

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES Y TRABAJO

## FUTURO

Al inicio de la investigación se plantean como objetivos la realización de ensayos de caracterización física, mecánica y de durabilidad de los hormigones reciclados, fabricados con las cuatro relaciones agua/cemento teóricas (0,65; 0,55; 0,50 y 0,45) y diferentes contenidos de árido reciclado (0%,20%, 50% y 100%), curados en cámara de humedad e intemperie marina, y analizados a los 28, 180 y 365 días. Por otra parte, se han analizado las mismas dosificaciones en cuanto a su comportamiento a fatiga para hormigones curados en cámara de humedad y con 365 días de edad.



## 5.1. CONCLUSIONES

A continuación, se detallan las principales conclusiones derivadas de los análisis llevados a cabo a lo largo de la Tesis:

- En lo referente a los áridos reciclados de hormigón, se ha podido comprobar que dos distintas partidas, presentando ligeras diferencias en cuanto a su composición, son adecuadas para la fabricación de hormigones reciclados de aplicación estructural.
- En la fabricación de hormigones con incorporación de árido reciclado ha de prestarse especial atención a la capacidad absorbente de los últimos. Se han aplicado tres distintas metodologías de fabricación y se han propuesto formulaciones para el cálculo de la relación agua/cemento efectiva, encontrándose que una sustitución total del árido grueso por árido reciclado requiere de un aporte de agua un 5% mayor para mantener las consistencias.
- En cuanto a las propiedades mecánicas de los áridos reciclados, en los ensayos de machacabilidad instrumentados, se ha podido identificar una región de comportamiento lineal. La pendiente de este tramo es proporcional al módulo de elasticidad del hormigón, quedando así justificadas y cuantificadas las conclusiones alcanzadas por otros autores en relación al aumento de deformabilidad de los hormigones reciclados.
- En referencia a la resistencia a compresión del hormigón reciclado, una reducción de un 0,05 en la relación agua/cemento podría ser suficiente para garantizar la misma resistencia en los hormigones con un 20% de incorporación de grava reciclada que en los hormigones de control, si la relación agua/cemento de éstos está por debajo de 0,6. No obstante, la reducción necesaria para garantizar las mismas resistencias es mayor a medida que disminuye la relación agua/cemento efectiva. El modelo de comportamiento bajo cargas de compresión propuesto, que ha sido contrastado con los resultados de numerosos autores, indica que, a partir de 10 MPa de resistencia, el árido reciclado comienza a influir sobre las propiedades mecánicas.

- En cuanto a la durabilidad del hormigón reciclado, se detecta una pérdida de prestaciones en todas las propiedades analizadas en torno al 10%. Esta reducción puede atribuirse a las peores condiciones de curado en cuanto a humedad y temperatura. Las pérdidas debidas a la incorporación de árido reciclado pueden ser compensadas con la utilización de cementos sulforresistentes e introduciendo pequeñas variaciones en la dosificación. Así, cuando se toma como referencia un hormigón de control con una relación agua/cemento de 0,50, mínimo exigido por la EHE-08 para ambiente marino, una reducción de 0,03 en este valor permite sustituir un 20% de árido reciclado sin perjuicio sobre la durabilidad. La influencia del árido reciclado sobre la durabilidad es mayor cuanto mayor es la relación agua/cemento.
- El límite a fatiga de los hormigones de control se sitúa en torno al 60-70% de la resistencia a compresión. Éste valor disminuye a medida que aumenta el grado de sustitución hasta valores de entre 40-60% en el caso del hormigón con el 100% de grava reciclada.
- La influencia del árido reciclado en el límite a fatiga del hormigón reciclado es mayor cuanto menor es la relación agua/cemento. Por debajo de 30 MPa de resistencia a compresión, los procesos de daño por fatiga pasan a estar gobernados por las características de la pasta de cemento, no teniendo gran influencia la presencia de árido reciclado.
- Mediante la metodología STAIRCASE puede predecirse si el hormigón presenta vida infinita, para los niveles tensionales correspondientes, a partir de la velocidad de deformación de los  $1 \cdot 10^5$  primeros ciclos. Si la velocidad de pérdida de rigidez se sitúa por debajo de los 5000 Pa/ciclo, podrán considerarse capaces de superar los  $2 \cdot 10^6$  de ciclos (vida infinita).
- Por último, se ha establecido una relación entre la metodología STAIRCASE y la de fatiga acelerada LOCATI. En términos generales, el límite a fatiga se sitúa en torno al 80% del intervalo de tensiones máximo alcanzado en el ensayo LOCATI. Esta técnica, sumada a un segundo ensayo LOCATI en un intervalo menor de tensiones, en torno al 80% de la tensión del escalón de rotura, permitirá obtener con mayor precisión y rapidez el límite a fatiga del hormigón.

## 5.2. CONCLUSIONS

After completing the analysis of the results obtained in this Thesis, the following conclusions can be drawn.

- Regarding the recycled aggregate from concrete, it has been shown that two different batches, showing slight differences in their composition, are suitable for the manufacture of structural recycled concrete.
- In the manufacture of concrete with recycled aggregate incorporation attention to the absorptive capacity of the aggregate must be taken. Three different manufacturing methods were applied and to calculate the effective water/cement ratio formulations have been proposed. For the total replacement of recycled coarse aggregate, should be added 5% more water to maintain the same workability.
- Regarding the mechanical properties of recycled aggregates in instrumented crushing tests, a region of linear behaviour is identified. The slope of this linear behaviour is proportional to the modulus of elasticity of concrete. This justifies results obtained by other authors in relation to increased deformability of recycled concrete.
- Referring to the recycled concrete compressive strength, a reduction of 0.05 in the water/cement ratio is sufficient to ensure the same strength in concrete with a 20% incorporation of recycled aggregate as a control concrete with a water/cement ratio below 0.6. However, to guarantee the same strength the necessary reduction is less for a lower effective water/cement ratio. All concretes present the same strength when the water/cement ratio has values below to 0.45. The proposed strength model, compared with the results of numerous authors, indicates that from 10 MPa on the recycled aggregate begins to have negative influence on mechanical properties of concrete.
- A loss of durability properties of the recycled concrete cured under marine environment about 10% is detected. This reduction can be attributed to the worst curing conditions regarding to the humidity and temperature. Losses due to the incorporation of recycled aggregate can be compensated with the use of

sulfur-resistant cements and introducing small mix variations. Thus, in control concrete with a water/cement ratio of 0.50, the minimum required by EHE-08 for marine environment, a reduction of 0.03 in this value and a incorporation of 20% recycled coarse aggregate without prejudice on the durability can be performed. The influence of recycled aggregate on the durability is greater the higher the water/cement ratio is.

- The fatigue limit of control concrete is around 60-70% of the compressive strength. This value decreases with the increase of the degree of substitution to values between 40-60% for 100% recycled concrete.
- The influence of recycled aggregate in the fatigue limit of recycled concrete is greater the lower the water/cement ratio is. For less than 30 MPa compressive strