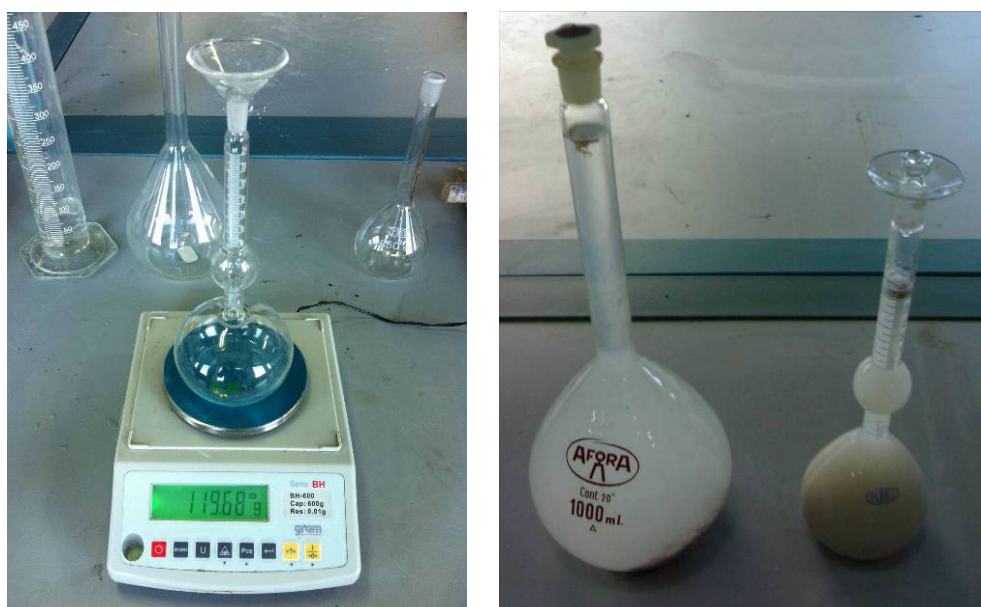


Fig. 30. Proceso del pesaje del picnómetro para la determinación de la densidad real del árido fino (izq.) y aspecto tras la incorporación del árido fino (dcha.).

Seguidamente, se va introduciendo cuidadosamente el árido fino en el matraz hasta que desplace el nivel de volumen de agua hasta un valor final cualquiera que esté por encima del ensanchamiento del cuello del matraz. Una vez introducido el árido en el picnómetro se deja reposar durante 48 horas para asegurar la completa saturación de del árido (Fig. 30). Transcurrido este tiempo, se determina directamente sobre la escala del matraz el volumen final alcanzado por el líquido (V_2) y se pesa el conjunto para obtener el peso final (P_2). Así, la diferencia de valores $P_2 - P_1$ representa la masa de árido introducida en el picnómetro, mientras que el valor $V_2 - V_1$ representa el volumen de agua desplazado por el árido introducido. La densidad real (D_R) de la fracción fina del árido reciclado, se calcula entonces mediante la expresión:

$$D_R = \frac{P_2 - P_1}{V_2 - V_1} \quad (7)$$

Para la fracción de árido medio (Fig. 31), se utiliza un picnómetro sobredimensionado (matraz aforado) de 1 litro de capacidad que, aunque no está dotado de escala graduada para la determinación directa del volumen, lleva grabada en la parte más alta del cuello una marca de referencia que indica su límite de llenado. En este caso, en primer lugar se registra el peso del matraz vacío P_0 , a continuación se introduce agua destilada, hasta la marca de enrase del cuello del picnómetro y se pesa, obteniéndose así el peso P_1 . Posteriormente, se vacía el matraz y se introduce una cierta cantidad de árido en su interior, registrándose el peso de este conjunto, P_2 . Finalmente, se introduce agua destilada en el matraz que contiene el árido para que el nivel aumente nuevamente hasta la marca. Se pesa el conjunto, en todos los casos utilizando una balanza de precisión, para obtener el peso P_3 del picnómetro, agua y árido. Como en el caso del árido fino, el matraz se deja reposar durante 48 horas para asegurar así la completa saturación de huecos intergranulares del árido.



Fig. 31. Fracción del árido medio reciclado encontrado.

De esta forma, la densidad real del árido medio vendrá dada por la expresión siguiente:

$$D_R = \frac{P_2 - P_o}{[(P_1 - P_o) - (P_3 - P_2)] / \gamma} \quad (8)$$

siendo γ la densidad del agua utilizada que, en condiciones de laboratorio se asume que es 1 g/cm^3 . Por tanto, la expresión puede reducirse, utilizando unidades de gramo para la masa y de cm^3 para el volumen, como:

$$D_R = \frac{P_2 - P_o}{(P_1 - P_o) - (P_3 - P_2)} \quad (9)$$

Por último, para determinar la densidad de la fracción gruesa del árido reciclado (Fig. 32) se sigue un procedimiento alternativo. En este caso, inicialmente se seca la muestra en estufa a $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta peso constante, y tras dejarla enfriar hasta temperatura ambiente, se pesa para obtener así la masa o peso seco (P_s) de la misma.

Tras el secado, se introduce la muestra en una celda en la que se hace vacío durante 24 horas con ayuda de una bomba extractora, de tal forma que se extrae el aire de la celda y del interior de la porosidad abierta del material (Fig. 33).



Fig. 32. Fracción del árido grueso reciclado tras la separación.



Fig. 33. Vasija utilizada como celda de vacío para la saturación del árido.

Seguidamente, se va incorporando lentamente agua a la celda hasta cubrir por completo la muestra, de modo que la sobrepresión, así creada, facilite la introducción del agua en sus poros accesibles; en estas condiciones, se mantiene la muestra durante otras 24 horas. Finalmente, se abre la celda de vacío exponiendo el agua a presión atmosférica y se mantiene la muestra sumergida durante 24 horas más. Concluido el proceso de saturación, se seca la superficie de las partículas de la muestra con un paño húmedo y se pesan en condiciones de saturación, obteniéndose el llamado peso o masa saturada con superficie seca (P_{ss}).

La determinación del volumen aparente (V_a) de los áridos se realiza directamente estimando el peso de la muestra saturada sumergida por completo en agua con ayuda de una balanza hidrostática. Una vez más, la pesada así realizada con la balanza hidrostática proporciona directamente el volumen de agua desplazada por la muestra, puesto que la densidad del agua en condiciones de laboratorio puede considerarse $\gamma = 1 \text{ g/cm}^3$.

Con los resultados de estas medidas y la formulación que proporciona la normativa, se pueden calcular los distintos parámetros físicos de interés para los áridos reciclados analizados que, en este caso, han sido:

- Volumen aparente, V_a (cm^3).
- Porosidad accesible, h_a (cm^3):

$$h_a = \frac{P_{sss} - P_s}{\gamma} \quad (10)$$

- Volumen relativo, V_r (cm^3), equiparable en muestras poco porosas al volumen real:

$$V_r = V_a - h_a \quad (11)$$

- Densidad aparente, D_a (g/cm^3):

$$D_a = \frac{P_s}{V_a} \quad (12)$$

- Densidad relativa, D_r (g/cm^3), equiparable en muestras poco porosas a la densidad real:

$$D_r = \frac{P_s}{V_r} \quad (13)$$

Dado que es habitual la presaturación del árido reciclado previamente a su utilización, también es frecuente la determinación de la densidad en condiciones de saturación con la superficie seca:

- Densidad saturada, D_s (g/cm³):

$$D_s = \frac{P_{sss}}{V_a} \quad (14)$$

2.2.3.2. Determinación del coeficiente de absorción de agua

El cálculo del coeficiente de absorción de agua del árido grueso reciclado se puede abordar directamente a partir de las medidas realizadas para la determinación de las densidades. Según lo reflejado en el apartado anterior, el coeficiente de absorción (A), expresado como porcentaje en peso, viene dado por:

$$A(\%) = \frac{P_{sss} - P_s}{P_s} \times 100 \quad (15)$$

2.2.3.3. Determinación de la porosidad accesible

Al igual que el coeficiente de absorción de agua, la porosidad accesible del árido grueso reciclado se puede estimar directamente a partir de las medidas realizadas para la determinación de las densidades según lo reflejado en el apartado 2.2.3.1 y lo recogido en la norma *UNE-EN 1097-3:1999. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad* [117].

En efecto, la porosidad (P) del árido grueso, expresada como porcentaje en volumen, viene dada por:

$$R(\%) = \frac{h_a}{V_a} \times 100 \quad (16)$$

O bien, teniendo en cuenta la expresión (10) y utilizando agua en condiciones de laboratorio, en la forma alternativa:

$$R(\%) = \frac{P_{sss} - P_s}{V_a} \times 100 \quad (17)$$

2.2.4. Propiedades mecánicas y tribológicas

El árido reciclado presenta algunas particularidades que lo diferencian esencialmente del árido natural en lo que se refiere a su comportamiento mecánico y, por extensión, tribológico (resistencia al desgaste, a la abrasión, etc.). Una vez más, este comportamiento está fuertemente condicionado por los restos de mortero adherido a la superficie, por lo que es preciso, también, llevar a cabo un exhaustivo control de este grupo de propiedades.

2.2.4.1. Determinación del contenido de partículas blandas

El ensayo se realiza de acuerdo con las directrices recogidas en la norma *UNE 7134: "Determinación de partículas blandas en áridos gruesos para hormigones"* [118]. Este documento, considera que una partícula es blanda cuando deslizando ésta bajo la sonda cilíndrica de cuzín¹ (Fig. 34) se produce, en la primera, un surco por efecto del rayado, sin que se desprenda metal sobre ella o bien cuando se observa el desprendimiento de fragmentos de la superficie del árido, aunque se haya depositado metal sobre ella.

¹ Aleación de cobre, cinc y otros metales minoritarios, también conocida como latón, de dureza Rockwell B de aprox. 90 HRB.



Fig. 34. Dispositivo provisto de sonda de cuzín (izq.) para la detección de partículas blandas en áridos gruesos (dcha.); se aprecia el surco producido por la sonda de cuzín.

El ensayo se realiza sobre 20 partículas de cada una de las siguientes fracciones: 10/12,5; 12,5/20; 20/25; 25/40 y 40/50.

En el caso particular de nuestro árido reciclado, las fracciones 20/25, 25/40 y 40/50 se consideran ausentes por lo que, al calcular el porcentaje de partículas blandas, a aquellas, por ser extremas, se le debe asignar el mismo porcentaje que tenga la fracción más próxima, en este caso, la 12,5/20.

Con carácter general, en la bibliografía especializada se indica que, al realizar este ensayo sobre las partículas de árido reciclado, se observa que la acción del cuzín produce el desprendimiento de parte del mortero adherido al árido, por lo cual, en base al criterio establecido por la norma, todas las partículas que contengan mortero, sea cual sea su cantidad, habrán de ser consideradas, en principio, como partículas blandas (Fig. 34) [98]. No obstante, cabe reseñar que pueden encontrarse excepciones notables a esta regla, sobre todo en el caso de áridos reciclados procedentes de hormigones de altas prestaciones en las que el mortero residual adherido a la superficie de los áridos es de muy buena calidad y no resulta rayado por la acción de la sonda de cuzín. Este hecho puede ser también significativo en áridos reciclados procedentes de hormigones prefabricados o estructurales, como es el caso que nos ocupa, en los que no se descarta la presencia de partículas que contienen mortero adherido pero que no son necesariamente partículas blandas.

2.2.4.2. Determinación del coeficiente de desgaste Los Ángeles

La determinación de este parámetro, se realiza mediante los procedimientos descritos en la normativa *UNE – EN 1097 – 2: “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación”*[119].

El ensayo se realiza sobre la fracción de árido 10/14, previamente secada en estufa hasta peso constante, utilizando en este caso 3.000 gramos de la fracción 10/12,5 y 2.000 gramos de la fracción 12,5/14, con una masa inicial total de muestra de 5.000 gramos.

Una vez obtenida la muestra, se introduce en la máquina de ensayo (Fig. 35) junto con la carga abrasiva, formada por 12 bolas de acero de un diámetro aproximado de 46,8 mm y una masa comprendida entre los 390 y los 445 gramos cada una. A continuación, se hace girar el tambor de la máquina de Los Ángeles hasta completar un total de 500 revoluciones. El giro debe ser uniforme, a una frecuencia de rotación comprendida entre 30 y 33 rpm, de modo que la velocidad periférica sea prácticamente constante. Una vez completado el número de vueltas prescrito, se descarga el material del tambor y se procede a una separación preliminar de la muestra ensayada mediante un tamiz mayor que el de 1,60 mm de abertura de malla.

La fracción fina que pasa, se tamiza, a continuación, empleando el tamiz de 1,60 mm. El material más grueso que la abertura de este tamiz, y que por tanto es retenido por él, se lava y se deseca nuevamente en estufa a 110 ± 5 °C hasta peso constante, pesándose seguidamente con precisión de 5 gramos (Fig. 36).

El resultado del ensayo, es la diferencia entre la masa inicial de la muestra y la masa de la fracción retenida en el tamiz de 1,6 mm de esta misma muestra al final del ensayo (M_f), registradas según sus pesos, expresada como tanto por ciento de la masa original (5.000 gramos). Este valor porcentual recibe el nombre de coeficiente de desgaste “Los Ángeles” (LA):

$$LA(\%) = \frac{5000 - M_f}{5000} \times 100 \quad (18)$$



Fig. 35. Máquina de ensayo Los Ángeles para la determinación de la friabilidad.



Fig. 36. Fracción pasante y retenida por el tamiz 1,60 mm tras la realización del ensayo de desgaste Los Ángeles.

En general, el árido reciclado presenta un elevado valor del coeficiente de desgaste Los Ángeles, ya que en el transcurso del ensayo se desprende todo o parte del mortero adherido a la superficie del árido, además de la pérdida propia asociada a la fragmentación del árido original.

2.2.4.3. Determinación del índice de machacabilidad

Para la realización de este ensayo, se han seguido los protocolos establecidos en la norma *UNE-83112: "Áridos para hormigones. Determinación del índice de machacabilidad"* [120].

El índice de machacabilidad de un árido es un valor indicativo de su resistencia a la compresión; la compresión está ejercida por la acción de una partícula sobre las

contiguas al someter a las mismas a una carga exterior aplicada gradualmente, estando éstas confinadas en el interior de un recipiente rígido indeformable, según el esquema recogido en la Fig. 37.

De acuerdo con la norma, la muestra seleccionada ha de tener tamaños de partícula que pasen por el tamiz de 14 mm y sean retenidas por el tamiz de 10 mm (fracción patrón 10/14) o entre los tamices de abertura 14 y 20 mm, según sea el caso.

Con la muestra seca y enfriada, se llena el recipiente por completo hasta enrasar el pistón con el borde del cilindro. Seguidamente, se vacía el molde en una bandeja y se registra la masa inicial (m_n) de la muestra. A continuación, se vuelve a introducir la muestra en el recipiente sin modificar la cantidad, es decir, tratando de minimizar las pérdidas de material. No se considera, en esta ocasión, el pesaje del recipiente junto con el árido por el gran peso de éste en comparación con el de la muestra.

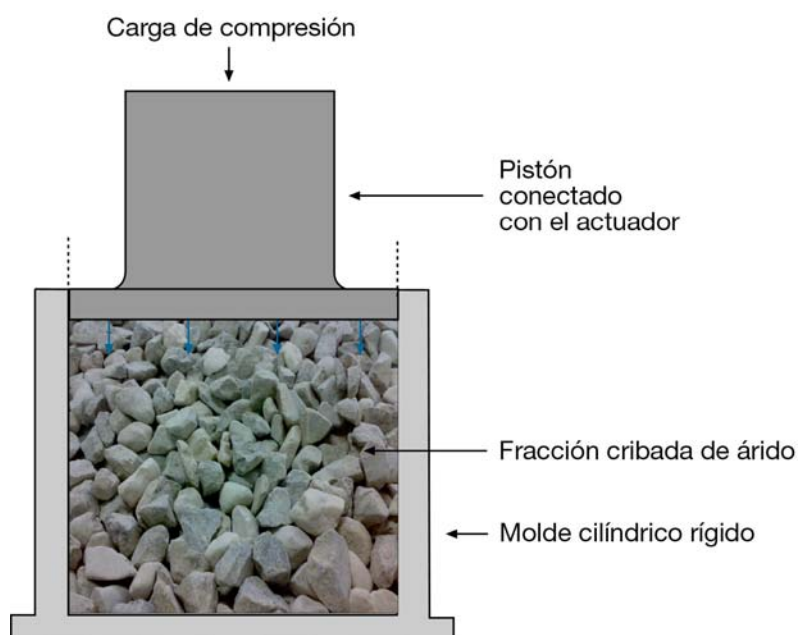


Fig. 37. Representación esquemática del ensayo de determinación del índice de machacabilidad del árido.

Tras colocar el émbolo sobre la superficie libre del árido, se aplica carga de compresión progresivamente a una velocidad de 40 kN/min hasta un máximo de 400 kN, de tal forma que esta carga máxima debe alcanzarse en un tiempo comprendido entre 10 y 12 minutos (Fig. 38).

Una vez descargado el conjunto, se retira el émbolo y se extrae la muestra del interior del recipiente (Fig. 39). Esta muestra es seguidamente cribada por el tamiz de 2,5 mm de abertura, para el caso de la fracción 10/14, o por el de 3,55 mm, para la fracción 14/20, a fin de eliminar los finos producidos durante el ensayo, pesándose la cantidad de muestra retenida en dicho tamiz (m_n).

El índice de machacabilidad de la fracción d/D obtenido de la determinación “n” ($M_{n,d/D}$) se obtiene calculando el tanto por ciento del material que se disgrega y pasa por el tamiz correspondiente para separar finos en relación con la masa inicial de la muestra (Fig. 40), de acuerdo con la expresión:

$$M_{n,d/D} = \frac{m_{ni} - m_{nf}}{m_{ni}} \times 100 \quad (19)$$

Se realizan dos determinaciones sobre dos muestras distintas de árido y el índice de machacabilidad (M) se expresa como la media de ambos resultados redondeada al valor entero más próximo.

En la Fig. 38 puede observarse, a la izquierda, el proceso de compactación mediante barra de acero acabada en punta. Este tipo de compactación garantiza que el árido ocupe el menor volumen posible tal y como sucede cuando se compacta el hormigón fresco durante la fabricación de probetas cilíndricas normalizadas. La imagen de la derecha, Fig. 38, representa el inicio del ensayo y aplicación de carga mediante el pistón conectado al actuador.



Fig. 38. Compactación del material en el molde cilíndrico (izq.) y aplicación de la carga de compresión en el transcurso del ensayo de determinación del índice de machacabilidad del árido (dcha.).

Como complemento a los resultados que proporciona el ensayo normalizado, se ha procedido a realizar una medida de la deformación del material, mediante registro del desplazamiento del actuador de la máquina de ensayo, y así poder obtener la curva tensión-deformación de la estructura resultante de los áridos. De esta manera es posible interpretar, en mayor medida, cuáles son y cómo funcionan los mecanismos resistentes y deformacionales de una de las partes más importantes del hormigón, en este caso reciclado, puesto que la fracción gruesa del árido, aquí analizada, forma parte del esqueleto de los hormigones que se elaboren con ellos.



Fig. 39. Aspecto de la muestra del ensayo de machacabilidad tras retirar el émbolo (izq.) y después de su extracción del recipiente (dcha.).

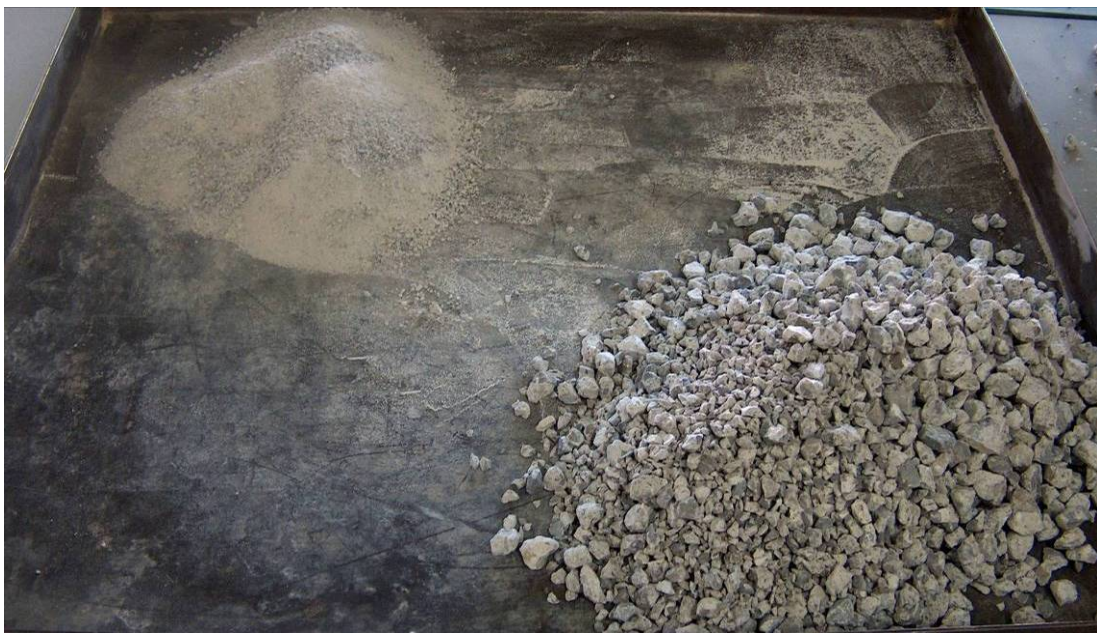


Fig. 40. Aspecto de las dos fracciones obtenidas en el ensayo de machacabilidad tras el tamizado del árido a la conclusión del mismo.

2.3. DOSIFICACIONES DEL HORMIGÓN

Como ya se ha comentado, esta segunda etapa del desarrollo de los trabajos comprende el diseño y elaboración de una serie de amasadas de hormigón de las clases H-0,65, H-0,65AS, H-0,50, H-0,50AS, H-0,55ARS y H-0,45ARS con distintos porcentajes de grava reciclada como sustituto de la grava natural: 0% (hormigón de control), 20%, 50% y 100%.

2.3.1. Estimación del número de probetas necesarias

Por una parte, de cara a la caracterización del hormigón reciclado en cuanto a su densidad, porosidad y absorción, se requerirán 6 muestras cilíndricas de 100 mm de altura por 150 mm de diámetro, obtenidas a partir de 2 probetas cilíndricas normalizadas, de 300 mm de altura por 150 mm de diámetro, por cada una de las dosificaciones.

El ensayo de permeabilidad se realiza sobre 2 muestras que corresponden al tercio medio de una probeta cilíndrica normalizada y sobre las que se analiza previamente la densidad, porosidad y absorción, ya que estos ensayos no ejercen una importante modificación de la red capilar del hormigón. En el apartado de *Propiedades físicas del hormigón reciclado* se describe la metodología seguida para la obtención de las submuestras.

El ensayo de penetración de agua bajo presión se lleva a cabo sobre las mismas muestras sobre las que se realiza el ensayo de permeabilidad a gases ya que éste, debido a las bajas presiones que se utilizan, no modifica sensiblemente la permeabilidad del hormigón. Además, entendiéndose que el ensayo de penetración requiere dividir la muestra en dos mitades utilizando, para ello, el método de rotura brasileño, se obtienen, de esas mismas muestras, datos de la resistencia a tracción indirecta del material.

En los ensayos de resistencia a compresión se van a emplear un mínimo de 5 probetas cilíndricas normalizadas, llegándose a utilizar 7 en los casos en los que los resultados no fueran suficientemente homogéneos.

Para los ensayos dinámicos de comportamiento frente a esfuerzos de fatiga se fabricarán 12 probetas por dosificación, edad y clase de hormigón. Éstos se distribuyen entre ensayos de compresión, LOCATI y STAIRCASE. En este caso, se curarán todas las probetas en cámara ambiental en condiciones de máxima humedad, 99%, y temperatura controlada de $20^{\circ} \pm 2^{\circ}$ C.

Así, el número de probetas necesarias para la ejecución de la parte experimental de durabilidad de la Tesis, por cada una de las fases consideradas, será:

$$N_1 = 5 \text{ Probetas} \times 4 \text{ Dosificaciones} \times 2 \text{ Clases} \times 2 \text{ Ambientes} \times 3 \text{ Edades} = 240$$

El número de probetas para la determinación del comportamiento frente a esfuerzos de fatiga, por cada fase del proyecto:

$$N_2 = 12 \text{ Probetas} \times 4 \text{ Dosificaciones} \times 2 \text{ Clases} = 96$$

El total de probetas cilíndricas normalizadas necesarias para la consecución de todos los ensayos de caracterización será, por tanto:

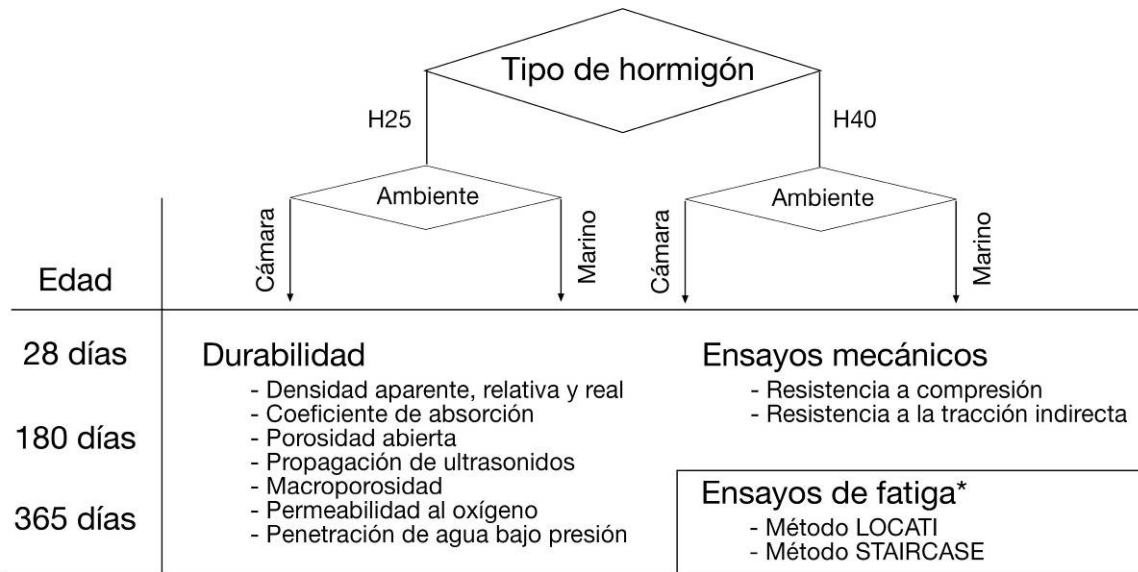
$$N = N_{FASE I} + N_{FASE II} + N_{FASE III} = 3(N_1 + N_2) = 1008$$

Teniendo en cuenta que por cada amasada de 50 litros, después del control de consistencia por el método del cono de Abrams, se obtienen 6 probetas, el número total de amasadas a realizar, con este volumen de hormigón requerido es de 168.

La Fig. 41 resume, de manera esquemática, los hitos previstos en cada fase de la presente Tesis. Por una parte, cada clase de hormigón ha sido llevada a 2 ambientes de curado bien diferenciados, cámara de humedad e intemperie, como ya se ha comentado. Además, cada hormigón ha sido caracterizado a los 28, 180 y 365 días de edad en cuanto a su comportamiento mecánico y durabilidad.

Los hormigones destinados a ensayos dinámicos son curados, solamente, en cámara de humedad y su edad de curado estipulada han sido los 365 días. El motivo de esta última circunstancia radica en la larga duración de cada uno de los ensayos a fatiga (entre 72 y 96 horas) y la incertidumbre, como se verá, en la duración de los mismos. En la caracterización a fatiga de una clase resistente puede invertirse, aproximadamente, 1 mes. No sería posible analizar y comparar hormigones de una

amasada realizada el mismo día con 30 días de diferencia entre el primero y último ensayo para edades de 28 y 180 días, cuando el cemento del hormigón se encuentra en plena evolución. En este sentido, se ha verificado que a partir de aproximadamente 300 días de edad, la velocidad de maduración de las propiedades mecánicas de los hormigones es lo suficientemente lenta como para que los resultados de ensayos realizados con 90 días de diferencia puedan ser comparables entre sí.



* Los ensayos de fatiga se realizarán a una única edad (365 días) y un solo ambiente (cámara de humedad)

Fig. 41. Distribución esquematizada de los objetivos planteados para cada una de las tres fases de la etapa experimental.

2.3.2. Definición de las dosificaciones

El punto de partida ha sido la elaboración de un hormigón patrón, sin árido reciclado, que sirve como amasada de referencia. Las dosificaciones se han diseñado, teniendo en cuenta las propiedades físicas y las granulometrías de los áridos naturales, en base al método de Fuller.

El método de Fuller es un sistema de dosificación basado en el contenido de cemento. Está indicado para piezas de hormigones estructurales no muy armadas, áridos redondeados con un tamaño máximo no superior a 70 mm y una riqueza de cemento próxima a los 300 kg/m³.

Cada una de las tres fases de la investigación ha requerido de la definición de distintas dosificaciones. Así, en la primera y en la segunda de las fases fueron

propuestas unas cantidades de cemento de 275 kg para el H-0,65 y de 380 kg por metro cúbico para el H-0,50, con unas relaciones de agua/cemento para la dosificación seca de 0,65 y 0,50, respectivamente. No obstante, debe señalarse que los procesos de fabricación entre la primera y la segunda fase se diferenciaron en que, en la primera de ellas, el árido reciclado se incorporó al hormigón en las condiciones de humedad de recepción, restando al agua de la dosificación final el agua aportada por éstos. En estas condiciones, y debido a la alta porosidad y absorción del árido reciclado, la relación agua/cemento efectiva se vio fuertemente afectada, reduciéndose la trabajabilidad de los hormigones en estado fresco y haciéndose necesario incorporar mayor cantidad de aditivo superplastificante. Para subsanar estas dificultades, se decidió hacer las modificaciones oportunas sobre las dosificaciones de la segunda y tercera de las fases.

En la segunda fase, hormigones H-0,65AS y H-0,50AS, se mantuvieron las cantidades de cemento de las dos clases resistentes de hormigón y las relaciones agua/cemento de la dosificación seca. Sin embargo, en un proceso previo a la incorporación de los áridos reciclados a la mezcla de amasado, éstos se presaturaron junto con el resto de áridos gruesos naturales (excepto en la de 100% de incorporación en la que todo el árido grueso es reciclado) mediante un procedimiento que se describe en el siguiente apartado. Con este procedimiento se consiguió impedir que la porosidad del árido reciclado incorporado redujera la cantidad de agua de amasado y que la relación agua/cemento efectiva de las dosificaciones se mantuviera constante a pesar de la incorporación del árido reciclado, más absorbente.

En la tercera de las fases, se prepararon otras dos clases resistentes de hormigón, H-0,55ARS y H-0,45ARS. La primera de ellas, con 325 kg de cemento por metro cúbico y una relación agua/cemento de 0,55. La segunda dosificación, con 385 kg de cemento por metro cúbico y una relación agua cemento de 0,45. Con estas dos nuevas dosificaciones patrón se pretendió cubrir una gama de cuatro tipos diferentes de dosificación a las que se incorporarían los áridos reciclados. No obstante, en esta fase solo fue presaturado el árido reciclado y no toda la fracción gruesa como en el caso de la segunda fase (véase la Tabla 3).

Como ya se ha indicado, a partir de las dosificaciones de control se confeccionan amasadas con sustituciones del 20% (máximo recomendado por la Instrucción EHE-

08, [9]), 50% y 100% de la grava natural por árido reciclado. Los ajustes granulométricos de estas sustituciones se basan, también, en el método de Fuller. En todos los casos, se mantienen los mismos contenidos de cemento y agua que en el amasado patrón, de referencia, y se trata de ajustar el aditivo superfluidificante para conseguir idéntica consistencia (fluida) a la del hormigón de control.

Tabla 3. Resumen de las características de las dosificaciones.

DOSIFICACIONES					
FASE	FECHA	NOTACIÓN	Relación Agua/cemento	Cemento [kg/m ³]	Método
Primera	Enero 2006	H-0,65	0,65	275	AR Seco
		H-0,50	0,50	380	AR Seco
Segunda	Abril 2007	H-0,65AS	0,65	275	AG Sat.
		H-0,50AS	0,50	380	AG Sat.
Tercera	Octubre 2009	H-0,55ARS	0,55	325	AR Sat.
		H-0,45ARS	0,45	385	AR Sat.

Nota.- AR y AG son los acrónimos de “Árido Reciclado” y “Árido Grueso” respectivamente. Por otra parte, AS y ARS hacen referencia a “Árido saturado” y “Árido reciclado saturado”.

En base a dichas premisas, la dosificación de los áridos viene determinada por una curva de referencia (parábola de Gessner), la cual representa una granulometría continua, y su empleo favorece la total compenetración del conjunto de granos, lo que contribuye a proporcionar una buena docilidad y densidad del conjunto. Dicha curva patrón está representada por la siguiente ecuación:

$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (20)$$

donde:

- D = Abertura del tamiz que define el tamaño máximo del árido empleado en la mezcla.

- d = Abertura de cada uno de los tamices empleados para determinar la granulometría del árido que se va a utilizar (siempre menor a D).
- P = Porcentaje de material en peso que pasa por cada uno de estos tamices (d).

Por lo tanto, para aplicar este método a la mezcla de árido reciclado y árido natural es preciso conocer las granulometrías de ambos. Anteriormente se ha descrito detalladamente la metodología experimental aplicada para la obtención de las curvas granulométricas completas, del árido reciclado, y la clasificación por tamaños del árido natural.

Una vez obtenidas las curvas granulométricas de los áridos, es posible llevar a cabo los ajustes granulométricos para las dosificaciones con sustituciones de 0%, 20%, 50% y 100% del árido natural por el árido reciclado. Tras los cálculos pertinentes, se obtienen las propuestas de dosificaciones presentadas en el capítulo “Resultados”.

2.3.3. Procedimiento de amasado

Los áridos reciclados poseen, en general, una absorción notablemente mayor que los áridos naturales, en el caso que nos ocupa en torno al 5% en peso frente al 2% y 1,5% de la grava natural. Debido a ello, al utilizar los áridos reciclados como un árido natural, tendrá lugar una pérdida de agua de amasado proporcional al grado de sustitución o volumen de árido reciclado incorporado y a la absorción del mismo. Si se amasase de esta manera, las pastas de cemento de los hormigones con 100% de incorporación de árido reciclado tendrían una relación agua/cemento (w/c) efectiva significativamente menor que el resto, proporcionando a estos unas mejores características [4,89-91,121]. El hormigón fabricado con incorporación total de árido reciclado poseería entonces una relación agua/cemento menor que la del hormigón de control y, consecuentemente, puede llegar a proporcionar valores de resistencia a compresión mayores. Cuando la relación agua/cemento es la misma, la resistencia del hormigón reciclado suele ser menor que en el caso del hormigón de control [122]. La mayor absorción del árido reciclado implica que el hormigón fabricado con éste suele necesitar del orden de un 5% más de agua para obtener la misma trabajabilidad [53].

Varios estudios sugieren que los áridos reciclados deben ser presaturados como método de compensación de la alta absorción que poseen, recomendación que quedó recogida en la Instrucción Española del Hormigón [9] estructural desde el 2008 a raíz de las conclusiones que se mencionan en esta Tesis y de los resultados obtenidos por todos los participantes del proyecto RECNHOR-CLEAM [123].

Las amasadoras se han confeccionado, tomando como punto de partida el equipamiento siguiente:

- Amasadora de hormigón de eje vertical.
- Báscula de precisión calibrada con una resolución de 0,1 g y capacidad para 50 kg.
- Cronómetro, con una resolución de un segundo, para el control de los tiempos de amasado.
- Termómetro de aguja para registrar la temperatura del hormigón fresco.
- Moldes normalizados para la fabricación de probetas cilíndricas de hormigón [124].
- Arpilleras y plásticos para la cobertura de los moldes rellenos con hormigón fresco durante las primeras 24 h [125].
- Cámara húmeda con humedad relativa igual o superior al 95% y una temperatura de 20 ± 2 °C [125] para el curado de las probetas.
- Molde para ensayo del cono de Abrams, chapa rígida como base y barra de acero de 16 mm de diámetro acabada en punta para la compactación [126] para la determinación de la consistencia del hormigón fresco.
- Molde y mesa de sacudidas para ensayo de escurrimiento [127] para la determinación, también, de la consistencia del hormigón fresco.
- Herramientas varias: guantes, llanas, paletas, cogedores, cedazos, manguera de agua, matraces y cestos o recipientes para el pesaje.

A continuación, se describe el procedimiento de fabricación de las probetas normalizadas durante la primera de las fases.

El primer paso, a fin de realizar una amasada, es el cálculo de los pesos necesarios de cada uno de los componentes para preparar un volumen concreto de hormigón: áridos, cemento, agua y aditivos. Durante la investigación ha sido necesario realizar ajustes en las dosificaciones que involucraban al agua y a los aditivos. En este sentido, las amasadas de prueba se han realizado siempre con un volumen de amasado de 25 l. Este volumen permite conocer la consistencia y la trabajabilidad del hormigón en estado fresco, siendo una cantidad suficiente como para poder añadir más agua o aditivo si la dosificación no es adecuada. El procedimiento seguido para la confirmación o el ajuste de la dosificación ha sido, en primer lugar, el pesaje de los áridos para, a continuación, proceder a su mezcla con las preparaciones teóricas, verificar visual y manualmente la correcta consistencia y, seguidamente, añadir agua o aditivo de unos recipientes previamente pesados o, en el peor de los casos, desechar la amasada si su consistencia es demasiado líquida. Finalmente, en el caso más favorable, una nueva medida del peso del recipiente del agua o aditivo nos permite conocer con exactitud la cantidad de agua o aditivo definitivamente incorporados.

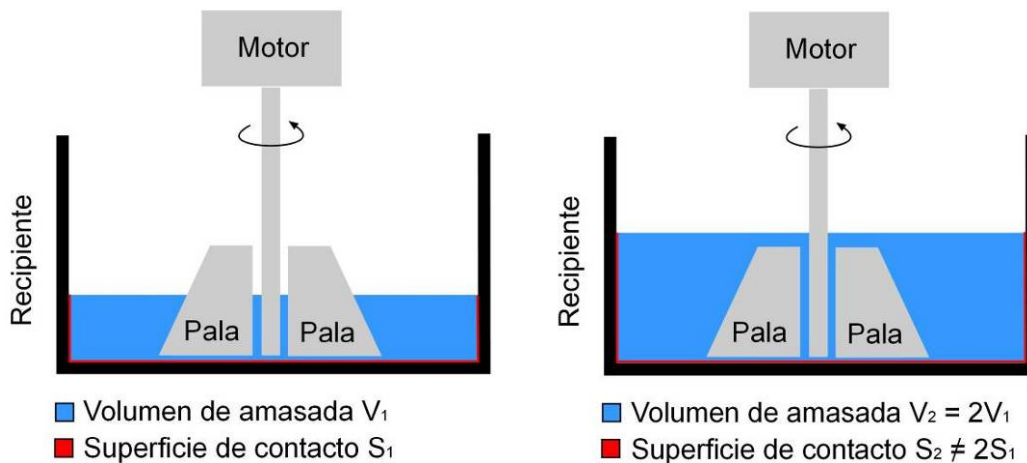


Fig. 42. Representación esquemática de la relación entre el volumen de amasado y la superficie interior de contacto de la amasadora.

Una vez confirmada la correcta dosificación, se procede a realizar una amasada de 50 litros de hormigón. Nótese que al aumentar el volumen de amasada en la misma hormigonera, puede darse un exceso del agua del amasado si no se han humedecido

previamente las paredes interiores de la amasadora. Efectivamente, este efecto es debido a que la superficie de contacto entre las paredes de la hormigonera/mezcladora con la masa fresca y el volumen de la propia masa no aumentan proporcionalmente. El agua de amasado presenta una tendencia a lubricar toda la superficie de contacto que, en el caso que nos ocupa y por tratarse de una amasadora de 150 litros de capacidad, puede ser considerable (Fig. 42).

2.3.3.1. Primera fase

En la primera de las fases, se opera de la misma manera que se hubiera procedido con la fabricación de un hormigón convencional, considerando el árido reciclado como un árido natural sin tener en cuenta sus propiedades particulares.

En este caso, como en el resto de fases, en primer lugar se comprueba el correcto funcionamiento de todos los equipos necesarios para realizar la amasada y se procede al pesaje de los áridos, por separado y con un error máximo de $\pm 0,5\%$. Se pesa, a continuación, el cemento con un error máximo de $\pm 0,2\%$ y, seguidamente, los aditivos con un error máximo $\pm 0,1\%$. Finalmente, se pesa el agua con un error inferior al $\pm 0,5\%$.

Una vez pesado cada uno de los componentes por separado, Fig. 43, se procede a mezclar los aditivos (en este caso el aditivo superplastificante) con una pequeña cantidad del agua de amasado. En este proceso, el volumen de agua necesaria se estima en torno a 5 veces el volumen de los aditivos y tiene por objeto recoger el material que pueda haber quedado adherido a la superficie del recipiente de pesaje debido a la alta viscosidad del aditivo y tensión superficial de éste con las paredes del recipiente.

Se humedece todo el interior de la hormigonera con agua (distinta de la de amasado) con la manguera procurando que no queden acumulaciones que puedan alterar la relación agua/cemento de la dosificación.

Se añaden, seguidamente, los áridos gruesos de mayor a menor tamaño máximo: grava, árido reciclado (si procede) y gravilla. En este proceso se añade una pequeña cantidad de agua de amasado y se dan 2 vueltas a la hormigonera para homogeneizar

la mezcla. Se introducen, a continuación, los áridos finos y el cemento. En este momento se realiza un registro de la temperatura y la humedad ambiental.

Se pone en marcha la hormigonera junto con el cronómetro y comienza a añadirse progresivamente el agua de amasado. El proceso de adición del agua de amasado tiene una duración de, aproximadamente, 15 s.



Fig. 43. Pesaje de la gravilla, utilizada en una de las amasadas, en una báscula de precisión.

Se amasa durante 3 minutos y se detiene la hormigonera. En este momento, se registra la temperatura del hormigón y se deja reposar durante otros 3 minutos.

Se pone en marcha, de nuevo, la hormigonera y se añade el aditivo previamente mezclado con cierta cantidad de agua de amasado, como se ha indicado anteriormente. Se amasa, finalmente, la mezcla durante 2 minutos más.

Una vez completados los 8 minutos totales de amasado (incluido el tiempo de reposo) se detiene la mezcladora y se registra, nuevamente, la temperatura del hormigón fresco.

Llegado a este punto, el hormigón está listo para la determinación de su consistencia y posterior fabricación de las probetas normalizadas.

2.3.3.2. Segunda fase

En la segunda fase de la investigación, a consecuencia del efecto negativo que ejerce la alta porosidad del árido reciclado sobre la trabajabilidad, se siguió una metodología de amasado que, en la medida de lo posible, evitara la pérdida de fluidez. Ésta consistió en presaturar los áridos gruesos con agua antes de proceder a la mezcla con el resto de componentes.

El protocolo de amasado, diseñado para la fabricación de los hormigones con áridos gruesos presaturados, establece extender la arena, al menos 48 horas antes de su utilización, sobre una superficie lo suficientemente amplia como para que permita la pérdida de humedad de la misma (Fig. 44). Las condiciones ambientales del Laboratorio de Hormigones de la Universidad de Cantabria, como puede comprobarse, son idóneas para este propósito: la arena en el interior de la saca (big-bag) presentaba una humedad, en condiciones de laboratorio, del 0,21% mientras que después de 24 horas extendida se reduce hasta el 0,06%.



Fig. 44. Arena extendida para su secado en condiciones de laboratorio.

Primeramente se pesan los áridos, el cemento, el aditivo y el agua, todos ellos por separado, mediante una báscula de precisión con un error máximo menor del 0,1%. Posteriormente, se mezcla el aditivo con una pequeña cantidad de agua de amasado, tal y como se ha indicado.

En lo referente al procedimiento para la presaturación de los áridos, se parte de un bidón de plástico de 600 mm de altura y 300 mm de diámetro, como el que se muestra en la Fig. 45, en el cual se practican unos orificios, en las paredes laterales, en los 300 mm inferiores, cada uno de ellos separado de sus vecinos 50 mm, con una broca de taladro de 3 mm de diámetro. Igualmente se practican, en la base del bidón,

orificios distanciados entre sí 40 mm. De esta forma, se garantiza que el bidón permita la salida del agua, e impida pérdidas significativas de árido.

Los áridos gruesos, naturales y reciclados, se saturan momentos antes de la amasada, siguiendo los siguientes pasos: se pesan los áridos gruesos naturales y el árido reciclado por separado, a continuación se introducen ambos en el bidón perforado y se registra el peso del conjunto, Fig. 47.



Fig. 45. Fotografía del dispositivo empleado (izda.) y detalle del interior (dcha.) del recipiente para la saturación de los áridos gruesos.



Fig. 46. Componentes para la confección de una amasada.

Después se introduce el bidón perforado en el interior de otro bidón, de dimensiones mayores, que contiene el agua para la saturación, Fig. 48. Se mantiene sumergido durante un tiempo de 10 minutos, para posteriormente, sacarlo y dejarlo escurrir durante otros 10 minutos. El tiempo que se mantiene sumergido el árido es suficiente como para que se alcance el 70-80% de su absorción. Los 10 minutos de escurrido, han sido calculados para que sea el tiempo que necesita el conjunto para eliminar toda el agua sobrante. En estas condiciones, el árido grueso se estima que se encuentra en condiciones de saturación con superficie seca. Tras la operación de escurrido se debe volver a pesar el recipiente a fin de controlar la cantidad de agua incorporada.



Fig. 47. Pesaje y saturación del árido grueso por inmersión en agua durante 10 min.



Fig. 48. Proceso de escurrido (izquierda) y posterior pesaje del árido grueso saturado (derecha).

Posteriormente se añaden los áridos saturados a la hormigonera de eje vertical, después de humedecer el interior de la misma y, finalmente, la arena y el cemento, Fig. 49.



Fig. 49. Incorporación de los áridos gruesos en la hormigonera de eje vertical.

Al igual que en el procedimiento de la primera fase, antes de incorporar a la mezcla los áridos finos y el cemento se da dos vueltas a la hormigonera con el fin de que los áridos gruesos se distribuyan más homogéneamente. En este momento se toma nota de la temperatura ambiental. A continuación, se pone en marcha la hormigonera para añadir la totalidad del agua de amasado durante los primeros 15 segundos. Se amasa la mezcla durante 3 minutos para, después, detener la hormigonera otros 3 minutos (tiempo de reposo). En este intervalo de tiempo se mide la temperatura del hormigón utilizando un termómetro digital de punta metálica. A la finalización del tiempo de reposo, se reanuda nuevamente la amasada durante 2 minutos más y se añade el aditivo. Acabada la amasada, y previamente a los ensayos de consistencia, se vuelve a registrar la temperatura de la masa de hormigón fresco.

2.3.3.3. Tercera fase

En la tercera etapa se modificaron, a fin de mejorar las características del hormigón fresco y endurecido, alguna de las pautas en la fabricación del mismo.

En esta ocasión, los materiales se mantienen en el laboratorio un mínimo de 24 horas antes de la fabricación del hormigón a una temperatura entre 20-25°C. Se pesan, también, por separado las distintas fracciones de árido utilizadas: grava natural,

gravilla y árido reciclado, empleando una balanza con un error máximo del $\pm 0,5\%$. Seguidamente se pesa la arena, el aditivo, el cemento y el agua. Se comprueba, en todos los casos, a excepción del árido reciclado, que su contenido de humedad es inferior al 0,3%. En el caso de la arena, para garantizar estos niveles de humedad, se extiende, tal y como se procedió en la segunda fase, un mínimo de 48 horas antes de la elaboración del hormigón.

En el caso del árido reciclado, se procede de la siguiente manera. Se pesa por separado y se introduce en el bidón perforado (Fig. 45), tal y como se describe en el anterior apartado aunque, en este caso, no se satura la fracción de árido natural. Posteriormente, se pesa el árido reciclado seco junto con el bidón perforado. Se sumerge durante 10 minutos dentro de otro recipiente con agua (Fig. 48). Como ya se ha indicado, al sumergirlo el agua penetra a través de los orificios practicados, consiguiéndose que el árido absorba aproximadamente un 70-80% de su capacidad, aproximándose a su condición de saturado con superficie seca. Transcurridos, en esta ocasión, 5 minutos de escurrido, se vuelve a pesar el bidón con el árido húmedo, para así poder estimar la cantidad de agua incorporada al árido reciclado. Es necesario controlar que la absorción correspondiente a esta pesada se encuentre entre el 4 y 4,5%. El coeficiente de absorción de la grava reciclada, previamente calculado, es ligeramente superior al 5% por lo que si la pesada diera un valor superior a éste, debe continuar escurriéndose hasta que pierda el agua que retiene superficialmente. En este sentido, se comprueba visualmente que al volcar el árido a la amasadora no queda agua residual en el fondo del bidón. Se incorpora así a la amasadora el árido reciclado. Se añaden el resto de áridos gruesos naturales y se inicia la amasada, tras la introducción del cemento y el agua, de la misma forma que se ha descrito en apartados anteriores.

2.3.3.4. Resumen de los procedimientos de amasado

En las siguientes tablas quedan resumidas las condiciones de los áridos gruesos y áridos reciclados, así como el procedimiento común de amasado de las 3 fases de la investigación.

Tabla 4. Resumen de las condiciones de los áridos en el momento de amasado en las distintas fases.

PROCEDIMIENTOS DE AMASADO				
FASE	HORMIGÓN	ÁRIDOS RECICLADOS	ÁRIDOS GRUESOS NATURALES	ARENA
Primera	H-0,65	En condiciones de laboratorio	En condiciones de laboratorio	En condiciones de laboratorio
	H-0,50	En condiciones de laboratorio	En condiciones de laboratorio	En condiciones de laboratorio
Segunda	H-0,65AS	Saturados	Saturados	Extendida (seca)
	H-0,50AS	Saturados	Saturados	Extendida (seca)
Tercera	H-0,55ARS	Saturados	En condiciones de laboratorio	Extendida (seca)
	H-0,45ARS	Saturados	En condiciones de laboratorio	Extendida (seca)

Tabla 5. Resumen de las etapas de amasado.

PROCEDIMIENTO DE AMASADO	
1	Se pesan los áridos, el cemento, el agua y los aditivos por separado con un error máximo del $\pm 0,5$ %.
	Fase 1: Áridos en condiciones de laboratorio
2	Fase 2: Se satura el árido grueso, incluido el reciclado.
	Fase 3: Se satura solamente el árido reciclado.
	Fase 1: Se añaden los áridos gruesos de mayor a menor tamaño junto con cierta cantidad de agua de amasado.
3	Fase 2: Se añade el árido grueso saturado.
	Fase 3: Se añade el árido reciclado saturado y el árido grueso natural de mayor a menor tamaño.
4	Se dan 2 vueltas a la amasadora.
5	Se añade la arena y el cemento.
6	Se pone en marcha la hormigonera y el cronómetro.
7	Se añade el agua de amasado durante los primeros 15 segundos.
8	Se amasa durante 3 minutos.
9	Se detiene la hormigonera durante 3 minutos y se registra la temperatura.
10	Se pone en marcha la hormigonera y se amasa durante 2 minutos.
11	Se añade el aditivo superplastificante durante los primeros 15 segundos
12	Se detiene la hormigonera y se registra la temperatura.

2.3.4. Condiciones de curado

En lo referente a las condiciones de curado y endurecimiento de los hormigones, como se detallará, por una parte se dispone de un ambiente de curado ideal en cámara, con 99% de humedad en aire y una temperatura controlada de 20 ± 2 °C y otra parte se somete a la exposición a la intemperie en ambiente marino tipo IIIa, según lo recogido en la Instrucción EHE-08 [9].

Para el caso de los hormigones curados en intemperie es necesario realizar un análisis de las condiciones meteorológicas, especialmente en el caso de los hormigones analizados a edades cortas. Cuando se comparan las características a los 28 y 180 días de edad de los hormigones de las tres fases, curados en ambiente IIIa, las condiciones climatológicas del mes o el semestre correspondiente tienen especial influencia sobre las características del hormigón. En el caso de los hormigones con 365 días de edad, los hormigones de las tres distintas fases habrán estado sometidos a, aproximadamente, las mismas condiciones promedio de temperatura y humedad. No obstante, como se verá, unos años han sido más calurosos y secos que otros.

2.4. HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

Una de las propiedades más importantes del hormigón es la consistencia o trabajabilidad de la mezcla tras el amasado y con anterioridad al endurecimiento. La consistencia del hormigón fresco es una característica determinante a la hora de que pueda ser dirigido a una aplicación concreta. En particular, la presente investigación se ha focalizado en el estudio de hormigones reciclados de aplicación estructural. En este sentido, es importante que el hormigón, en estado fresco, presente una consistencia lo suficientemente trabajable como para que éste pueda fluir sin segregación a través de las barras y cercos metálicos propios de las estructuras de hormigón armado.

Siguiendo las premisas establecidas para todas las fases de la etapa experimental de investigación, se estableció una consistencia fluida de 11 a 20 cm de asiento del cono de Abrams, como punto de partida.

Por otra parte, es sabido que la hidratación del cemento Portland es un proceso exotérmico y, por lo tanto, durante el mismo se desprende una cierta cantidad de calor. Éste tiene, también, efecto sobre la propia hidratación del cemento y, por lo tanto, en las propiedades finales del hormigón endurecido. Por esta razón, se ha considerado interesante registrar sistemáticamente las temperaturas alcanzadas durante el amasado.

2.4.1. Registro de la temperatura

Durante cada una de las amasadas se ha controlado la temperatura del hormigón fresco en dos instantes muy bien definidos. La primera medida se registra durante el tiempo de reposo de la mezcla, transcurridos 3 minutos de amasado. La segunda de ellas se anota a la finalización de la fabricación del hormigón, transcurridos 8 minutos desde el inicio de la misma.

La mayoría de las reacciones de hidratación o fraguado del cemento son termodinámicamente exotérmicas. Este efecto favorece la generación de la microestructura que da consistencia al hormigón endurecido. No obstante, si el calor cedido por la masa de hormigón fresco es excesivo, puede provocar evaporación y, en consecuencia, la pérdida de agua de amasado. Llegado a este punto surgen dos

consecuencias negativas. Por un lado, la pérdida de agua de amasado redundará en la pérdida de trabajabilidad y, por otro lado, supone una pérdida de la cantidad de agua necesaria, que dispone el cemento para su correcta hidratación. En este sentido, la primera de las consecuencias (la pérdida de trabajabilidad) imposibilita que el hormigón pueda rellenar todos los huecos de un encofrado y, al mismo tiempo, fluir entre las armaduras del mismo. Por otro lado, la merma de agua a disposición del cemento supone, necesariamente, una pérdida sustancial en la mayoría de las prestaciones del hormigón endurecido puesto que, especialmente en el interior del hormigón, perdurarán ciertas cantidades de cemento sin hidratar y sin la posibilidad de recibir agua en el transcurso de la vida en servicio de la estructura.

Evidentemente, el conocimiento de la evolución de la temperatura del hormigón en estado fresco proporciona, del mismo modo, información en cuanto al momento en el que da comienzo la hidratación del cemento.

En general, la velocidad de hidratación del cemento está íntimamente relacionada con la finura del mismo. La superficie específica Blaine aporta información en cuanto a la superficie efectiva de cemento, por unidad de masa, disponible para entrar en contacto con el agua de amasado y, en consecuencia, capacidad reactiva. Así, un cemento finamente molido hidrata más rápidamente que otro de grano mayor, alcanzando, también, resistencias mayores en tiempos menores.

2.4.2. Consistencia o trabajabilidad

El ensayo de consistencia del cono de Abrams se realiza según la norma *UNE-EN 12350-2:2009. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento* [126], llenando el molde cónico correspondiente en tres etapas, cada una de ellas compactada con 25 golpes de barra acabada en punta.

En primer lugar, es necesario humedecer el interior del molde cónico y la superficie de apoyo de la chapa metálica que actúa como base. En la mayoría de las ocasiones el proceso lo realizan dos personas. Mientras una de ellas pisa las aletas del cono de Abrams para que éste no se desplace y escape el material entre la chapa y el cono, la otra persona se encarga de llenar el molde tomando, mediante un cogedor, el material convenientemente homogeneizado. Se llena el cono hasta alcanzar 1/3 de su altura y se compacta mediante 25 golpes, con una barra de acero de 16 mm de diámetro

acabada en punta, formando una espiral desde el exterior hacia el interior. Seguidamente, se llena el cono hasta alcanzar los 2/3 de altura y se compacta de la misma manera, en este caso “cosiendo” las 2 tongadas, es decir, atravesando completamente la tongada que se está compactando y alcanzando la inmediatamente inferior. Finalmente, se completa el molde (3/3 de su altura) y se compacta de igual forma que en la etapa anterior.

Llegado este punto, se debe allanar y enrasar el hormigón en la abertura estrecha del cono de Abrams. Una vez retirado el posible exceso de material y limpiado el contorno del molde en contacto con la chapa inferior, se procede al levantamiento del cono. Este proceso debe realizarse con la mayor rapidez posible, procurando no generar un vacío de aire capaz de elevar y arrastrar el contenido del molde con el propio cono (Fig. 50).

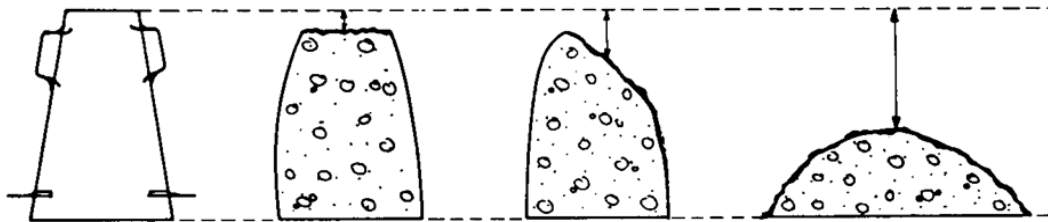


Fig. 50. Medida del asiento utilizando del cono de Abrams.

La pérdida de altura de la muestra desmoldada (error $\pm 0,5$ cm) cuantifica la consistencia del hormigón y es habitual realizar esta medida utilizando el propio cono y la barra de compactación tal y como se muestra en la Fig. 51. La Tabla 6 clasifica las distintas consistencias del hormigón según el asiento del cono de Abrams. Tal clasificación se encuentra obsoleta con las modificaciones introducidas en el año 2009 en la norma correspondiente, indicándose, ahora, que la consistencia del hormigón en estado fresco viene únicamente determinada por el asiento, expresado en cm, del cono de Abrams [126].

Existen otras metodologías adecuadas para la determinación de la consistencia, como por ejemplo el método Vebe también adecuado para la determinación de la trabajabilidad en laboratorio.

No obstante, el método del cono de Abrams por su sencillez y aplicabilidad, tanto en laboratorio como en obra, es el más extendido.



Fig. 51. Medida de la consistencia en el ensayo del asiento del cono de Abrams.

Tabla 6. Consistencia del hormigón fresco determinada según el asiento del cono de Abrams.

CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN FRESCO CONO DE ABRAMS (UNE-EN 12350-2 antes de 2009)	
Asiento [cm]	Consistencia
0 - 2	Seca
2 - 5	Plástica
5 - 11	Blanda
11 - 20	Fluida

Otro procedimiento para medir la consistencia del hormigón se describe en la norma *UNE-EN 12350-5:2009. Ensayos de hormigón fresco. Parte 5: Ensayo de la mesa de sacudidas* [127]. En este caso se limpian y humedecen la mesa y el molde para, después, llenar este último en 2 tongadas, cada una de ellas compactada, igualmente, con otros 25 golpes mediante una barra de acero de 16 mm de diámetro y acabada en punta. Una vez compactado el hormigón fresco se enrasa y desmolda. A continuación, se procede a efectuar 15 desplomes (elevar y dejar caer la mesa) en un tiempo de 15 segundos, a razón de un desplome por segundo. La medida del

aumento porcentual del diámetro, en dos direcciones perpendiculares, de la base inferior del cono proporciona el valor de la consistencia del hormigón.

2.4.3. Preparación de las probetas normalizadas

El llenado de los moldes cilíndricos para la obtención de probetas normalizadas (150 mm de diámetro y 300 mm de altura) se realiza en dos o en tres etapas, según el método adoptado, compactadas cada una de ellas mediante picado con barra, mesa vibratoria o bien con ayuda de una aguja vibradora, Fig. 52, [124,125]. Con este procedimiento se consigue expulsar la máxima cantidad de aire retenido. Es práctica habitual, también, golpear lateralmente el molde una vez éste se haya llenado completamente para facilitar dicha expulsión.

Tabla 7. Resumen de los métodos de compactación utilizados para la fabricación de probetas normalizadas de hormigón.

PROCEDIMIENTOS DE COMPACTACIÓN		
FASE	HORMIGÓN	MÉTODO
Primera	H-0,65	Picado con barra de acero (16 mm) en 3 tongadas.
	H-0,50	Picado con barra de acero (16 mm) en 3 tongadas.
Segunda	H-0,65AS	Mesa vibratoria, 20 segundos, en 2 tongadas.
	H-0,50AS	Mesa vibratoria, 20 segundos, en 2 tongadas.
Tercera	H-0,55ARS	Aguja vibradora, 20 segundos en 2 tongadas.
	H-0,45ARS	Aguja vibradora, 20 segundos en 2 tongadas.

En la primera fase, se observa que la masa de hormigón ofrece mayor resistencia a la compactación manual a medida que aumenta el porcentaje de árido reciclado, así como que el tiempo que dicha masa es trabajable se ve reducido cuando se trate de hormigón con alto contenido de árido reciclado.

Independientemente del método de compactación utilizado, en primer lugar se impregna el interior del molde de probetas de hormigón con algún tipo de desmoldante para facilitar su posterior desencofrado. En el caso que nos ocupa, se aplica a los moldes (tras su limpieza) una fina película de aceite que los protege de la corrosión, durante los periodos de almacenamiento, y sirve, al mismo tiempo, de

desmoldante. Los moldes escogidos han sido, todos ellos, de dimensiones normalizadas (150 mm de diámetro por 300 mm de altura) fabricados en acero.

En lo referente al método de compactación de la primera fase de la investigación, el picado con barra se ha realizado utilizando una barra de 16 mm de diámetro, idéntica a la empleada en la compactación del cono de Abrams, y el llenado del molde se completa, también, en 3 tongadas cada una de ellas compactada con 25 golpes realizados en forma de espiral desde el exterior al interior y acabando en el centro (Fig. 52). Una vez compactadas las 3 tongadas, se procede a aplicar 10 golpes laterales a fin de expulsar una mayor cantidad de aire retenido durante la amasada. Tras enrasar el hormigón en la cara libre del molde, se cubre éste con arpilleras húmedas, manteniéndose en estas condiciones durante 24 horas.



Fig. 52. Llenado y compactación, mediante picado, de los moldes normalizados.

En la segunda fase, se ha utilizado como método de compactación de las probetas de hormigón una mesa vibradora modelo Ibertest C-161, que consiste en una plataforma de acero con un vibrador rotatorio eléctrico que es activado por un interruptor Fig. 53. La mesa se ajusta a una base fija de acero a través de cuatro cojinetes de caucho. El vibrador eléctrico transmite la vibración a la mesa y al molde lleno de hormigón fresco en cada una de las dos etapas de compactación que se han llevado a cabo sobre cada una de las probetas. El equipo tiene una potencia de 360

W y dispone dos frecuencias de vibración: 3000 y 3600 revoluciones por minuto (rpm).

La mesa vibradora supone un importante ahorro de tiempo y esfuerzo ya que, por sus dimensiones, permite compactar 4 probetas simultáneamente. Operativamente, se han realizado dos compactaciones en cada una de las probetas. En primer lugar, tras el llenado de los moldes con hormigón fresco hasta la mitad de la altura, se procede a vibrar el conjunto (mesa y probetas) durante un tiempo de 20 segundos. A continuación, se llenan y enrasan los 4 moldes fijados en la mesa de vibración y se compacta de nuevo, esta segunda capa, durante otros 20 segundos. Finalmente, si es necesario, se rellenan y enrasan nuevamente y se mantienen en las mismas condiciones de fabricación durante 24 horas.



Fig. 53. Mesa vibratoria para la compactación de los moldes normalizados.

En lo que respecta al método de compactación de la tercera fase, se optó por el método de inmersión de aguja vibradora en el seno del hormigón fresco. Para ello, se utiliza una aguja vibradora de 25 mm de diámetro y 300 mm de longitud conectada a un motor, de la marca Enarco modelo AVMU, capaz de proporcionar 14000 vibraciones por minuto (Fig. 54). El procedimiento consiste en, primero, llenar los moldes normalizados de hormigón hasta la mitad de su altura, introducir la aguja vibradora en el hormigón y vibrar durante 20 segundos. Se tiene, en este procedimiento, la precaución de acabar siempre el periodo de 20 segundos fuera del

hormigón para que así no quede huella de la aguja y los áridos se distribuyan homogéneamente. Una vez compactada la primera tongada, se procede a llenar el molde completamente. En este momento se realiza una nueva compactación por el mismo método de otros 20 segundos. El tiempo de vibrado es un factor importante, ya que un tiempo mayor de 20 segundos puede provocar la segregación de los áridos y un tiempo inferior la insuficiente extracción del aire retenido.



Fig. 54. Llenado y compactación, mediante aguja vibradora, de los moldes normalizados.

Una vez las probetas han sido fabricadas y ha transcurrido el periodo de 24 horas en las mismas condiciones de fabricación, una parte de ellas se traslada a una cámara de humedad para su curado en condiciones óptimas (Fig. 55 Izda.). Por otra parte, el mismo número de probetas son llevadas la terraza de la Escuela de Caminos de Santander, en exposición directa al ambiente marino IIIa (Fig. 55 Dcha.).



Fig. 55. Imagen de las probetas almacenadas en el interior de la cámara de curado (izda.) y en exposición al ambiente marino (dcha.).

2.5. PROPIEDADES FÍSICAS DEL HORMIGÓN RECICLADO

De cara a conocer las propiedades de durabilidad de los hormigones reciclados, se han llevado a cabo determinaciones sistemáticas de la densidad y porosidad del hormigón endurecido, así como de la evolución de estas propiedades frente al tiempo. A continuación, se describen, detalladamente, los procedimientos experimentales seguidos en cada caso.

Para los ensayos de determinación de la densidad, la porosidad y la absorción de agua, se han utilizado muestras cilíndricas de aproximadamente 90 mm de altura y 150 mm de diámetro, obtenidas a partir de probetas cilíndricas normalizadas.

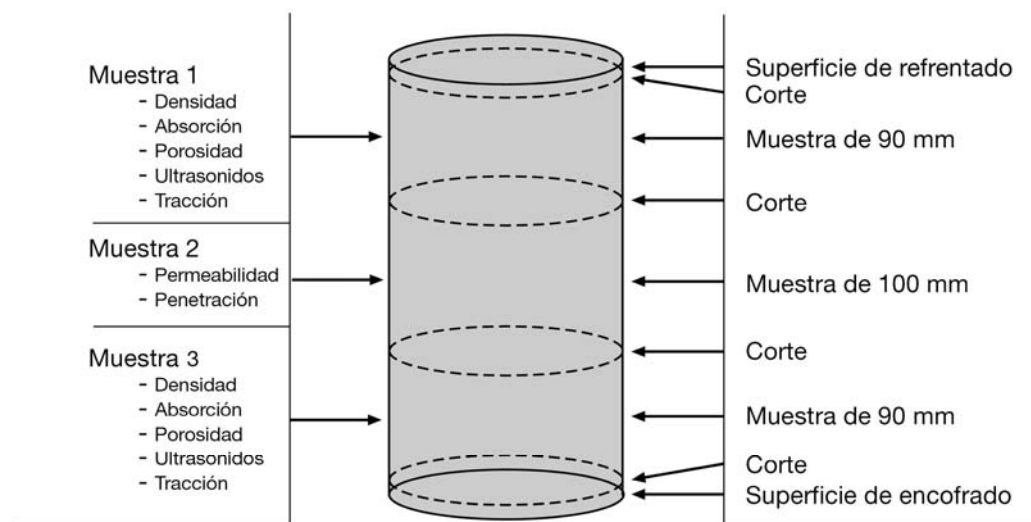


Fig. 56. Esquema del despiece de las probetas cilíndricas normalizadas para la realización de los distintos ensayos.

Para el despiece, se parte de probetas cilíndricas normalizadas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, que se cortan utilizando una sierra de disco de diamante, obteniéndose así, dos muestras de, aproximadamente, 90 mm de altura y una tercera de 100 mm de altura que corresponde, en todos los casos, al tercio medio de la probeta, Fig. 56. En efecto, en primer lugar se realiza un corte de unos 10 mm de espesor desde el extremo inferior de la probeta (cara encofrada en el molde) para eliminar ésta. Posteriormente, se elimina la cara superior de la probeta, o cara de refrentado, manteniéndose intacta la superficie original lateral de la probeta. Una vez

concluido el proceso de descabezado de los extremos de la probeta, se realiza otro corte, esta vez a 90 mm, para obtener la Muestra 1. Con otro corte de 100 mm de espesor, se obtiene la muestra central, o Muestra 2, destinada a los ensayos de permeabilidad y penetración de agua bajo presión. La porción restante, de también 90 mm de espesor, proporciona la Muestra 3 que se utiliza, al igual que la Muestra 1, para los ensayos de densidad aparente y relativa, coeficiente de absorción y porosidad abierta.

En la Fig. 57, se aprecia el aspecto que presentan las distintas muestras obtenidas a partir del corte de las probetas cilíndricas normalizadas.



Fig. 57. Probeta normalizada (izq.) y aspecto de las muestras obtenidas a partir del despiece de probetas cilíndricas normalizadas de hormigón (dcha.).

2.5.1. Densidades relativas, aparentes y saturadas

El procedimiento seguido para el cálculo de las densidades y porosidades se basa en la norma *UNE-EN 12390-7:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido* [128]. Para ello, se tomaron dos probetas de cada una de las dosificaciones, cada uno de los ambientes y cada una de las seis clases de hormigón, para tres edades diferentes, y se cortaron transversalmente de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado anterior.

La determinación de la densidad aparente conlleva la medición del peso seco y el volumen aparente (V_a) de la misma. Para la determinación del volumen aparente se optó por el método de inmersión, en balanza hidrostática, de las muestras en condiciones de saturación. Para ello, tal y como se procedió en la caracterización física de los áridos, las muestras han sido sometidas a un proceso de extracción de aire de la porosidad mediante vacío, un llenado de los poros con agua, favorecido por la sobrepresión creada por el vacío y, finalmente, una permanencia en inmersión a presión atmosférica durante 24 horas. Transcurridas las 72 horas que supone esta metodología, las muestras se secan superficialmente y se sumergen en agua para determinar, según el Principio de Arquímedes, el volumen aparente de las mismas.

Otras metodologías sugieren llenar los poros accesibles (exteriormente) con algún tipo de material impermeabilizante, como por ejemplo parafina, antes de la inmersión en la balanza hidrostática y, por supuesto, sin necesidad de saturación de las muestras. Sin embargo, el primero de los métodos descritos proporciona también el peso de la muestra saturada con superficie seca, esto es, el peso de la muestra seca más el peso del agua que ha llenado la porosidad accesible de la misma. Por lo tanto, la diferencia entre el peso saturado con superficie seca (P_{ssg}) y el peso seco (P_g), tras el secado en estufa, proporciona directamente el volumen de los poros accesibles (h_a), ya que la densidad del agua en condiciones de laboratorio es de 1 g/cm³. Así, la relación entre el volumen de los poros y el volumen aparente de la muestra proporciona directamente la porosidad accesible o porosidad abierta de la muestra.

Además, conocido el valor de la porosidad accesible puede determinarse igualmente la densidad relativa. La densidad relativa es el cociente entre la masa de la muestra, proporcionada por el peso seco, y volumen relativo de la muestra V_r (cm³), siendo éste:

$$V_r = V_a - h_a \quad (21)$$

El volumen aparente, con la muestra saturada de agua, se midió sumergiendo ésta, utilizando un cordel de sujeción, dentro de un recipiente lleno de agua y dispuesto sobre una báscula, tarada con el cordel de sujeción sumergido, antes de realizar cada medida. Finalmente, después de registrar el peso saturado y el volumen aparente, se

introdujeron las muestras en una estufa para eliminar toda la humedad y alcanzar peso constante.

El volumen aparente (V_a), volumen relativo (V_r), la densidad aparente (D_a), la densidad relativa (D_r) y la densidad saturada (D_s) se determinan de acuerdo a la formulación propuesta en (10), (11), (12), (13) y (14), respectivamente.

2.5.2. Determinación de la porosidad accesible

Otra manera de expresar la capacidad de absorción del material es en términos de la porosidad accesible. El procedimiento normalizado queda recogido en la norma UNE-EN 1936:2007: *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total* [129]. La relación entre el volumen de los poros accesibles, calculada por diferencia de peso saturado y peso seco, con el volumen aparente de la muestra, expresado en tanto por ciento, proporciona la porosidad accesible del material. Ver formulación propuesta en (16).

Ya se ha comentado que la porosidad accesible o abierta y el coeficiente de absorción son parámetros íntimamente ligados. Estas propiedades cuantifican, respectivamente, el volumen de huecos accesibles y su capacidad de retener ciertas cantidades de agua. Como fue descrito en capítulos anteriores, el hormigón en general, y en particular el reciclado, presentan dos tipos de porosidad atendiendo a la posibilidad de interacción de éstas con el entorno. Por una parte, se encuentra la porosidad no accesible, inaccesible o aislada, la cual está representada por todos aquéllos poros, independientemente de su origen, que no son accesibles desde el exterior del hormigón mediante mecanismos básicos de presión atmosférica. Frente a ella, se encuentra la porosidad accesible, formada por poros, cavidades y capilares de distintos tamaños y/o diámetros. Esta última porosidad es, en gran medida, responsable, junto con la capilaridad, de la durabilidad físico-química de los hormigones, especialmente cuando éstos se encuentran sometidos a ambientes agresivos. Esta red de poros y capilares supone un mecanismo de transporte para aquéllos agentes dañinos externos, como por ejemplo el propio CO_2 atmosférico en cualquier entorno o el electrolito cloruro en ambientes marinos, que puedan afectar negativamente al propio hormigón o a los aceros de armado de los mismos por fenómenos de corrosión.

2.5.3. Determinación del coeficiente de absorción

La capacidad de absorción de agua de los hormigones endurecidos puede determinarse valorando el volumen de los poros que se ha llegado a saturar por el procedimiento descrito en el apartado 2.5.1.

Una vez conocido el peso de la probeta completamente saturada de agua (porosidad accesible) y el peso de la probeta seca (peso constante), apartado 2.5.1, puede calcularse el coeficiente de absorción. La diferencia entre los pesos saturado y seco, proporciona el peso de agua absorbido por la muestra, y su relación con el peso de la probeta seca, expresado en tanto por ciento, el coeficiente de absorción calculado según la formulación propuesta en (15).

2.5.4. Determinación de la macroporosidad mediante análisis digital de imágenes

Como complemento a la caracterización física de los hormigones reciclados, se ha desarrollado una metodología experimental capaz de cuantificar la macroporosidad accesible y no accesible mediante el análisis digital de imágenes. El objetivo de este análisis es la determinación de la macroporosidad de las muestras de hormigón reciclado en base al análisis digital de imágenes, previamente adquiridas, sobre superficies de corte del hormigón. Así, se ha desarrollado un programa informático que permite, previa preparación de las superficies de las muestras, realizar un análisis de la porosidad mayor de 100 μm . El método, la preparación de muestras y el funcionamiento del programa, se describen a continuación.

2.5.4.1. Preparación de las muestras

Cuando se trata, como es el caso, del estudio de hormigón endurecido, se parte de probetas cilíndricas normalizadas de hormigón, de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. Las mismas se cortan, al igual que las muestras utilizadas en las determinaciones de las propiedades físicas, utilizando una sierra de disco de diamante, obteniéndose en este caso dos superficies de análisis idénticas por cada corte.

Una vez obtenidas las secciones transversales de las probetas se ha de proceder a la preparación de su superficie. Esta operación es fundamental para la obtención de

buenos resultados en el análisis, dado que debe permitir que la superficie ocupada por los poros sea fácilmente observable y cuantificable.

Se evaluaron tres modos alternativos de preparación para la superficie de las probetas.

a) Recubrimiento de azufre y posterior pulido

El primer método probado, para la preparación de la superficie, consistió en cubrir la misma con una capa de azufre, que previamente se había fundido en un calentador, de tal modo que éste pudiera penetrar en la porosidad de la faceta de corte.

El azufre posee un punto de fusión relativamente bajo, 115 °C (388 K), lo cual permite aplicar el material, en estado líquido, a cualquier superficie, con una buena distribución por todos los huecos. Además, el enfriamiento a temperatura ambiente es, también, rápido. El contacto del azufre líquido con el hormigón es suficiente como para que el primero cristalice y endurezca. Además, la dureza del material cristalizado es suficiente como para que pueda ser retirado el sobrante mediante desbastado, con lijas de distinto grano, hasta alcanzar idéntico nivel al de la superficie del hormigón para la identificación de los poros. Otro factor que motivó la prueba de esta alternativa fue el característico color (amarillo) del azufre, ya que parece contrastar muy bien con el color del hormigón cuando se aloja en el interior de los poros.

Una vez endurecido el azufre, se procede por tanto al pulido de la probeta hasta eliminar casi por completo la capa aplicada a la superficie, quedando solamente en el interior de los poros y proporcionando un contraste apreciable entre la superficie de la probeta y dichos poros. De este modo, el software puede reconocer y cuantificar la superficie porosa a través de una imagen fotográfica.

Sin embargo, este método de preparación tiene algunos inconvenientes. En primer lugar, fundir el azufre es un proceso laborioso que requiere de una temperatura uniforme aplicada durante un tiempo relativamente largo que dependerá de la cantidad de material. Después, el proceso de aplicación debe ser, también, lo suficientemente rápido como para evitar que el azufre cristalice antes de entrar en contacto con la probeta y pueda fluir hasta rellenar los poros. Además, la distribución

manual del azufre en la superficie de la probeta es compleja y peligrosa puesto que se trata de un líquido a alta temperatura.

Como ya se ha comentado, después de lograr una capa uniforme en la superficie, se debe proceder a un posterior pulido. En esta etapa, se encontró que, el azufre contenido en el interior de los poros podía ser parcialmente arrancado, reduciéndose así la eficacia de esta solución.

b) Utilización de cemento tintado

Como segunda opción para dar contraste a los poros de la superficie se utilizó un cemento blanco, de secado rápido, que se coloreó con amarillo mediante un potente tinte. Este cemento, una vez tintado, es esparcido por la probeta de tal manera que los poros quedan rellenos por la pasta amarilla. Posteriormente, y después de que la pasta de cemento hubiera endurecido, se procede a retirar el material sobrante que no ha penetrado en los poros, mediante un simple aclarado de la probeta con un paño húmedo.

Este método, no resultó de gran ayuda para localizar los poros ya que el tinte utilizado para dar color al cemento blanco tintaba, también, la superficie global de la probeta y, por otra parte, en el lavado se perdía gran cantidad de material coloreado, haciendo completamente inútil esta preparación.

c) Pintura negra y cemento blanco

Como ya se ha indicado, localizar los poros que han quedado expuestos tras el corte requiere lograr un buen contraste entre la superficie de la probeta y el poro. En este sentido, se optó por utilizar dos colores que proporcionasen un alto contraste, el blanco y el negro. Para ello, se pintó la superficie de la probeta con una finísima capa de pintura acrílica, de color negro mate, aplicada mediante un difusor-atomizador para, después, rellenar los poros con una masa de color blanco capaz de endurecer.

Este último proceso de preparación de muestras, es el que mejores resultados ha proporcionado y se describe en detalle en lo que sigue.

En primer lugar, una vez obtenidas las secciones transversales mediante el corte de probetas cilíndricas normalizadas de hormigón, se limpia con un paño la superficie a

tratar, para así eliminar cualquier resto de polvo o suciedad, recomendándose la utilización de una pistola de aire a presión para vaciar completamente los poros.

Posteriormente, se procede a aplicar el color de fondo a la superficie plana de la probeta utilizando un esmalte sintético de color negro mate; la utilización de colores mate evita los reflejos en las fotografías que se realizarán después. Únicamente se dará una mano fina de pintura a fin de asegurar que los poros no se saturan con el esmalte. Tras 24 horas de secado, la muestra resulta como se observa en Fig. 58.

En tercer lugar, se procede a impregnar la superficie con un cemento blanco, de secado rápido, capaz de llenar un gran número de cavidades de la superficie de la muestra. Para asegurar que el cemento penetra en todos los poros, se deben realizar movimientos circulares, utilizando los dedos, sobre la superficie, y cuando la masa sea consistente, con una última pasada se rellenan los poros más pequeños (Fig. 59).



Fig. 58. Aspecto de la superficie de corte tras la aplicación del esmalte de fondo de color negro.

Pasados 15 minutos, se retira con especial cuidado el exceso de cemento de la superficie del corte, manteniéndose la pasta blanca en el interior de los poros. Finalmente, transcurrida 1 hora, se limpia la probeta con un paño húmedo a fin de resaltar el color negro de fondo en la fotografía.



Fig. 59. Aspecto de la superficie de corte en el momento de la aplicación de la pasta de cemento blanca.

El fundamento para la determinación de la porosidad mediante el análisis digital de imágenes, se basa en el reconocimiento de los poros gracias al contraste que se consigue con este tratamiento superficial de la muestra (Fig. 60).

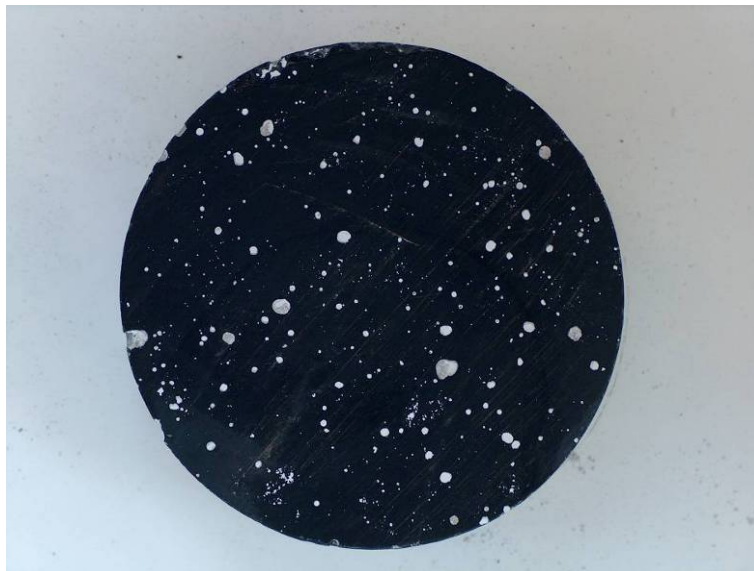


Fig. 60. Aspecto de la superficie preparada, con fondo de negro y color blanco para la porosidad, para la toma de imágenes de análisis.

Otro de los procesos claves es, también, el correcto posicionamiento de la muestra a la hora de tomar la fotografía, así como la propia toma de ésta. Debido a ello, se tendrá en cuenta:

- Evitar la utilización como fondo de fotografía, área fuera de la superficie a analizar, de los colores blanco o negro o cualquiera que pueda ser confundido con ellos.

La iluminación de la probeta debe de ser lo mas uniforme posible, evitando las sombras sobre el fondo y los brillos muy marcados en la superficie.

El fondo escogido para la fotografía, como se muestra en la Fig. 61, es de color rojo por su buen contraste con el negro y blanco, que corresponden con la superficie y porosidad del hormigón, respectivamente. Se fotografía, junto con la probeta, un cuadrado de dimensiones conocidas (40 x 40 mm) para la calibración del programa y, así, poder incluir la posibilidad de análisis de secciones de muestras con dimensiones distintas a los 150 mm de diámetro habituales de las probetas normalizadas de hormigón.

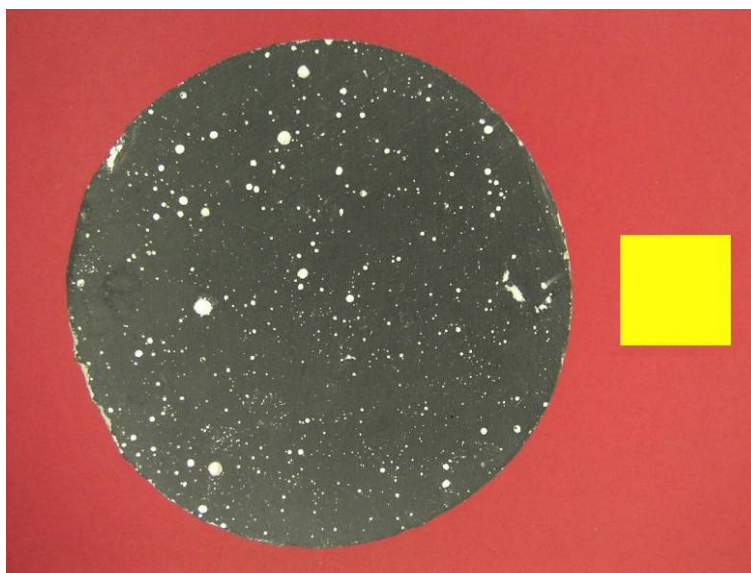


Fig. 61. Macrografía de la superficie totalmente preparada y sobre fondo rojo para mayor contraste entre colores; a la derecha puede observarse el cuadrado (40x40 mm) de calibración.

En términos generales, el tamaño mínimo de los poros susceptible de ser detectado está limitado por la resolución de la imagen; los poros más pequeños susceptibles de ser analizados son aquéllos que tienen un tamaño digital de 1 píxel. En este caso, con la debida resolución de la imagen, el tamaño mínimo cuantificable se corresponde con poros de 100 μm . Tamaños menores no deben considerarse, ya que pueden estar confundidos con suciedad localizada en la probeta, debida, principalmente, a la pasta de cemento utilizada en el llenado de los huecos, o incluso, a suciedad en la propia óptica de la cámara fotográfica.

2.5.4.2. Software de análisis

El software de análisis de imágenes se ha desarrollado íntegramente en Matlab (Anejo II) y, en cuanto al funcionamiento, parte de fotografías digitales realizadas sobre superficies, como se ha visto, previamente preparadas, todas con el mismo formato.

A partir de la imagen original se generan, gracias al programa, otras tres imágenes diferentes.

- Una primera imagen que identifica los poros, representada por un fondo negro y la porosidad blanca para determinar el área, en píxeles, correspondiente a la porosidad.
- Se crea una segunda imagen, totalmente negra exceptuando el cuadrado amarillo de la imagen original, que pasa a ser, ahora, blanco con fondo negro, permitiendo así evaluar la correspondencia escalar entre el área expresada en píxel y el área en mm^2 .
- Por último, una nueva imagen con fondo blanco, salvo el área que corresponde a la probeta en color negro, a fin de determinar el área total que se está evaluando. Seguidamente, partiendo de esta tercera imagen, se obtienen los bordes de la probeta y a partir de éstos el centro y el radio de la misma.

Los resultados más relevantes que proporciona el programa son, como se describe en detalle más adelante, los siguientes:

- Distribución de poros en función de la distancia al centro de la muestra.

- Distribución del tamaño de los poros con respecto a la distancia radial al centro de la probeta.
- Representación del tamaño del poro detectado con respecto del número de ellos.

El programa se ha desarrollado con la preocupación de que fuera lo más intuitivo y sencillo posible. Los pasos que se deben seguir para analizar una imagen se detallan a continuación.

En primer lugar, se inicia el programa seleccionando el fichero procesado_poros.m si se usa la versión de MATLAB o bien el ejecutable que se haya creado. Cuando se ejecuta el programa se ve una interfaz gráfica, Graphical User Interface o GUI, como la que se muestra en la Fig. 62.

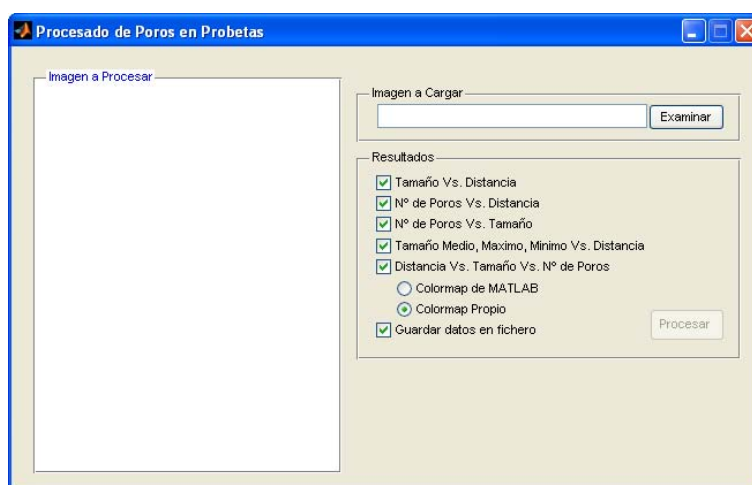


Fig. 62. GUI del programa al arrancar.

Una vez que se tiene cargada la GUI, se debe seleccionar la imagen a procesar; para ello se escribe el nombre de la imagen o se busca la ubicación de ésta mediante la opción Examinar. Si se ha pulsado el botón Examinar, se abrirá una ventana como la que se muestra en la Fig. 63, en la que se permite seleccionar el fichero deseado.

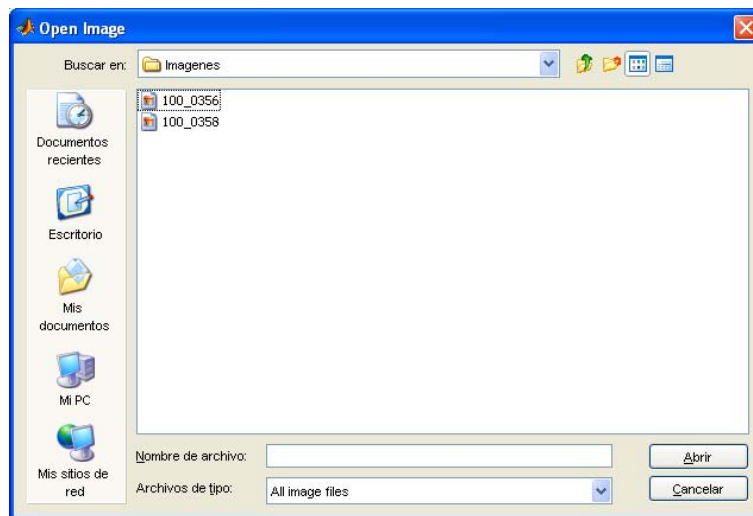


Fig. 63. GUI para cargar la imagen a procesar.

Es necesario escribir la ruta completa cuando la imagen no se encuentre en el directorio actual. Una vez cargado el fichero imagen, en la GUI del programa se obtiene una vista previa de dicha imagen para confirmar que, efectivamente, es la imagen que se desea procesar.

Cuando esté seleccionada la imagen, el botón Procesar pasa a estar activo y se permite comenzar el proceso de análisis haciendo clic sobre él. Antes de proceder al análisis, se deben seleccionar los resultados que se desean obtener y que, por defecto, se mostrarán todos seleccionados. Cabe mencionar que los resultados que se seleccionen serán los únicos que se guarden en el fichero de datos.

Como puede observarse, la imagen debe tener un fondo rojo iluminado lo más uniformemente posible. Es importante que el fondo rojo abarque toda la imagen, de forma que si al obtener la fotografía hubiera zonas ajenas a la cartulina roja, la imagen deberá ser recortada utilizando cualquier programa de edición de imágenes que permita guardarla posteriormente en formato JPG. La imagen contiene, también, un cuadrado amarillo, a la derecha de la probeta, con sus lados lo más paralelos posible a los bordes de la foto. Si esto no fuera así, porque la fotografía no se tomó correctamente, deberemos recurrir, nuevamente, a un editor de imágenes para corregir este defecto. Y por último, y más importante, la imagen debe contener la probeta pintada de negro con la macroporosidad coloreada en blanco, Fig. 64.

Si se activa la opción Guardar datos en fichero, cuando se presione el botón Procesar se abrirá otra ventana en la que se proporciona la opción de elegir el fichero en el que se guardarán los datos. Una vez que comience el proceso de análisis cambiará el título de la GUI y se podrá ver el proceso en la ventana de comandos de MATLAB, si estamos usando la versión de MATLAB, o en una ventana de MS-DOS si hemos optado por usar la versión ejecutable, Fig. 65.

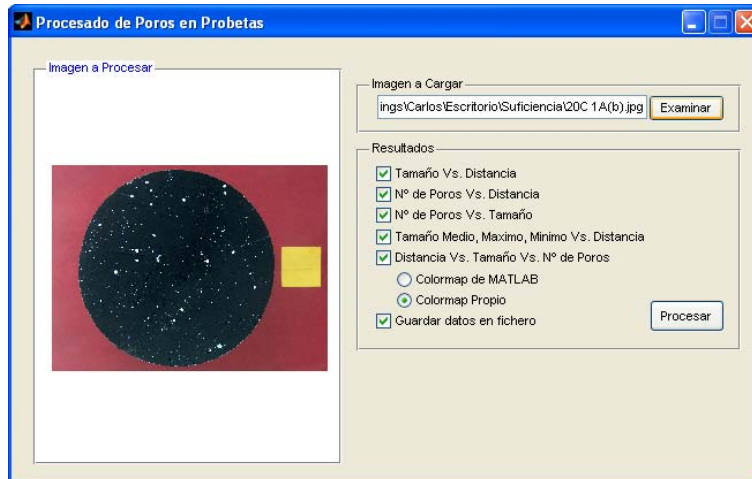


Fig. 64. GUI del programa una vez cargada la foto.

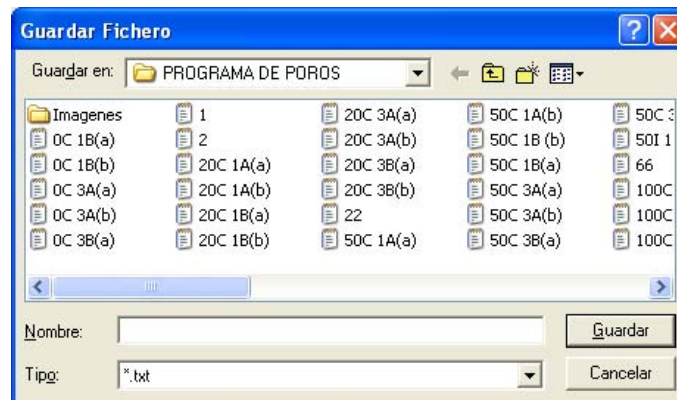


Fig. 65. GUI para guardar los datos en un Fichero.

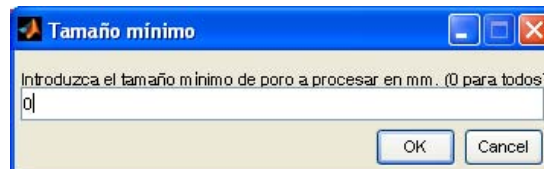


Fig. 66. Ventana que permite seleccionar el tamaño mínimo de poro que se pretende identificar.

El programa permite imponer un criterio de selección de poros por tamaño. Si se escoge tamaño "0", el tamaño mínimo del poro a analizar será el correspondiente al tamaño de un píxel, si existe algún poro de ese tamaño, Fig. 66.

Ciertos parámetros se pueden modificar en caso de que sea necesario. Dichos parámetros se encuentran al comienzo de la función *procesado.m*, código que se adjunta en los anexos de la Tesis, los cuales son los siguientes:

- *Centro = 1*: Calcula el centro de la circunferencia.
- *Centro = 2*: Calcula el centro de la circunferencia, buscando el centro de la región con mayor "intensidad". La región de mayor intensidad viene dada por una intensidad superior a la del *umbral_region*.
- *Centro = 3*: Calcula el centro de la circunferencia buscando el centroide de las regiones con mayor "intensidad". Este mayor viene dado por una intensidad superior a la del *umbral_region*.

En las pruebas realizadas, la configuración más apropiada para los cortes circulares de 150 mm de diámetro, es *Centro = 2*.

- *Umbral_region*: Valor sobre 1 cuya utilidad viene explicada para el parámetro *centro*.
- *Umbral*: A la hora de buscar los poros, es necesario disponer de una imagen binaria, es decir, solo blanco y negro (no a escala de grises) y esta variable es la que delimita qué intensidad de gris va a ser considerado negro y cual blanco. Los tonos grises toman valores entre 0 y 255.
- *Tonogris > umbral* es considerado como Blanco.
- *Tonogris = umbral* es considerado como Negro.
- *N_label*: Parámetro usado en la función *BWLABEL*, puede ser 4 u 8. En las pruebas, la mejor configuración es *N_label = 4*.
- *Imagenes_debug = 1*: Solo se muestran las imágenes de interés.

- *Imagenes_debug = 2*: Se muestran las imágenes de interés y algunas imágenes para comprobar el correcto funcionamiento.
- *Valor_real_x*: Valor en mm del lado del cuadrado de color amarillo según la coordenada cartesiana x.
- *Valor_real_y*: Valor en mm del lado del cuadrado de color amarillo según la coordenada cartesiana y.
- *LimiteR_amarillo*: Limite inferior de lo que se considera el color del cuadrado amarillo, es decir, si la componente de rojo es mayor, sí se considera amarillo.
- *LimiteG_amarillo*: Limite inferior de lo que se considera el color del cuadrado amarillo, es decir, si la componente de verde es mayor, sí se considera amarillo.
- *LimiteB_amarillo*: Limite superior de lo que se considera el color del cuadrado amarillo, es decir, si la componente de azul es menor, sí se considera amarillo.
- *LimiteR_rojo*: Límite inferior de lo que se considera el color de fondo rojo.
- *LimiteG_rojo*: Límite superior de lo que se considera el color del fondo rojo.

Cada componente de color toma, igual que los tonos grises, valores comprendidos entre 0 y 255.

El programa proporciona los resultados del análisis en dos formatos. Por un lado en forma de gráfico (jpg) y, por el otro, en forma de tabla de resultados. En las Fig. 67, Fig. 68 y Fig. 69, se muestran los resultados, a modo de ejemplo, del análisis realizado sobre una superficie de hormigón reciclado.

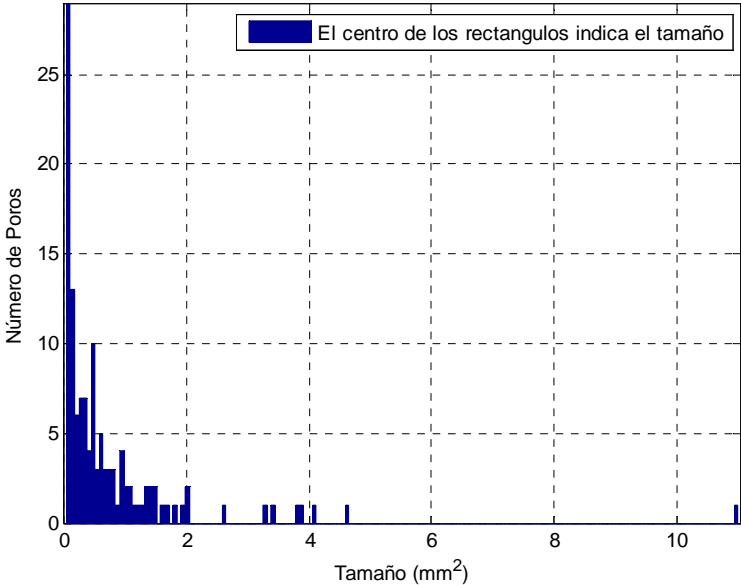


Fig. 67. Distribución de número de poros con respecto a la distancia radial al centro de la probeta.

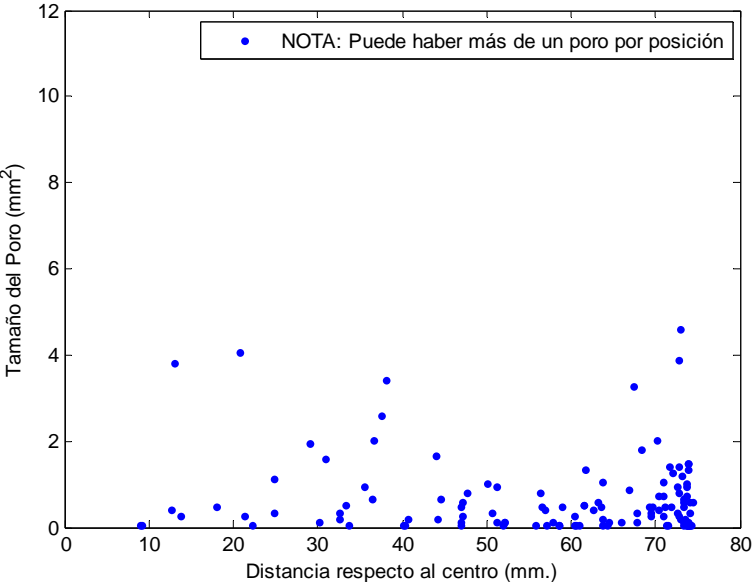


Fig. 68. Distribución del tamaño de los poros con respecto a la distancia radial al centro de la probeta.

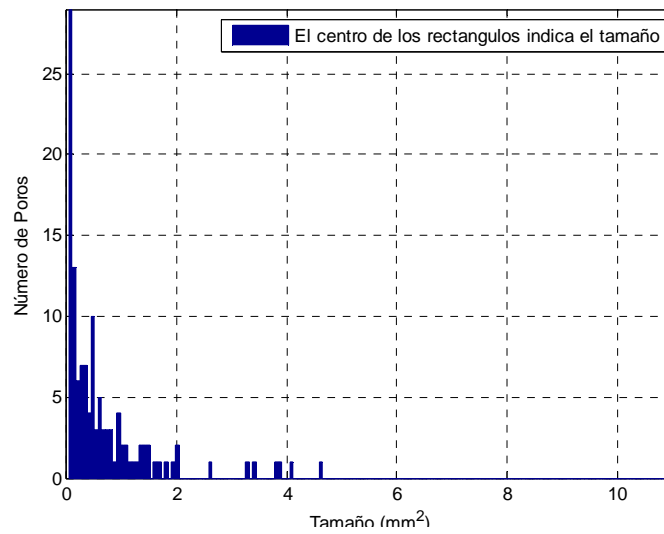


Fig. 69. Distribución del número de poros con respecto al tamaño de ellos.

Por otro lado, los datos proporcionados en forma de tabla permiten completar el análisis de cualquier caso particular. Por ejemplo, las Fig. 70 y Fig. 71 atienden a un estudio específico sobre una superficie de corte de una probeta de hormigón reciclado. En ellas puede observar, en dos o tres dimensiones, la distribución de poros con respecto a su posición en el plano de corte. Los colores permiten discernir la localización y el tamaño de los mismos. Estas dos imágenes se han obtenido, también, a través de Matlab en base a la tabla de resultados obtenida de un análisis.

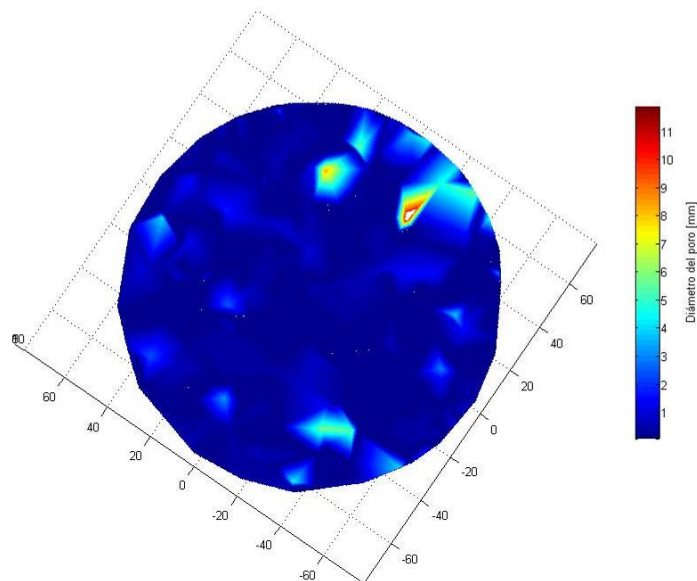


Fig. 70. Representación bidimensional de la distribución del tamaño de los poros en el plano de corte de la probeta.

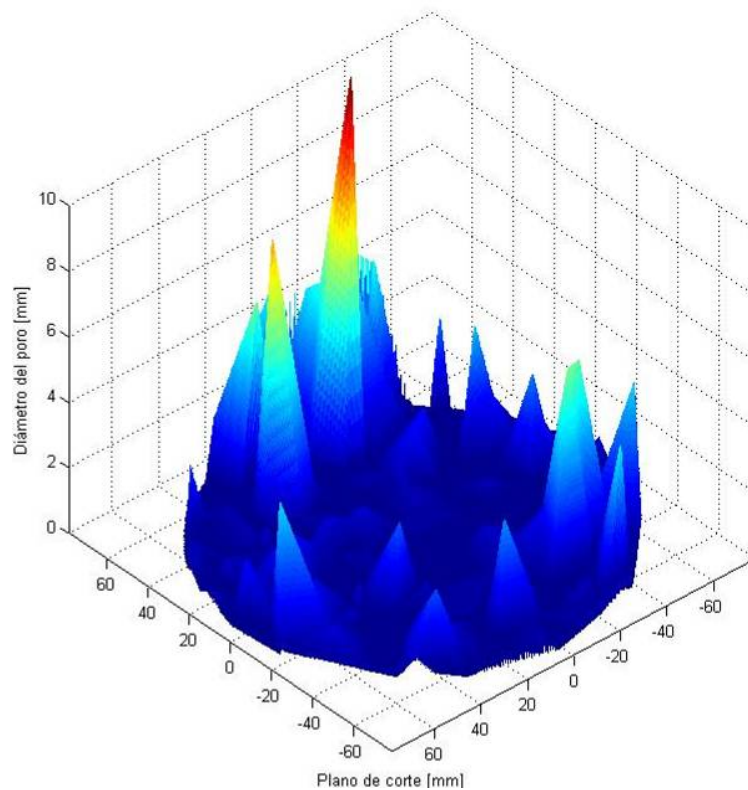


Fig. 71. Representación tridimensional de la distribución del tamaño de los poros en el plano de corte de la probeta.

De igual forma, el conjunto de tablas permite comparar los diferentes gráficos resultantes de la interpretación de distintas probetas del mismo tipo de hormigón y, al mismo tiempo, permite obtener resultados globales como, por ejemplo, la distancia media de los poros con respecto al centro (para todas las muestras analizadas), el tamaño medio de poros y el número promedio de ellos.

En el capítulo “Resultados” y en el Anejo IV se presentarán resultados obtenidos directamente mediante la utilización del programa (resultados parciales) y otros obtenidos de promediar resultados parciales a fin de aportar resultados generales.

2.5.4.3. Distribución de la macroporosidad

Es necesario, en primer lugar, definir el término *macroporosidad*. En el correspondiente capítulo de esta Tesis, se entiende como *macroporosidad* del hormigón reciclado, y en general de cualquier material poroso, aquella porosidad (expresada en tanto por ciento en volumen) que, independientemente de su origen, presenta un tamaño diametral mayor de 0,1 mm. Este umbral de tamaño de poro está

determinado por dos factores fundamentales: la densidad o viscosidad del material de relleno de poros y la resolución de la cámara fotográfica utilizada en la toma de imágenes. En cuanto a la primera de las limitaciones, como ya se ha comentado, se ha utilizado un cemento blanco de fraguado rápido mezclado únicamente con agua en una relación de 0,25. En estas condiciones la fluidez o consistencia del material de relleno es suficiente para la oclusión de poros de este tamaño. Por otra parte, la resolución del equipo de adquisición de imágenes limita en cuanto al número de píxeles capaz de reproducir por unidad de área. El tamaño mínimo de poro será aquel que corresponde exactamente con 1 píxel. No obstante, una resolución de 300 ppp (píxel por pulgada) es adecuada para nuestro propósito.

De los cuatro cortes realizados, Fig. 72, sobre cada una de las probetas cilíndricas normalizadas se han obtenido 5 muestras susceptibles de ser analizadas. Tres de ellas, la tapa superior e inferior y la muestra central han sido descartadas para el análisis de la macroporosidad. La muestra central ha sido dedicada al análisis de la permeabilidad a los gases y penetración de agua bajo presión y no aporta información complementaria, en lo que a la macroporosidad se refiere, a la que se deriva del análisis de las muestras M1 (superior) y M3 (inferior) puesto que las secciones 2 (S2) y sección 3 (S3) son idénticamente iguales. Las dos tapas, superior e inferior proporcionan información acerca de la distribución macroporosa de la base y de la máxima altura de la muestra. No obstante a esto último, se ha decidido, por comodidad, analizar solamente las muestras 2 y 3 ya que con ellas se obtiene la distribución completa; secciones S1 y S2 para la muestra 1 y secciones S3 y S4 para la muestra 3.

La Fig. 73 representa una de las secciones analizadas (obtenida a partir de una probeta de 150 mm de diámetro) una vez preparada la superficie, habiendo sido adquirida y tratada la imagen para la eliminación de colores distintos del blanco y el negro.

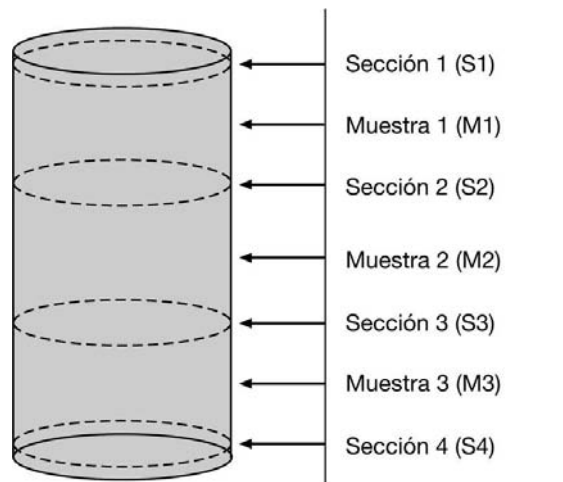


Fig. 72. Cortes practicados a las probetas normalizadas y submuestras obtenidas.

El análisis de la macroporosidad, así como el número de poros y su distribución, han sido analizados desde dos perspectivas diferentes. En primer lugar, se ha procedido a analizar la distribución en distintas alturas de la probeta cilíndrica normalizada.



Fig. 73. Imagen B/N de una de las secciones de la probeta preparada para el análisis de la macroporosidad.

En segundo lugar, se ha realizado un profundo análisis de la distribución de macroporos, atendiendo a su tamaño y la distancia respecto del centro del corte transversal, comparando, para ello, las distintas dosificaciones de hormigón reciclado.

2.5.4.4. Distribución de la macroporosidad en altura

La metodología descrita permite analizar la distribución de la macroporosidad en altura a partir del análisis de la macroporosidad de cuatro secciones realizadas en cada una de las probetas consideradas. Si bien una pequeña configuración del programa de análisis permitiría analizar superficies rectangulares, y un corte longitudinal de la probeta y la preparación de ésta hubieran podido proporcionar directamente la distribución en altura, se optó en cambio por la realización de cuatro cortes pues con ello se obtienen subespecímenes adecuados para la determinación de otras propiedades que puedan, a posteriori, ser comparadas con la macroporosidad.

2.5.5. Determinación de la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos

El objetivo de este estudio es la determinación de la velocidad de propagación de impulsos de ondas longitudinales ultrasónicas en el seno de las muestras de los distintos tipos de hormigón, reciclado y de control, y relacionar ésta velocidad con las propiedades físicas y mecánicas de los mismos. Para ello se han analizado muestras, de aproximadamente 100 mm (Muestra B, Fig. 72), obtenidas mediante el corte de probetas normalizadas (Fig. 74).

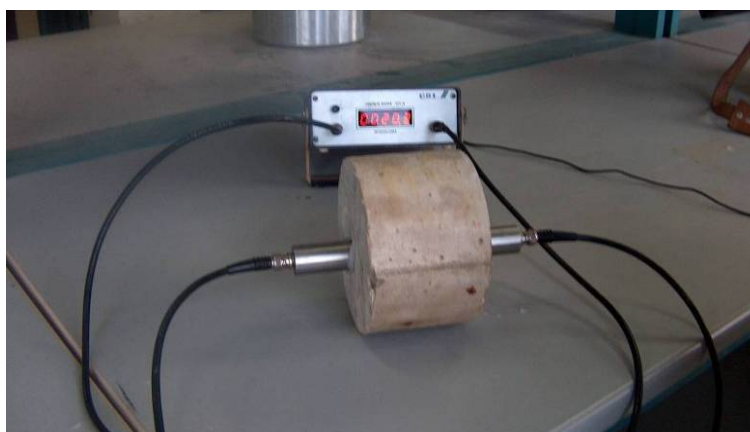


Fig. 74. Probeta de hormigón durante el ensayo de propagación de impulsos ultrasónicos.

Los ensayos se han llevado a cabo siguiendo las directrices de la norma europea *UNE-EN 12504-4:2006. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos* [130].

El aparato utilizado consiste en un generador de impulsos ultrasónicos, dos palpadores, un amplificador y un temporizador electrónico para la medida del intervalo de tiempo transcurrido entre el comienzo de la onda del impulso generado en el palpador transmisor y el comienzo de la onda a su llegada al palpador receptor.

El procedimiento del ensayo se describe en lo que sigue. En primer lugar, se toma la probeta, si está saturada de humedad se seca superficialmente y, mediante el palpador, mantenido en contacto con la superficie del material de ensayo, se emiten impulsos eléctrico-acústicos. Después de atravesar en el seno del material una trayectoria de longitud conocida (tamaño de la probeta), los impulsos de vibraciones se convierten en una señal acústica por un segundo palpador, mientras que circuitos electrónicos de temporización miden el tiempo de tránsito del impulso.

Debe haber un adecuado acoplamiento entre el material y la superficie de cada palpador. Se debe buscar un acabado suficientemente liso para asegurar un buen contacto, usando para ello un medio de acoplamiento intermedio tal como vaselina, grasa, jabón líquido, pasta de caolín o glicerina, y presionar firmemente el palpador contra la superficie de hormigón.

En transmisiones directas y semi-directas, como es el caso, la velocidad del impulso se debe calcular mediante la fórmula:

$$v = \frac{l}{t} \quad (22)$$

donde

v es la velocidad del impulso, en km/s.

l es la longitud de la trayectoria, en mm.

t es el tiempo que invierte el impulso en su trayectoria, en μ s.

A fin de conseguir una medida de velocidad de impulso que sea reproducible y que dependa fundamentalmente de las propiedades del hormigón objeto de ensayo, es necesario considerar varios factores que pueden influir en dicha velocidad y su correlación con diversas propiedades físicas del hormigón, como son:

- El contenido de humedad.
- La temperatura del hormigón.
- La longitud de la trayectoria recorrida por el impulso.
- Forma y tamaño de la muestra de ensayo.

En todos los casos, se han utilizado tercios de probetas normalizadas, realizando la medición entre las dos caras paralelas a temperatura ambiente y con las muestras secas.

2.6. DURABILIDAD DEL HORMIGÓN RECICLADO

La capilaridad es la propiedad responsable de las principales patologías que afectan al hormigón y a los materiales de refuerzo que se encuentran embebidos en las estructuras fabricadas con este material. Una clasificación de acuerdo al tamaño del poro permite discriminar los distintos factores que pueden afectar a la durabilidad de las estructuras de hormigón.

Los poros son espacios o cavidades ocupadas por aire y/o agua con geometrías irregulares que forman una red tridimensional muy compleja entre los granos o partículas sólidas que conforman el hormigón.

La durabilidad del hormigón se asegura, en gran parte, por la dificultad que se ofrece a los agentes externos agresivos a penetrar en la red de poros de la estructura. La porosidad y la permeabilidad son pues parámetros de primer orden en cuanto a la durabilidad.

La absorción de agua es el principal factor en el deterioro del hormigón, con excepción del deterioro mecánico. El transporte de agua a través del hormigón, viene determinado por el tipo, tamaño, distribución e interconexión de los poros y fisuras. Estos parámetros condicionan la permeabilidad del hormigón y, a su vez, ésta influye decisivamente en la durabilidad, ya que una vez producida la succión capilar desde la superficie, el agua circula por el hormigón en función de la permeabilidad de éste, transportando, a su vez, agentes agresivos disueltos que pueden provocar el prematuro deterioro del acero, en el caso de que el hormigón sea armado, y del propio hormigón.

La red porosa de un hormigón se puede clasificar en función del tamaño de los vacíos presentes. Así, se distribuye entre:

- Poros de gel o espacio entre capas de los silicatos cálcicos hidratados, C-S-H: el espaciamiento entre las capas de C-S-H es del orden de 18 \AA , dando lugar a, aproximadamente, el 28% de la porosidad presente en el sólido C-S-H [66]. El tamaño de estos poros es demasiado pequeño como para tener efectos adversos en la resistencia y permeabilidad. El agua, en estos pequeños

huecos, está retenida por puentes de hidrógeno y su extracción bajo ciertas condiciones, contribuye a la retracción por secado y a la fluencia [74,75,77,78,131].

- **Porosidad capilar:** en cualquier etapa de la hidratación los poros capilares representan la parte del volumen bruto que no ha sido llenado por los productos de la hidratación. La porosidad capilar depende del grado de hidratación y de la relación agua/cemento de la mezcla. En un primer momento, todos los poros son capilares y, a medida que avanza la hidratación, se van rellenando con los productos de ésta. Por lo tanto, el volumen de los poros capilares disminuye, mientras que los poros de gel aumentan. Con el proceso de la hidratación aumenta el contenido sólido de la pasta, y en pastas reposadas y densas, los capilares pueden segmentar y bloquearse por el gel, transformándose en poros capilares interconectados por los poros de gel, como lo demuestran las medidas de permeabilidad. De aquí que la porosidad capilar sea la principal responsable de la permeabilidad del hormigón.
- **Porosidad debida al aire atrapado:** durante el proceso de amasado del hormigón, queda retenida dentro de la masa una gran cantidad de aire; este aire produce una porosidad que puede ser evitada, en gran medida, utilizando métodos de compactado como puede ser, por ejemplo, el vibrado del hormigón una vez repartido en el volumen que ocupará. Normalmente esta porosidad tiene un tamaño considerable en relación con las anteriormente citadas.

A diferencia de los poros capilares, que presentan forma irregular, los espacios de aire atrapado son generalmente esféricos. Se debe distinguir entre aire ocluido, el producido intencionadamente por un aditivo aireante, y aire atrapado, el aire introducido en la pasta de cemento fresca durante las operaciones de mezclado. El tamaño de estos espacios suele ser del orden de 50 a 200 μm , pudiendo superar, en algunos casos, los 3 mm. El aire atrapado afecta negativamente a la resistencia y a la impermeabilidad [66].

Si se recorre de menor a mayor tamaño la porosidad, se obtiene el esquema representado en la Fig. 75, con los siguientes intervalos de interés:

- Los espacios interpartículas entre láminas de C-S-H, forman parte de la microporosidad y son los huecos que se sitúan entre $0,001\ \mu\text{m}$ y $0,01\ \mu\text{m}$.
- Los huecos capilares pequeños, también dentro de la microporosidad, abarcan medidas entre los $0,01\ \mu\text{m}$ y $1\ \mu\text{m}$ aproximadamente.
- Los cristales de Ca(OH)_2 y los aglomerados de C-S-H, junto con los poros capilares grandes, entre $1\ \mu\text{m}$ y $5\ \mu\text{m}$ aproximadamente.
- Las burbujas de aire ocluido, producidas generalmente utilizando un aditivo aireante, ente $100\ \mu\text{m}$ y $1\ \text{mm}$.
- Los huecos de aire atrapado, englobados en la macroporosidad, con tamaños mayores de $1\ \text{mm}$.

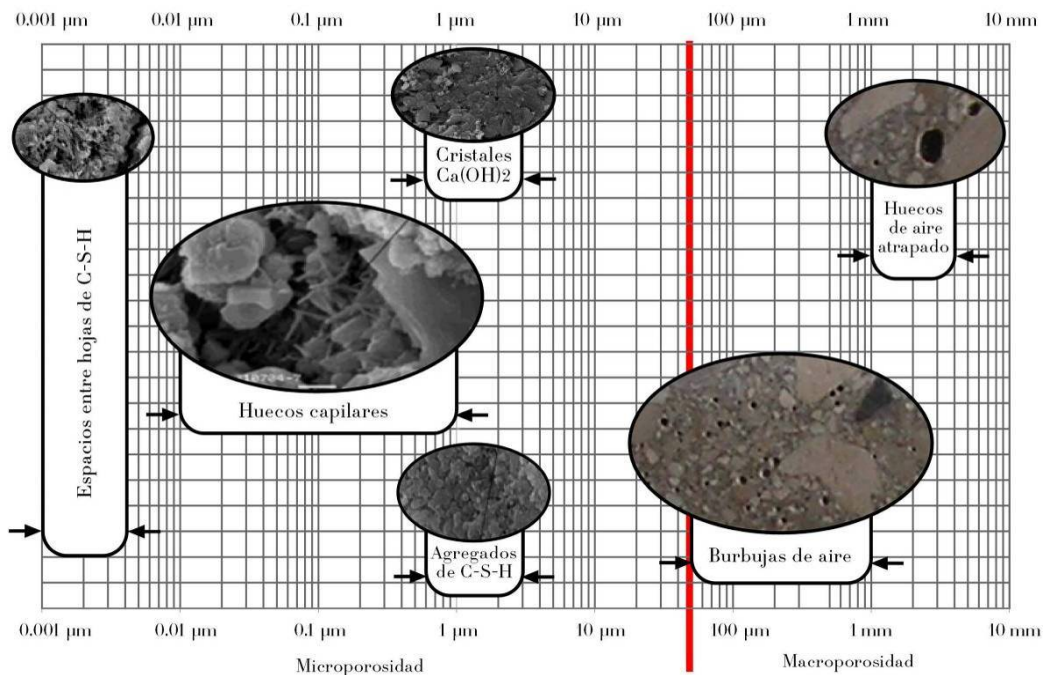


Fig. 75. Representación de los distintos tipos de porosidad y capilaridad según su tamaño.

La clasificación de acuerdo al tamaño del poro permite discriminar, también, los distintos factores que pueden afectar a la durabilidad de las estructuras de hormigón.

La mayoría de los agentes externos que son susceptibles de reducir la durabilidad de las armaduras, así como de afectar al propio hormigón, presentan un tamaño que se sitúa en torno al Angstrom. A nivel de compuestos químicos, por ejemplo, lo son los iones OH^- , SO_4^{2-} , K^+ , Na^+ , Ca^{+2} , Cl^- .

El volumen total de la mezcla cemento-agua permanece sin cambios durante el proceso de hidratación, por consiguiente, la densidad media de los productos de hidratación es considerablemente más baja que la densidad del cemento Portland anhidro. Se estima que 1 cm^3 de cemento, en completa hidratación, necesita un volumen de 2 cm^3 para acomodar los productos hidratados. Así, la hidratación del cemento puede considerarse como el proceso durante el cual el volumen ocupado por el cemento y el agua va siendo reemplazado paulatinamente por los productos de hidratación.

En una pasta correctamente hidratada, con una baja relación agua/cemento, los huecos capilares varían entre 10 y 50 nm; con una relación alta agua/cemento, para edades de hidratación tempranas, los poros capilares varían entre 3 y 5 μm .

La caracterización de la durabilidad del hormigón puede abordarse de distintas maneras. En este apartado se describen los ensayos de determinación de la durabilidad de hormigones reciclados, curados en cámara de humedad y en intemperie marina, estimando la capacidad de la que disponen los agentes externos para penetrar en el seno del material. Cuando el hormigón se encuentra expuesto a agentes patológicos (físicos o químicos) que afectan al cemento y al acero de las armaduras, como son el dióxido de carbono (CO_2 ambiental) y/o electrolitos cloruro (procedentes del $\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$), la durabilidad de los mismos deberá estimarse con ensayos que cuantifiquen los efectos negativos producidos por exposición (ensayo de carbonatación) o bien mediante la capacidad protectora intrínseca del hormigón (ensayos de permeabilidad al agua y a los gases).

En primer lugar, se describe el método de determinación de la profundidad del frente de carbonatación de probetas que han permanecido expuestas a la intemperie durante un periodo prolongado de tiempo.

Además, se han llevado a cabo ensayos de la capacidad de circulación de un fluido a través de la red capilar como es el caso de, por un lado, la determinación del

coeficiente de permeabilidad a los gases y, por otro lado, el de resistencia a la penetración de agua bajo presión.

El ensayo de permeabilidad al oxígeno, de igual manera que los ensayos descritos en el apartado 2.7, se ha realizado sobre submuestras cortadas, de 100 mm de altura, que correspondían al tercio medio de una probeta cilíndrica normalizada (Fig. 56).

El ensayo de penetración de agua bajo presión, por su parte, se realizó sobre las mismas muestras utilizadas en el ensayo de permeabilidad. Además, dado que el ensayo de penetración requiere dividir la muestra en dos mitades utilizando para ello el método de rotura brasileño, se obtiene a partir de esas mismas muestras un dato de la resistencia a tracción indirecta del material, como se describe en el apartado 2.7.3.

Los áridos reciclados procedentes de la trituración y procesado de hormigones estructurales de demolición introducen cierta incertidumbre en cuanto a la capacidad protectora de los hormigones fabricados con ellos. Es bien sabido que la alcalinidad de los hormigones pasiva la corrosión de las armaduras, por ello, la sustitución de áridos de naturaleza caliza por áridos reciclados carbonatados reduciría el pH del hormigón, lo cual redundaría negativamente sobre la capacidad protectora antes mencionada. No obstante, este efecto negativo puede compensarse con la incorporación de cantidades de cemento mayores. Por ello, la utilización de áridos reciclados ligeramente carbonatados no es necesariamente un factor negativo si bien la carbonatación puede ser indicativo de otras patologías, propias de los hormigones de origen, que sí pueden ser responsables de una disminución de la durabilidad de los hormigones reciclados.

2.6.1. Carbonatación por exposición a la intemperie

Entre las probetas curadas con exposición a ambiente marino, se ha reservado un número representativo de ellas que permitiera estudiar la posible carbonatación de la pasta de cemento en periodos de 1 año. Para ello, se han seguido las especificaciones indicadas en la norma *UNE 83993-1:2009: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido. Parte 1: Método natural* [132].

Una de las cualidades químicas más importantes de la pasta endurecida de cemento Portland es su carácter fuertemente básico, pH 12-13 y, por tanto, el medio ambiente que la circunda tiende, en todo momento, a disminuir su pH mediante reacciones de neutralización, y situarla en su posición más estable desde el punto de vista termodinámico. Entre las reacciones de neutralización se encuentra la carbonatación, que podría definirse como la reacción química mediante la cual los compuestos que integran la pasta endurecida de cemento hidratado se combinan con el dióxido de carbono del ambiente que le rodea [133].

En presencia de CO_2 , el hidróxido cálcico de la pasta de cemento hidratada del hormigón reacciona formando carbonato cálcico según la siguiente reacción, reduciendo así de forma notable la alcalinidad del medio:



La determinación de la profundidad de carbonatación, se ha realizado utilizando una solución de fenolftaleína en alcohol etílico. La fenolftaleína es un virador que cambia notablemente de color cuando el pH se sitúa por encima de 9. Para pH por debajo de este valor la solución es transparente. Con este planteamiento, se prepararan distintas secciones transversales de probetas normalizadas y se analiza el frente de carbonatación desde la cara expuesta a la intemperie. A fin de obtener una sección más o menos homogénea de la probeta, se procede a romper éstas por el método de tracción indirecta o método brasileño, aplicando una carga de compresión, hasta rotura, a lo largo de la generatriz de la probeta.

Una vez obtenida la superficie de análisis, se procede a aplicar, mediante un pulverizador, la solución de fenolftaleína en toda la superficie. Tras la aplicación de la solución, se comprueba cómo la pasta de cemento con un pH mayor de 9 hace que el virador cambie rápidamente de color (Fig. 76).

Una vez que la solución aplicada ha secado, puede procederse a registrar el frente de carbonatación, partiendo desde la superficie exterior hacia el interior, como la distancia máxima en la cual no se aprecia variación de color de la solución depositada en ella. En esta profundidad el pH del medio se encuentra por debajo de 9 y, por lo tanto, se considera pasta de cemento carbonatada.



Fig. 76. Superficie interior de una probeta normalizada de hormigón, rota por tracción indirecta, a la que se ha aplicado una fina capa de fenolftaleína.

2.6.2. Determinación del coeficiente de permeabilidad al oxígeno

El ensayo de permeabilidad al oxígeno se ha realizado atendiendo a lo establecido en las normas *UNE 83966:2008: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad* [134] y *UNE 83981:2008: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la permeabilidad al oxígeno del hormigón endurecido* [135]. No obstante, ha de tenerse en cuenta que los ensayos realizados en la presente Tesis dieron comienzo en el año 2006, cuando aún no existía normativa al respecto. La norma fue publicada en el año 2008 y, salvo pequeñas modificaciones que colocan a los ensayos aquí presentados del lado de la seguridad, no hay diferencias importantes. En cualquier caso, se mantuvo un protocolo de ensayo bien establecido [136], a fin de poder obtener resultados comparativos entre todos los hormigones reciclados fabricados con independencia de la fase o año.

La determinación del coeficiente de permeabilidad a los gases puede realizarse sobre cualquier tipo de material, y en particular se aplica este método extensivamente a pétreos como el hormigón. Se basa en la capacidad que poseen los fluidos de poca densidad, y en particular los gases, para penetrar en el seno del material y circular por su interior utilizando, para ello, la porosidad y la red capilar del mismo.

El fundamento del ensayo consiste en aplicar una presión constante de gas, oxígeno en el caso que nos ocupa, sobre una de las caras de la probeta para, después de un

tiempo suficiente como para que el gas atravesase toda la muestra y alcance la cara opuesta, registrar el caudal de gas a la salida. Para ello, es necesario que las caras laterales de la probeta se encuentren perfectamente selladas, con el objetivo de que no escape gas a través de ellas y, así, todo el oxígeno que se aplica en una de las caras sea recogido en la cara opuesta.

Los caudales de gas a medir en el ensayo de permeabilidad al oxígeno sobre probetas de hormigón, son notablemente pequeños, del orden de 0,1 a 0,5 cm³/s; debido a ello, no pueden utilizarse caudalímetros convencionales y se recurre usualmente al método de la pompa de jabón para determinar el caudal a la salida de la muestra.

La medida de la permeabilidad del hormigón no es solamente función de la porosidad o estructura de los poros del hormigón, sino que también depende de las propiedades del fluido utilizado y, en particular, de su viscosidad. En el caso de la permeabilidad al agua, si alguna porción de cemento ha podido quedar sin hidratar, el agua utilizada puede provocar la hidratación del mismo, y el momento en el que ello ocurre dependerá de la presión aplicada. Este efecto fue detectado por Glanville en 1926, mediante el ensayo prolongado de permeabilidad al agua, donde se observó que la curva permeabilidad – tiempo poseía una pendiente negativa considerable. En el caso de la permeabilidad a los gases, puede suceder justamente lo contrario, aumenta la relación permeabilidad – tiempo, debido a que la presión de gas, por muy reducida que ésta sea, puede romper la capilaridad de la estructura de hormigón y crear nuevas comunicaciones entre poros que originalmente se encontraban aislados.

Existen muchos menos trabajos sobre el estudio de la permeabilidad a los gases que de la permeabilidad a los líquidos. Sin embargo, los efectos de la penetración de gases en el seno del material adquieren especial importancia en lo referente a la durabilidad del hormigón armado y, asimismo, el gas, en el caso de que sea “agresivo”, puede afectar al propio hormigón, como podrá comprobarse en el estudio de la carbonatación.

La Ley de Darcy [137] describe, con base a experimentos de laboratorio (Fig. 77), las características del flujo de fluidos, gases o líquidos, a través de medios porosos:

$$Q = KiA \quad (24)$$

donde:

- Q = gasto, descarga o caudal en m^3/s .
- K = un parámetro, conocido como coeficiente de permeabilidad de Darcy, variable en función del material de la muestra, en m/s.
- A = área de la sección transversal de la muestra, en m^2 .
- i = gradiente hidráulico, definido mediante la expresión (25):

$$i = \frac{h_3 - h_4}{L} \quad (25)$$

- h_3 = altura, sobre el plano de referencia, que alcanza el agua en un tubo colocado a la entrada de la capa filtrante.
- h_4 = altura, sobre el plano de referencia, que alcanza el agua en un tubo colocado a la salida de la capa filtrante.
- L = longitud, en metros, de la muestra.

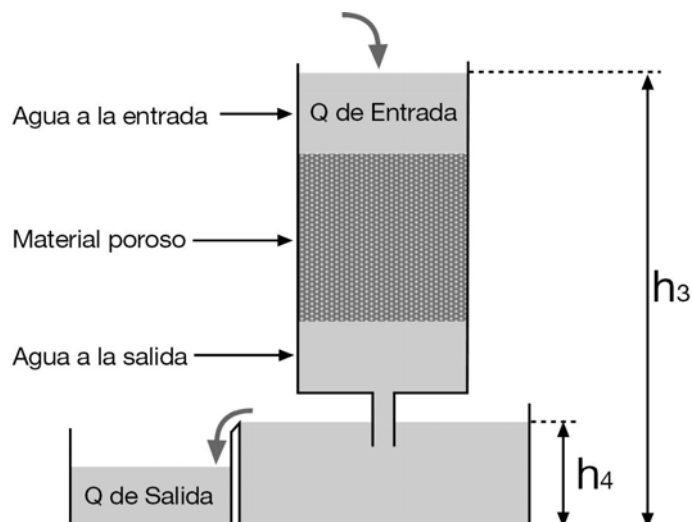


Fig. 77. Esquema del dispositivo experimental que dio origen a la Ley de Darcy.

La ecuación de Darcy se puede expresar en términos de presión como:

$$Q = K \frac{P_2 - P_1}{L \cdot \gamma} A \quad (26)$$

Esta ley es aplicable tanto a líquidos como a gases, caso en el cual el peso específico y puede considerarse despreciable, con la precaución de que la presión, en el caso de gases, sea lo suficientemente baja como para que ésta no comprima el gas utilizado, ni tan elevada como para afectar a la capilaridad del hormigón.

Una simple manipulación de la ecuación de Darcy, pasando las alturas correspondientes de las columnas de agua a presiones de gases, permite despejar el coeficiente de permeabilidad del material de la siguiente forma [136]:

$$K = \frac{2 P_1 R L \eta}{A(P_2^2 - P_1^2)} \quad (27)$$

donde:

K = Coeficiente de permeabilidad [m^2].

η = Viscosidad del gas utilizado [$N \cdot s/m^2$].

L = Longitud de la muestra [m].

R = Caudal de gas a la salida de la muestra [m^3/s].

A = Área de la sección transversal de la muestra [m^2].

P_1 = Presión absoluta a la salida de la muestra [N/m^2].

P_2 = Presión absoluta a la entrada de la muestra [N/m^2].

El valor de la permeabilidad obtenido directamente con un gas, depende tanto de la presión como del tipo de gas utilizado. En este sentido, y para poder comparar la

permeabilidad obtenida mediante líquidos, se recomienda utilizar, al menos, tres presiones de entrada diferentes para un mismo gas.

En nuestro caso, el gas utilizado es oxígeno, cuya viscosidad en condiciones normales de presión y temperatura es de $2,02 \cdot 10^{-5}$ N·s/m², y la presión del gas a la salida es igual a la presión atmosférica (1 bar). De esta forma, la ecuación (27) se transforma en:

$$K = \frac{4,04 \times 10^{-10} RL}{A(P_2^2 - 1)} \quad (28)$$

donde la presión, ahora, queda expresada en bares.

La permeabilidad definida en estas ecuaciones hace referencia a la permeabilidad intrínseca de los poros del material y, en general, el valor del coeficiente de permeabilidad, K , suele ser mayor cuando éste se mide con gases que cuando se obtiene mediante la utilización de fluidos líquidos.

Por otra parte, las muestras que permite ensayar el dispositivo experimental utilizado deben ser de geometría cilíndrica, con la posibilidad de utilizar distintos diámetros y alturas, en este caso de 150 mm y 100 mm respectivamente, lo cual justifica el despiece de probetas establecido anteriormente.

Una vez obtenidas las muestras, y previamente a la realización de los ensayos, éstas se introducen en una estufa ventilada para la eliminación de cualquier resto de humedad. Se mantienen a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta que alcanzan peso constante.

A continuación, las probetas se recubren, en su cara lateral, mediante una capa sellante a base de silicona, que una vez endurecida deja la superficie totalmente lisa, uniforme e impermeable, permitiendo además un buen ajuste estanco entre la goma de caucho y la muestra, evitando así las pérdidas laterales de oxígeno.

El dispositivo experimental, utilizado para la realización del ensayo de permeabilidad al oxígeno sobre las muestras cilíndricas de hormigón, se describe en detalle a continuación.

Como puede observarse en la Fig. 78, que corresponde a la vista esquemática frontal del dispositivo, el montaje permite el sellado de las caras laterales de la muestra objeto de estudio mediante la colocación de la misma en el interior de una junta de caucho de unas dimensiones apropiadas para el diámetro y altura de la muestra. Se dispone de juntas de caucho de distintos diámetros para utilizar, no sólo con probetas normalizadas de hormigón, sino también con testigos obtenidos mediante el uso de coronas perforadoras de estos mismos diámetros.

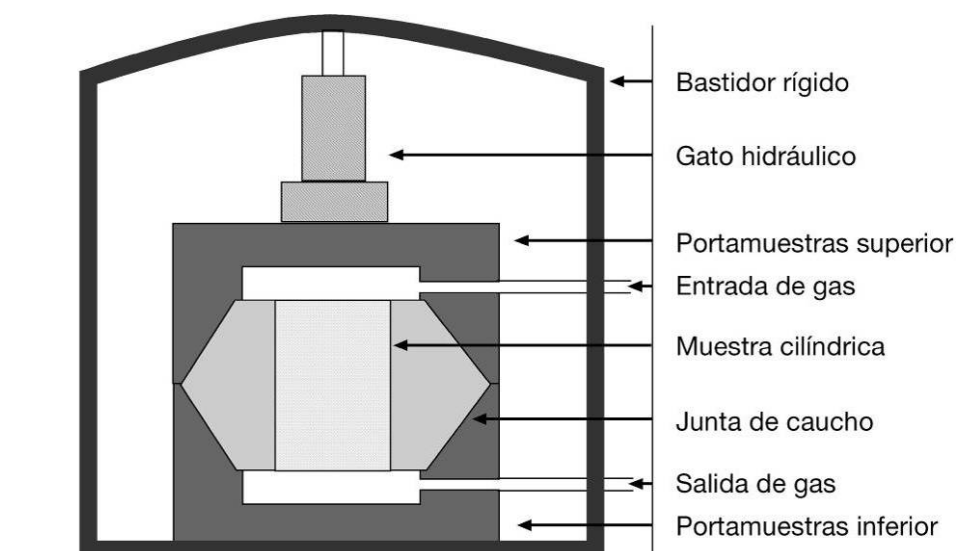


Fig. 78. Esquema del dispositivo experimental para la realización de ensayos de permeabilidad al oxígeno sobre probetas cilíndricas de hormigón.

El correcto sellado del conjunto lo garantizan los portamuestras superior e inferior, que comprimen lateralmente la junta de caucho contra la muestra, impidiendo así que pueda haber fugas de gas. Además, los portamuestras, simétricos, por el hecho de ser huecos en su interior y estar conectados al exterior mediante un conector, permiten introducir la presión de gas, en este caso por la cara superior de la probeta, y determinar el flujo a la salida mediante la utilización de un caudalímetro conectado al manguito de la salida de gases. Todo el sistema está estructuralmente soportado por un bastidor rígido, en el que se apoya un gato hidráulico de 5 toneladas de capacidad.

Los portamuestras, tanto el superior como el inferior, están fabricados y mecanizados en aluminio, con lo que se facilita, dada su baja densidad, su colocación y desmontaje sin comprometer la rigidez necesaria del sistema. El bastidor es un arco rígido de acero con un perfil lo suficientemente dimensionado como para soportar la carga que ejerce el gato hidráulico y garantizar el perfecto ajuste de los portamuestras con la junta de caucho y de ésta con la muestra; en la Fig. 79 se aprecia en la cara lateral de la probeta la capa de silicona aplicada para asegurar la estanqueidad e impedir las pérdidas de oxígeno. Todo ello basado en las especificaciones recogidas en la norma ASTM C-577-68 [138].



Fig. 79. Aspecto de la muestra parcialmente (izq.) y totalmente (dcha.) introducida en la junta de caucho.

La entrada de gases se encuentra conectada, en el momento del ensayo, a una fuente de oxígeno provista de un manorreductor-regulador, capaz de garantizar una presión de entrada entre 0 y 6 bares, y de mantener su nivel en un límite del 1% de la presión seleccionada. Se utiliza otro manómetro-regulador intermedio, entre el de la fuente de oxígeno y la entrada de gases, capaz de ajustar la presión de oxígeno aplicada con una precisión de 0,6% dentro del rango de presiones utilizadas en el ensayo (0,5 a 3 bares).

De igual forma, en las Fig. 80 y Fig. 81 se muestran, respectivamente, las etapas de colocación del conjunto probeta – junta en los portamuestras inferior y superior.



Fig. 80. Disposición de la muestra en el portamuestras inferior.



Fig. 81. Detalle de la colocación del portamuestras superior.

Al comenzar el ensayo, en primer lugar se introduce la probeta, preparada como se ha descrito, en el interior de la junta de caucho, tal y como se muestra en la Fig. 79, correspondiente al momento de la colocación de la probeta, que refleja el aspecto de la probeta una vez introducida por completo en el interior de la junta de caucho.

El dispositivo completamente montado se muestra en la Fig. 82. En ella puede observarse cómo el gato hidráulico se apoya en el bastidor para comprimir, a través de los portamuestras, la junta de caucho que alberga la muestra. En este momento se está en disposición de aplicar la presión de oxígeno deseada; obsérvese que la conexión de entrada, en este caso, se ha realizado al portamuestras inferior,

quedando el manguito del portamuestras superior pendiente de conectar al caudalímetro.

Tras aplicar la presión, que no debe exceder de los 2 bares a fin de proteger la integridad de la red porosa del hormigón, se espera el tiempo suficiente para que el gas penetre en toda la red de poros permeable del material. A partir de este momento, se considera que el sistema ha estabilizado y que el gas comienza a fluir por la cara opuesta con un caudal constante que permitirá determinar el coeficiente de permeabilidad a gases del material, conocido el caudal a la salida, deducido a partir de la ecuación de Darcy.



Fig. 82. Montaje final del dispositivo experimental, a falta de conectar la salida del portamuestras superior al caudalímetro de gases.

Una vez montado el dispositivo experimental, se plantea la dificultad de medir el caudal de oxígeno a la salida del sistema. Como ya se ha indicado, la principal problemática radica en medir, con la suficiente precisión, caudales de gas tan reducidos como los comprendidos entre 0,01 y 0,5 cm³/s.

El método tradicionalmente empleado para ello es el de la pompa de jabón. Sin embargo, se trata de un método relativamente impreciso y lento. En este sentido, el disponer de un caudalímetro digital que, después de estabilizar el sistema,

proporcione el valor del caudal a la salida, ha facilitado en gran medida, dada su sencillez y rapidez, la obtención de valores fiables y uniformes (Fig. 83).

Para la completa estabilización del caudal de flujo se espera unos 15 minutos, entendiéndose que ésta se consigue cuando las medidas realizadas en intervalos de 5 minutos no difieren en más del 1% del valor del caudal medido.

Las presiones de oxígeno a la entrada, en todos los casos, se han mantenido dentro del intervalo comprendido entre 0,40 y 2,45 bares, realizándose para cada probeta dos medidas a presiones diferentes, y calculando el coeficiente de permeabilidad como el valor medio de los obtenidos para cada una de las presiones consideradas.

Para la realización de las medidas incluidas en esta Tesis se ha desarrollado íntegramente el caudalímetro digital antes mencionado.



Fig. 83. Detalle del PC y tarjeta de adquisición de datos conectada al caudalímetro digital.

No obstante, dado que el caudalímetro digital permite su conexión a una tarjeta de adquisición continua de datos, y con ello la toma de medidas del caudal directamente en tiempo real, es posible obtener la curva de estabilización del sistema y precisar, de esta forma, el momento en que puede realizarse el registro de datos sin necesidad de hacer mediciones espaciadas en el tiempo para confirmar la estabilización.

Como puede observarse en la Fig. 84, el caudalímetro diseñado posee, a la izquierda en la imagen, un interruptor de encendido-apagado. Asimismo, nótese cómo la entrada de flujo a medir va conectada al sistema mediante un manguito de látex vinculado a la salida del montaje y un display digital que proporciona el valor del caudal a la salida expresado en cm^3/s . En la imagen también puede apreciarse, a la derecha, la toma BNC que proporciona una salida eléctrica analógica de $\pm 5\text{V}$ correspondiente al caudal medido por el aparato, colocado con el objetivo de disponer de una conexión a una tarjeta de adquisición de datos.



Fig. 84. Detalle del caudalímetro digital conectado y evaluando el flujo de oxígeno a la salida de la muestra.

La descripción del permeabilímetro se ha omitido en esta tesis por estar pendiente de solicitud de patente.

2.6.3. Determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión

Las mismas muestras ensayadas bajo presión de oxígeno se utilizaron, posteriormente, en los ensayos de penetración de agua bajo presión, manteniéndose para ello durante 72 horas sometidas a la actuación de una columna de agua, empujada a su vez por una columna de aire a una presión de 5 bares, equivalente a mantener una columna de agua de 50 m de altura sobre las probetas, tal y como establece la norma *UNE-EN 12390-8:2009: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión* [139]. Transcurrido este tiempo,

se procede a romper las muestras mediante el método brasileño para, de esta forma, medir la profundidad de penetración del agua en el seno del hormigón. El registro de la carga de rotura de las probetas, como ya se ha indicado repetidamente, da también una medida indirecta de la resistencia a tracción del hormigón ensayado.

En las Fig. 85 y Fig. 86 se muestra, en detalle, el aspecto que presenta el dispositivo experimental utilizado, que consta, esencialmente, de los siguientes elementos:

- Dos anillos de goma para asegurar la estanqueidad.
- Un cilindro o celda de metacrilato para albergar la columna de agua.
- Una tapa superior por donde se introduce el agua y a través del cual se inyecta el aire a presión.
- Un conducto de suministro de aire comprimido con regulador que permite ajustar la presión a distintos valores.
- Una bancada soporte donde se montan todos los elementos, y es capaz de proporcionar una fuerza de apriete que garantice el mantenimiento de la estanqueidad del conjunto.

Cumplidas las 72 horas de ensayo, se desmonta el dispositivo y se procede a la rotura longitudinal de las probetas por el método brasileño, observándose el frente de penetración de agua, que es perfilado con ayuda de un rotulador indeleble como se muestra en la Fig. 87.

El resultado del ensayo se expresa como valor de penetración máxima registrada en cada probeta.



Fig. 85. Dispositivo experimental para los ensayos de penetración de agua bajo presión.

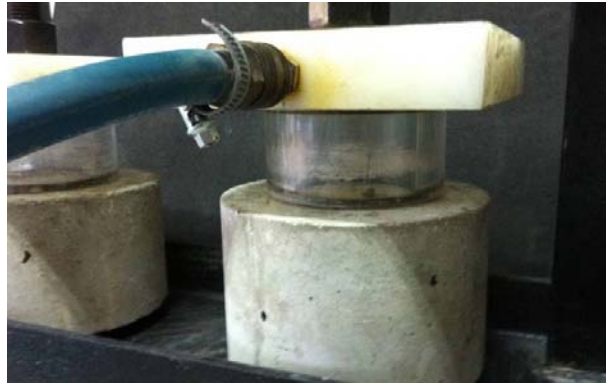


Fig. 86. Detalle del dispositivo experimental para los ensayos de penetración de agua bajo presión.



Fig. 87. Detalle del perfil de profundización del agua en los ensayos de penetración de agua bajo presión.

2.7. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN RECICLADO

En este apartado se describen las metodologías de ensayo aplicadas en cada uno de los ensayos de caracterización mecánica del hormigón de control y reciclado. En todos los casos, se ha partido de probetas cilíndricas normalizadas, fabricadas según las metodologías antes descritas, y preparadas específicamente para cada uno de los ensayos. Asimismo, las probetas que requieren de la aplicación de la carga entre dos caras paralelas han sido refrentadas y, en aquéllos ensayos en los que se requiere un registro de la deformación del material, las probetas han sido instrumentadas a tal efecto.

2.7.1. Determinación de la resistencia a compresión uniaxial

Para la determinación de la resistencia a compresión uniaxial de las probetas normalizadas de hormigón, se han seguido las premisas establecidas en la norma *UNE-EN 12390-3:2009: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas* [140].

Tras la fabricación de las probetas (ver apartado 2.4.3) éstas fueron almacenadas, hasta el momento del ensayo, en dos ambientes de curado bien diferenciados: cámara de humedad (condiciones óptimas de curado) y ambiente marino (IIIa). Los ensayos de determinación de la resistencia a compresión tuvieron lugar, primeramente, a los 28 días de edad, después, a los 180 días de edad y, finalmente, a los 365 días de curado. Una vez alcanzadas las edades establecidas, las probetas fueron refrentadas, por la cara abierta del molde, utilizando azufre puro.

El azufre es el material más adecuado dadas las características de los hormigones ensayados. En primer lugar, es un material que, como ya se ha indicado anteriormente, funde a baja temperatura, 115 °C (388 K), lo cual permite aplicar el material, en estado líquido sobre un molde de refrentado. Mientras el azufre se encuentra en estado líquido, se coloca, con precaución, la probeta en el molde procurando que el lateral de la misma se encuentre en contacto con los rodillos del molde y, así, garantizar que la cara basal y la lateral de la probeta sean perfectamente perpendiculares, o equivalentemente: que las dos caras de aplicación de carga son

perfectamente paralelas, Fig. 88. De esta manera se garantiza la distribución uniforme de esfuerzos en la sección transversal de la probeta.

Para la consecución de los ensayos se utilizó una prensa servohidráulica universal de 1500 kN de carga máxima. Todas las probetas fueron ensayadas aplicando la carga linealmente hasta rotura. La velocidad de aplicación de la carga fue de 9,8 kN/s. Todo ello, conforme a lo que recogen los protocolos de las correspondientes normas europea y americana [140,141].



Fig. 88. Probetas normalizadas de hormigón refrentadas y preparadas para ensayar a compresión.

La resistencia a compresión del hormigón de probetas cilíndricas normalizadas, expresada en unidades del sistema internacional, se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$R_c = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (29)$$

donde:

F es la carga máxima, expresada en N (Newtons), resistida por la probeta.

S es la superficie de aplicación de la carga en mm^2 .

D es el diámetro, en mm, de la probeta: 150 mm ($S=17671 \text{ mm}^2$).

R_c es la resistencia a compresión expresada en MPa.

En la Fig. 89 se muestra el aspecto que presenta la fractura de una probeta en el ensayo de determinación de la resistencia a compresión.



Fig. 89. Rotura a compresión simple de una probeta normalizada de hormigón.

2.7.2. Determinación del módulo de elasticidad

Como complemento a los ensayos de caracterización mecánica, se ha determinado el módulo de elasticidad de los hormigones. Para ello, se ha partido de las indicaciones

establecidas en la norma *UNE 83316:1996: Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión* [142].

Sin embargo, a diferencia de lo que sucede en los ensayos de compresión simple, en este proceso se requiere del registro de la deformación del material. El módulo de elasticidad se determina promediando la pendiente de la curva tensión-deformación de 5 ciclos de carga y descarga entre unos valores muy concretos. El punto de partida de cada uno de los ciclos son 0,5 MPa (8,8 kN para probetas normalizadas) y el punto de tensión máxima, la correspondiente a, 1/3 de la resistencia a compresión del hormigón objeto de estudio. La tensión se aplica a una velocidad de 0,5 MPa/s.

Las probetas son preparadas y refrentadas, tal y como se indica en el apartado 2.7.1 y, a fin de adquirir un registro continuo del acortamiento experimentado por el hormigón a medida que se aplica la carga, fueron instrumentadas utilizando galgas extensométricas de 120 mm de longitud. En todos los casos, se colocan 2 galgas paralelas, dispuestas enfrentadas diametralmente, para, a la hora de realizar los cálculos, promediar la deformación registrada en la probeta.

Seguidamente, se detalla el proceso de colocación de las bandas extensométricas, que en adelante se denominarán “galgas”. Se han utilizado galgas de 120 mm de longitud, modelo PL-120-11 de la marca Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd (Fig. 90).

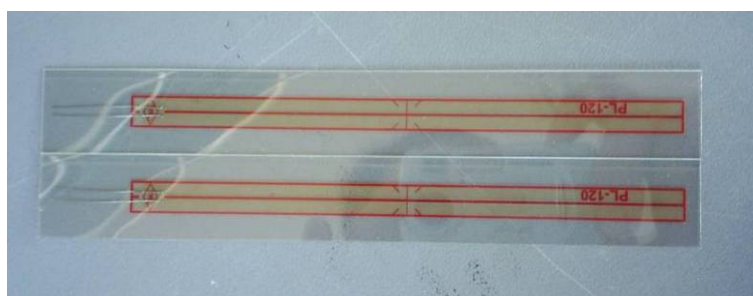


Fig. 90. Dos galgas extensométricas de 120 mm de longitud antes de su colocación en la probeta.

Para su colocación, han de seguirse los pasos que a continuación se describen. Primero, se limpia la superficie de la probeta donde se pretende adherir las galgas y se seca cuidadosamente. El equipo necesario para la colocación de las galgas (Fig. 91) consta de: las propias galgas, un pegamento bi-componente y unos conectores a los que se soldarán los hilos conductores de las galgas junto con los cables de

alimentación y registro. Con ayuda de un láser auto-alineante, se marcan dos líneas diametralmente opuestas y perpendiculares a las bases de la probeta que servirán de guías para la posterior colocación de las galgas. Seguidamente, se procede a la colocación de las mismas. Para poder alinear cómodamente las galgas, se utiliza un soporte provisto de ruedas sobre las que descansa la probeta, proporcionando apoyo y giro, y facilitando, de este modo, la ubicación de las dos galgas con las que se instrumenta cada probeta (Fig. 92).



Fig. 91. Equipo necesario para la colocación de las galgas: galgas, conectores y adhesivo.

La Fig. 92 muestra el proceso de instrumentación de una probeta cilíndrica normalizada de hormigón ya refrentada. Como puede observarse, se ha dispuesto una galga extensométrica en una generatriz de la misma para, a continuación, adherirla mediante la resina epoxídica.



Fig. 92. Detalle del proceso de colocación de las galgas.

El método de adhesión de las galgas sigue unos pasos que se esquematizan en la siguiente secuencia: 1) se mezclan los dos componentes del adhesivo (Drug A y B) en

una relación, que el fabricante establece en 9/1, y se remueven hasta que la combinación adquiere un color homogéneo; 2) se esparce el pegamento por la superficie de la probeta siguiendo la guía marcada anteriormente y por último; 3) se colocan la galga y el conector. A continuación, se muestran las imágenes que describen el proceso completo, Fig. 93, Fig. 94 y Fig. 95:



Fig. 93. Aplicación del primer componente del pegamento (90% de la mezcla) y adición del segundo componente del pegamento (10% de la mezcla).



Fig. 94. Color que toma la mezcla cuando está lista para extenderse y aplicación del adhesivo sobre la probeta.

Una vez terminado el proceso de preparación de las probetas se procede a su colocación en la máquina de ensayo y a la conexión, mediante soldadura, de los cables que llegan a la tarjeta de alimentación y toma de datos. Al colocar las probetas se ha de prestar especial atención a los mismos aspectos que en el ensayo de compresión en relación al paralelismo de las caras de aplicación de carga, para conseguir que ésta se distribuya correctamente, así como a la limpieza de los platos compresores de la máquina (Fig. 96).

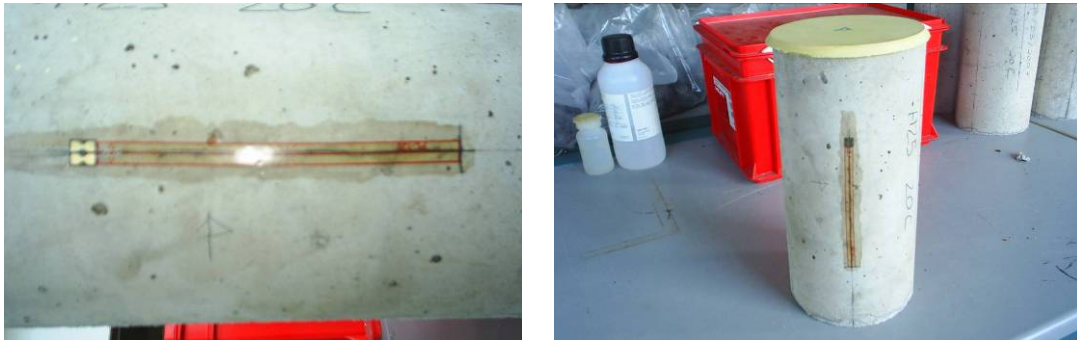


Fig. 95. Galga colocada y preparada para ser soldada y probeta lista para ser conectada y ensayada.



Fig. 96. Fotografía de la probeta instrumentada y colocada entre los platos de la prensa.

Finalmente, por medio de una tarjeta de adquisición de datos, se registran los valores de deformación que proporcionan las galgas, así como de la fuerza aplicada por el actuador por medio de la célula de carga de la máquina de ensayo.

Del promedio de la pendiente de los tramos de carga y descarga, en unidades de tensión, se obtiene el módulo de elasticidad del hormigón, como en el caso de la Fig. 97, expresado en MPa. Es conveniente descartar el primer ciclo de carga y descarga,

puesto que se trata de un periodo en el que todo el sistema (máquina, rótulas, probeta, galgas) se encuentra en proceso de ajuste.

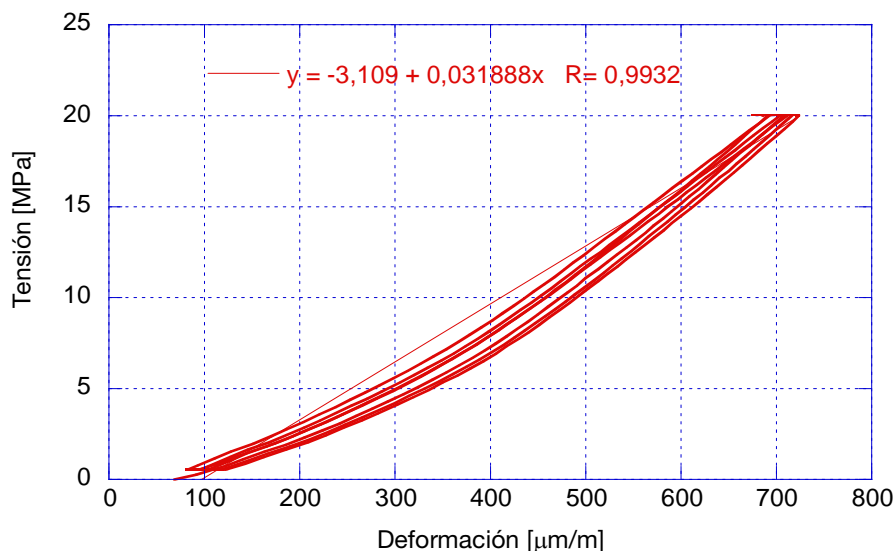


Fig. 97. Diagrama tensión-microdeformación de los ciclos de carga y descarga del ensayo de determinación del módulo de elasticidad.

2.7.3. Determinación de la resistencia a tracción indirecta

Para la determinación de la resistencia a tracción indirecta (método brasileño) de las probetas de hormigón, se han seguido las premisas establecidas en la norma *UNE-EN 12390-6:2001: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas* [143].

Para la realización de los ensayos, se utilizó una prensa servohidráulica universal de 1500 kN de carga máxima. Todas las probetas fueron ensayadas aplicando la carga homogéneamente hasta rotura.

A diferencia de lo requerido en los ensayos que involucran la compresión, en los que se ha de acondicionar la probeta, el ensayo de tracción indirecta permite realizar el ensayo sobre la muestra sin previa preparación. No obstante, tras confirmar con ensayos comparativos, que los resultados proporcionados por los tercios resultantes del despiece por corte de las probetas (apartado Fig. 55), son similares a los que se obtienen con la probeta completa, se optó por tomar como referente de la resistencia a tracción indirecta los resultados obtenidos al realizar el mismo sobre las probetas sometidas a ensayos de penetración de agua bajo presión (apartado 2.6.3).

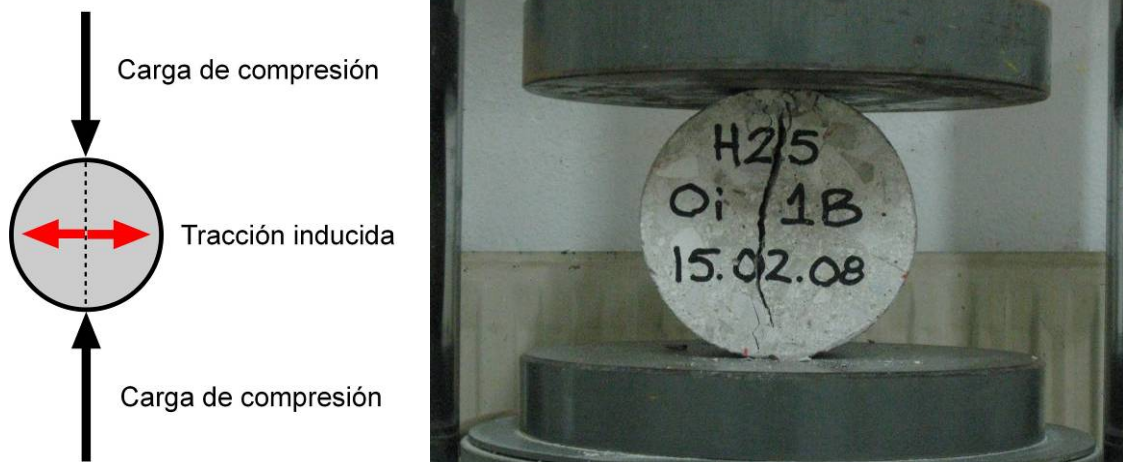


Fig. 98. Esquema de fuerzas (izq.) y tercio de probeta cilíndrica normalizada ensayada (dcha.) a tracción indirecta.

La Fig. 98 representa, por un lado, la probeta cilíndrica tras el ensayo de tracción indirecta (dcha.) y, por otro lado, a la izquierda, el esquema de fuerzas que tiene lugar cuando un cilindro es comprimido a lo largo de dos generatrices opuestas. En estas condiciones las cargas de compresión se traducen en tracciones indirectas, a partir de un plano diametral paralelo al eje de aplicación de las cargas y perpendicular a las tracciones inducidas. Alcanzada la resistencia a tracción del material la probeta fractura tal y como muestra la fotografía, Fig. 98 derecha.

Una vez realizado el ensayo, obtenida la carga de rotura a tracción indirecta y tras haber caracterizado geoméricamente la probeta, la resistencia a tracción indirecta se calcula según:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (30)$$

donde:

F es la carga máxima, expresada en N (Newtons), resistida por la probeta.

L es la longitud de la línea de aplicación de la carga en mm.

d es el diámetro en mm, de la probeta: 150 mm.

f_{ct} es la resistencia a tracción indirecta expresada en MPa.

2.8. COMPORTAMIENTO A FATIGA DEL HORMIGÓN

El límite a fatiga de cualquier material se define como el esfuerzo umbral por debajo del cual no tiene lugar ningún tipo de fallo, debido a la acumulación de daños originados por un número de ciclos de carga repetida, lo suficientemente grande como para poder considerar “*vida infinita*”. Dependerá, por lo tanto, de las consideraciones previas establecidas y éstas, a su vez, deberán estar en concordancia con las exigencias a las que se verá sometido el material a lo largo de toda su vida en servicio.

En el caso del hormigón, la primera variable a considerar es la carga o cargas de compresión que se van a ejercer sobre la probeta durante el ensayo. Para llevar a cabo un estudio acerca del comportamiento a fatiga de un determinado material, ha de definirse, en primer lugar, el tipo de fatiga que se desea analizar. La fatiga que se aplica a estos hormigones se ejerce mediante una máquina dinámica que, en este caso, puede funcionar en *control de posición* o en *control de carga*. En el primero de los casos, el intervalo de fatiga estará determinado por dos posiciones x_i y x_p , límite inferior y límite superior del intervalo. No obstante, en el hormigón se descarta este tipo de ensayo, ya que su dificultad radica en el hecho, bien conocido, de que se trata de un material especialmente rígido y poco deformable, y debido a ello, un control de posición introduciría una incertidumbre muy grande en la relación tensión-deformación. Por ello, se recomienda llevar a cabo todos los ensayos de fatiga sobre hormigón en *control de carga*. En este sentido, la caracterización se acomete entre dos tensiones, σ_i y σ_p , como límite inferior y límite superior del intervalo de tensión para el cual se somete el material a fatiga.

Para determinar el límite a fatiga, se debe concretar, asimismo, el mínimo número de ciclos a soportar de tal forma que se asuma que el mismo garantiza que el material presenta “*vida infinita*”, es decir, que aunque se someta a muchos más ciclos no romperá bajo las mismas condiciones. Según el tipo de material, valores habituales para este criterio son $1 \cdot 10^6$, $5 \cdot 10^6$ y $1 \cdot 10^7$ ciclos.

En la Fig. 99, se representa la amplitud del intervalo de tensiones $\Delta\sigma = \sigma_j - \sigma_o$ frente al logaritmo del número de ciclos, $\log N$, representación denominada curva de Wöhler

[144]. Cuando el logaritmo del número de ciclos es nulo ($N=1$), la carga máxima corresponde con la tensión nominal o resistencia de rotura a compresión del hormigón.

La curva de Wöhler presenta una asíntota que define el límite a fatiga buscado. Para proceder a su estimación, se precisa disponer de un número grande de probetas a las que someter a los distintos intervalos de carga.

En materiales flexibles, es importante tener en cuenta la deformación que se produce durante el ensayo de determinación del límite a fatiga; sin embargo, en materiales rígidos, como es el caso del hormigón, el límite de fatiga se encuentra en el entorno del escalón de rotura del método LOCATI, si que la acumulación de ciclos por debajo del límite a fatiga no deterioran el material ni reducen las prestaciones de éste sustancialmente.

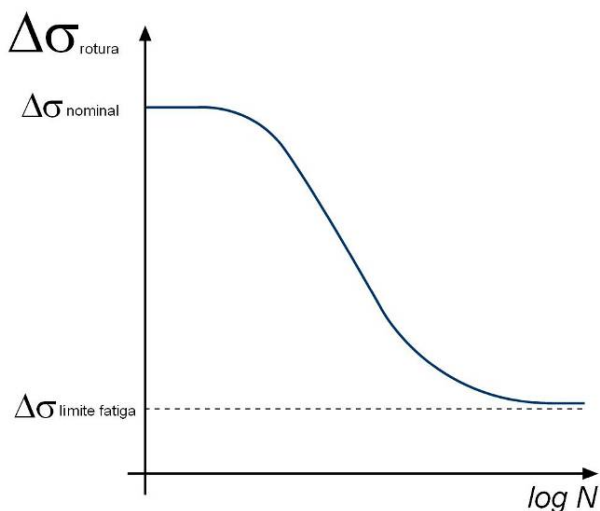


Fig. 99. Evolución de la amplitud de los ciclos de tensión variable con respecto al número de ciclos aplicados (curva de Wöhler).

En ciertos materiales termoplásticos, por ser éste un método en el que se aplican frecuencias de variación de cargas relativamente altas, puede existir un factor de deformación adicional debido a la acumulación energética, traducida en calor, que el material objeto de ensayo no es capaz de disipar al ambiente. Nuevamente, este inconveniente no es fundamental en el caso del hormigón ya que la deformación que

se produce es mínima y el calor acumulado durante la fatiga se transmite al medio más rápidamente de lo que se acumula.

El ensayo propuesto por LOCATI [145] permite aproximar el intervalo de tensiones donde se sitúa el límite de fatiga del hormigón estudiado, utilizando una única probeta. Para ello, se fija el valor de la carga σ_0 correspondiente al límite inferior y se varía, escalonadamente el límite superior del intervalo de tensión, σ_j ($j = 1, 2, 3\dots$). En cada escalón de carga, se aplica un número estipulado de ciclos de fatiga. Así, $\sigma_0 < \sigma_j$ y la amplitud entre ambos o intervalo de tensiones $\Delta\sigma_j = \sigma_j - \sigma_0$ dependerá exclusivamente del límite superior de tensión. Se definen, ahora, los valores de estos límites como $\sigma_0 = \alpha_0 \cdot \sigma_R$ y $\sigma_j = \alpha_j \cdot \sigma_R$, siendo $\sigma_0 < \sigma_j < \sigma_R$, $\alpha_0 < \alpha_j < 1$ y σ_R la tensión de rotura, a compresión simple, de la probeta que se está estudiando. En general, los límites de carga estarán referidos a la resistencia de rotura a compresión del material, previamente determinada.

Otras variables a tener en cuenta son el tipo de onda de aplicación de tensión o carga (sinusoidal, cuadrada, trapezoidal, triangular, etc.) y la frecuencia con la que se aplican los ciclos. En el estudio emprendido, se considerarán variaciones de tipo sinusoidal y frecuencias por debajo de los 10 Hz. A altas frecuencias, como requiere el caso del hormigón, la velocidad de aplicación de carga no es un parámetro relevante, si bien la resistencia a compresión simple del hormigón se ve disminuida a medida que aumenta la velocidad de aplicación de la carga con la que se determina. En este sentido, intervalos mayores de carga supondrán una velocidad de aplicación mayor si se mantiene la frecuencia de los ciclos y se aumenta el nivel de carga superior como es nuestro caso. Así, para recorrer intervalos de carga más amplios en el mismo tiempo, la velocidad de aplicación de carga desde el límite superior al límite inferior, o viceversa, deberá, también, aumentar en proporción a la separación entre ellos.

A continuación, se describe, en detalle, cómo deben ajustarse experimentalmente los parámetros antes descritos según el ensayo a fatiga que desee llevarse a cabo, y como han sido preparadas las probetas.

2.8.1. Preparación de probetas

En lo referente a la preparación de las probetas, ha sido diferente según la fase de la investigación. En la primera fase la preparación de las probetas fue la misma que se ha detallado en el apartado 2.7.2. *Determinación del módulo de elasticidad*; las probetas normalizadas fueron refrentadas e instrumentadas con dos galgas extensométricas. Siguiendo este procedimiento se hace posible efectuar un registro de la deformación instantánea de cada uno de los ciclos de fatiga y comprobar, a través de la evolución de la deformación, las características y el comportamiento frente a tensiones cíclicas del hormigón reciclado.

Por otro lado, en la segunda y tercera fases, fueron extraídos testigos, de dimensiones reducidas, a partir de las probetas normalizadas. Los testigos así obtenidos permiten realizar los mismos ensayos, a fatiga, en un tiempo notablemente más reducido, además de ofrecer la posibilidad de aplicar tensiones mayores con la utilización de los mismos niveles de carga.

A continuación, se describe el proceso de extracción de testigos. El equipo utilizado para ello es un taladro/sacatestigos HILTI Mod. DCM II con una corona diamantada HILTI de 100 mm de diámetro.

Para poder garantizar la calidad del corte y la verticalidad de la extracción, se utiliza una plancha guía taladrada previamente con la corona. Para la sujeción de las probetas normalizadas, se utiliza un portaprobetas que permite la fijación mediante tornillo-presilla. Realizado todo el montaje, y para evitar el posible deterioro de la corona, se coloca, además, un listón de madera como tope en la base de la probeta. En la Fig. 100 se presenta un detalle del proceso de corte para la posterior extracción del testigo.

Una vez finalizado el corte, se extrae la probeta con sumo cuidado para no dañar el testigo. Extraído éste, y antes de su transporte, se identifica con la misma codificación de la probeta (Fig. 101).



Fig. 100. Corona durante proceso de extracción (izq.) y extracción de la probeta del equipo portador, una vez realizada la operación de corte.



Fig. 101. Probeta y testigo preparado para ser identificado.

El siguiente paso es cortar los testigos extraídos para obtener el doble de altura que de diámetro necesaria para extrapolar y comparar los resultados que se obtienen con los deducidos a partir de probetas normalizadas. Se utiliza una sierra circular (marca Sima) con disco diamantado para realizar cortes en ambos extremos a la longitud requerida. En cualquier caso, los testigos preparados precisarán de un posterior refrentado, que se efectuará por las dos caras de aplicación de carga, corrigiéndose de esta forma, cualquier imperfección debida al proceso de preparación.

En efecto, para poder obtener el paralelismo necesario entre las caras, se refrentan las probetas utilizando azufre puro y unos moldes de refrentado adecuados a las nuevas dimensiones de la muestra. Una vez enfriado el azufre, se desmolda y se realiza un nuevo refrentado sobre la otra cara de aplicación de carga, tal y como se muestra en la Fig. 102.

Una vez refrentados los testigos, se procede a la instrumentación de los mismos. Para este cometido, mediante la utilización de un láser, se dibujan dos líneas paralelas a lo largo de la generatriz, en ambos lados del testigo, a media altura, de tal forma que divida el testigo en dos. Con adhesivo bicomponente se adhieren las galgas sobre dichas líneas, con la precaución de que los hilos conectores queden libres.



Fig. 102. Testigo durante el proceso de corte y refrentado con azufre.

A continuación, se pegan los conectores que enlazarán galgas y cables. La soldadura se realiza con estaño, uniéndose los hilos conectores de las galgas y cables transmisores al conector, Fig. 103.

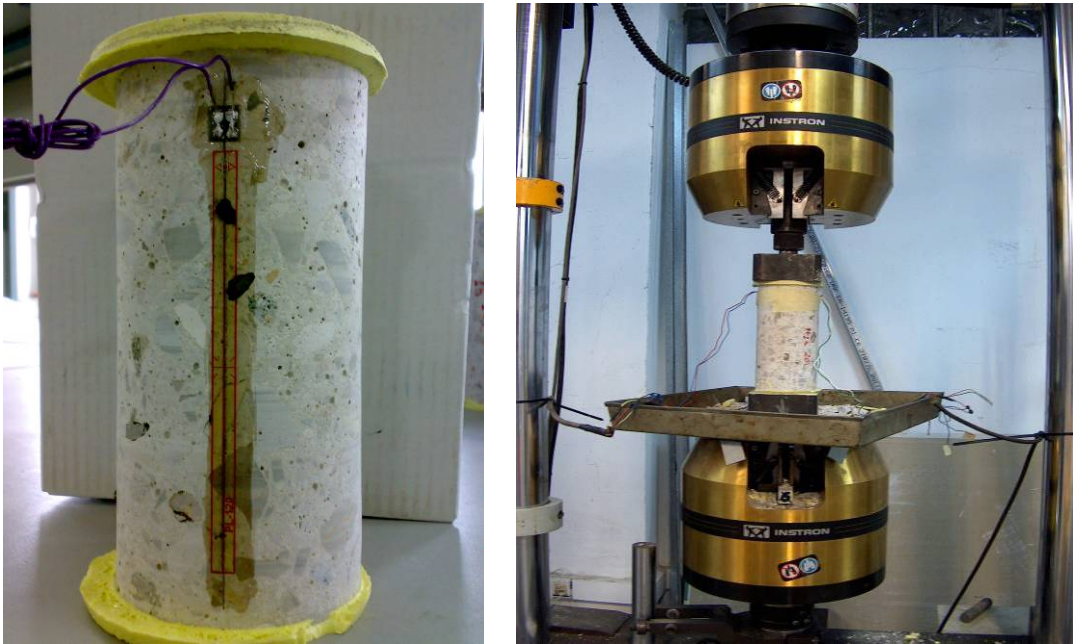


Fig. 103. Testigo de hormigón reciclado instrumentado con galgas extensométricas, conectores y cableado (izq.), y dispuesto en la máquina dinámica de ensayo (dcha.).

2.8.2. Método STAIRCASE

El método STAIRCASE permite determinar estadísticamente el límite a fatiga del material mediante la realización de una serie de ensayos, sobre distintas probetas, en torno a un intervalo de cargas entre los cuales se supone que se encuentra el límite a fatiga del material.

En primer lugar, con el propósito de definir la región de tensiones (o intervalo de cargas) donde se encuentra el límite a fatiga, se lleva a cabo una serie de ensayos estáticos con los que se determina la resistencia a compresión del hormigón. Se puede suponer, en primera instancia, que el límite a fatiga del material se encuentra, como ya se ha sugerido, en el intervalo de tensiones con tensión máxima de un 50% de la resistencia a compresión.

El ensayo consiste en realizar una fatiga monótona con los parámetros del escalón $\sigma_j = 0,5R_c$, aplicando el número de ciclos N , acordado como representativo de la “vida infinita” del hormigón.

A continuación, se repetirá el ensayo sobre otra probeta y con otro nivel tensional el cual estará determinado por el resultado del primero. Si la primera probeta supera los

N ciclos establecidos sin romper, se pasará a un nivel superior σ_{j+1} con un aumento δ de tensión manteniendo la tensión inferior constante.

$$\sigma_{j+1} = \sigma_j + \delta \quad (31)$$

Si la probeta no supera el primer intervalo, es decir, rompe antes de alcanzar los N ciclos, el segundo ensayo se efectuará con una tensión menor σ_{j-1} .

$$\sigma_{j-1} = \sigma_j - \delta \quad (32)$$

La secuencia con las siguientes probetas sigue siempre el mismo criterio: cuando se superan los N ciclos sin romper se pasa a un escalón superior. Cuando falla sin alcanzar los N ciclos, se continúa, con una nueva probeta, en un escalón menor.

En la Fig. 104 se muestra esquemáticamente un programa de ensayos STAIRCASE para 10 probetas, de las cuales 4 rompen y 6 no rompen, y que permite obtener estadísticamente el límite a fatiga del material.

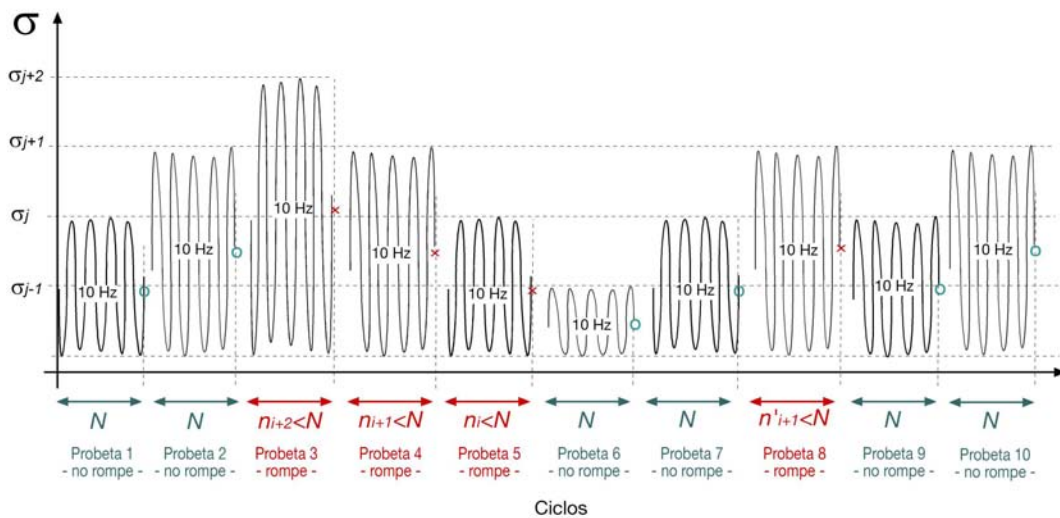


Fig. 104. Ejemplo del programa de ensayos STAIRCASE.

En la Tabla 8, se muestra el mismo programa de ensayos STAIRCASE para las diez probetas, esquematizándose con “O” para un nivel superado y “X” para uno no superado.

Tabla 8. Resultados ejemplo obtenidos en una fatiga del hormigón.

Escalón	Tensión [σ_j]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	σ_{j+2}			x							
3	σ_{j+1}		0		x				x		0
2	σ_j	0				x		0		0	
1	σ_{j-1}						0				

Nota.- “O” representa un ensayo válido, donde la probeta soporta sin romper el número de ciclos asignado, y “x” hace referencia a un ensayo no válido, en el cual la probeta rompe antes de alcanzar el número de ciclos establecido.

A continuación, para determinar el límite a fatiga, se realizan las siguientes consideraciones.

- **SMF** Se define como el suceso menos frecuente, “O” o “X”, y se considera VÁLIDO si entre todos los ensayos ha habido mayor número de ellos que han superado, “O”, el número de ciclos establecido y toma el valor de NO VÁLIDO si ha habido mayor número de ensayos que no han superado, “X”, los ciclos como consecuencia de la rotura de la probeta.
- σ_0 Se asigna el valor de $i=0$ al menor escalón en el que tiene lugar un SMF.
- δ Es la semiapertura del intervalo. A menor amplitud, mayor precisión en los cálculos, si bien se requerirán más ensayos.

Así, en el ejemplo anterior, el escalón donde tiene lugar primer SMF es el $j+2$ ($\sigma_i = \sigma_{j+2}$) y que pasará a denominarse σ_0 .

Para cada nivel i o escalón j estudiado:

- i Es el número de nivel desde σ_0 .

- n_i Es el número de sucesos asociados al SMF del nivel i -ésimo.
- $A = \sum i \cdot n_i$
- $N = \sum n_i$
- $B = \sum i^2 \cdot n_i$

El límite a fatiga es, entonces:

$$\sigma_{LF} = \sigma_0 + \delta \left(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (33)$$

En (33), se tomará "+" si SMF es VÁLIDO y "-" si SMF es NO VÁLIDO.

La desviaci3n tpica se calcula en base a la siguiente expresi3n:

$$S = 1,62 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{B \cdot N - A^2}{N^2} + 0,029 \right) \quad (34)$$

λ Es la semiapertura del intervalo.

Finalmente, el límite a fatiga del material se expresa como:

$$\boxed{\sigma_{LF} = \sigma_{LF} \pm S \text{ [MPa]}} \quad (35)$$

La f3rmula (35) es válida solo si se verifica que:

$$\frac{B \cdot N - A^2}{N^2} > 0,3 \quad (36)$$

Ejemplo STAIRCASE

Como ejemplo, se estudia en detalle el siguiente caso particular. Supóngase que los valores de las tensiones son los que se plantean en la Tabla 9, con una semiapertura de 5 MPa.

Tabla 9. *Ejemplo de una serie de ensayos STAIRCASE.*

Escalón	Tensión [σ]	1	2	3	4	5	6
4	25			x			
3	20		0		x		
2	15	0				x	
1	10						0

En primer lugar, se elaborará una tabla con todos los parámetros necesarios para el cálculo del valor del límite a fatiga y la desviación estándar, identificando, en primer lugar, el nivel i donde tiene lugar el primer SMF "O". Estos datos se recogen en la Tabla 10.

Tabla 10. *Parámetros necesarios para la determinación del límite a fatiga y su desviación estándar.*

Parámetro:	i	n_i	in_i	$i^2 n_i$
$\sigma_2 = 25$	2	0	0	0
$\sigma_1 = 20$	1	1	1	1
$\sigma_0 = 15$	0	1	0	0
N		2		
A			1	
B				1

Se comprueba la condición (36) para verificar la validez de (35):

$$\frac{B \cdot N - A^2}{N^2} = \frac{1 \cdot 1 - 1^2}{2^2} = 0 < 0,3 \Rightarrow \text{no se verifica.}$$

Por tanto, el número de ensayos no es suficiente para estimar el límite a fatiga. Se amplía el número de ensayos obteniendo ahora los siguientes resultados, Tabla 11.

Tabla 11. Resultados obtenidos en una fatiga del hormigón, 10 ensayos.

Escalón	Tensión [σ]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	25			x							
3	20		0		x				x		0
2	15	0				x		0		0	
1	10						0				

Se recalculan los parámetros N, A y B teniendo en cuenta que ahora el SMF es "X" y el escalón más bajo donde tiene lugar es el escalón 2 (15 MPa).

Tabla 12. Parámetros necesarios para la determinación del límite a fatiga y su desviación estándar.

Parámetro:	i	n_i	$i n_i$	$i^2 n_i$
$\sigma_2 = 25$	2	1	2	4
$\sigma_1 = 20$	1	2	2	2
$\sigma_0 = 15$	0	1	0	0
N		4		
A			4	
B				6

Se comprueba la condición (36) para verificar la validez de (35):

$$\frac{B \cdot N - A^2}{N^2} = \frac{6 \cdot 4 - 4^2}{4^2} = 0,5 > 0,3 \Rightarrow \text{se verifica.}$$

En (33), se tomará "-" por ser el SMF NO VÁLIDO.

$$\sigma_{LF} = \sigma_0 + \delta \left(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) = 15 + 5 \left(\frac{4}{4} - 0,5 \right) = 17,5 \text{ MPa}$$

La desviación típica:

$$S = 1,62 \cdot \lambda \left(\frac{B \cdot N - A^2}{N^2} + 0,029 \right) = 1,62 \cdot 2,5 \left(\frac{6 \cdot 4 - 4^2}{4^2} + 0,029 \right) = 2,14 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{LF} = 17,50 \pm 1,71 \text{ MPa}$$

2.8.3. Método LOCATI

El método LOCATI es una técnica experimental de caracterización empleada para determinar, de forma aproximada, el límite a fatiga del material. Este método recoge una propuesta de ensayo sobre una única probeta como alternativa a la establecida por los diagramas de Wöhler, que requiere de la utilización de varios ensayos y, en consecuencia, de varias probetas para obtener la resistencia a fatiga de un componente.

De forma práctica, se parte de la aplicación de trenes de ondas de carga, de compresión en este caso, con una amplitud constante durante un número determinado de ciclos, transcurridos los cuales se incrementa el límite superior de carga, σ_M en una cantidad preestablecida, δ , y conservando el resto de parámetros: límite inferior de carga, σ_m , número de ciclos, N , y la frecuencia, ν . Este proceso se repite sucesivamente hasta que se produce la rotura o deterioro excesivo del componente en análisis.

De este modo, el método permite de forma relativamente rápida, y sin un coste elevado de material, alcanzar el objetivo propuesto, dado que, con una sola probeta se puede tener una buena aproximación al límite a fatiga del material. Sin embargo, no proporciona un valor concreto de dicho límite y, por ello, el procedimiento suele combinarse con otras metodologías que consiguen afinar más en la averiguación de la tensión límite a fatiga.

En primer lugar ha de fijarse el nivel mínimo de tensión, $\sigma_m = \sigma_0$, común para todos los escalones de fatiga y un nivel de tensión máximo, $\sigma_M = \sigma_j$ variable según j ($j=1,2,3\dots$) que referencia el nivel correspondiente. Así, cada nivel de tensión vendrá definido por:

$$\sigma_j = \sigma_{j-1} + \delta \quad (37)$$

La mayor dificultad de esta metodología radica en la determinación del valor de tensión mínima, σ_0 , y el valor de δ . En este sentido, en primera aproximación, la tensión del intervalo de rotura puede suponerse en torno al 50% de la resistencia del

material. El incremento δ deberá tomar un valor tal que permita completar un número de entre cinco y diez escalones de 100.000 ciclos cada uno. Por lo tanto, un valor adecuado de σ_0 es el 10% y de σ_1 de un 20% de la resistencia a compresión respectivamente.

No obstante, en ocasiones resulta más cómodo aumentar la tensión superior, σ_j , en una cantidad independiente de la resistencia a compresión; así por ejemplo, se podría aumentar el valor, expresado en términos tensión, en una cantidad fija para todas las distintas dosificaciones de hormigón reciclado, independientemente de su resistencia a compresión. Así, supuesta una resistencia a compresión promedio de todas las dosificaciones de en torno a 50 MPa, los valores $\sigma_0 = 5 \text{ MPa}$ y $\sigma_1 = 10 \text{ MPa}$, con $\delta = 5 \text{ MPa}$ son adecuados para ensayar todas las probetas.

La Tabla 13 recoge en detalle el programa de ensayos para la determinación del nivel j donde se sitúa el límite a fatiga de un hormigón reciclado, aumentando sucesivamente los escalones, una vez superado el número de ciclos N , hasta el escalón de rotura.

Tabla 13. Programa de ciclos del ensayo LOCATI.

Escalón j	Ciclos N	Lím. Inf. σ_0 [MPa]	Lím. Sup. σ_j [MPa]	Punto medio $\langle \sigma_j \rangle$ [MPa]	Amplitud Δ_j [MPa]
1	0-1·10 ⁵	5	10	7,5	2,5
2	1·10 ⁵ -2·10 ⁵	5	15	10,0	5,0
3	2·10 ⁵ -3·10 ⁵	5	20	12,5	7,5
4	3·10 ⁵ -4·10 ⁵	5	25	15,0	10,0
5	4·10 ⁵ -5·10 ⁵	5	30	17,5	12,5
6	5·10 ⁵ -6·10 ⁵	5	35	20,0	15,0

Si se representan en un gráfico todos los ciclos a los que se ve sometida la probeta, frente a las tensiones aplicadas en este ejemplo, los escalones quedarían tal y como se muestran en la Fig. 105; en ella se puede observar un ensayo en que cada escalón supone la realización de 1·10⁵ ciclos y la tensión se ve incrementada en 5 MPa, con cada escalón, hasta la rotura de la probeta.

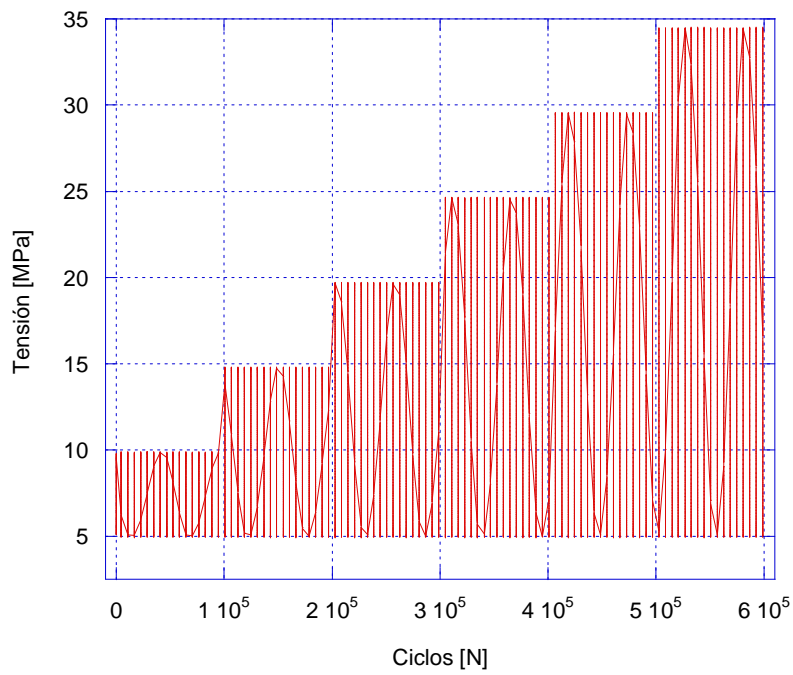


Fig. 105. Ejemplo del programa de escalones del ensayo LOCATI.

Con el fin de determinar la precisión de la obtención del límite a fatiga mediante la técnica LOCATI, se compararán los resultados con los obtenidos mediante la técnica STAIRCASE.

2.9. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL HORMIGÓN

Para llevar a cabo estos análisis, se ha utilizado un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM – 5800 LV equipado con microanálisis por energía dispersiva de rayos X. Se han realizado observaciones microscópicas distintas en otras tantas zonas de cada muestra, habiendo sido posible discernir algunos detalles morfológicos. Las muestras analizadas en el microscopio electrónico fueron reducidas hasta un tamaño adecuado para su metalización y obtención de imágenes micrográficas, con el objetivo de analizar la microestructura en cuanto a la compacidad del material, crecimiento de productos de hidratación del cemento y fisuras generadas en ensayos mecánicos.



Fig. 106. Microscopio electrónico de barrido marca JEOL JSM – 5800 LV.

Todas las micrografías que se presentan han sido obtenidas de una superficie de fractura principal de muestras ensayadas a fatiga mediante la técnica LOCATI. Entre otras características se han observado las formas de la fractura principal (plano de observación), las fracturas secundarias (origen, propagación e interconexión) y la porosidad de la pasta de cemento.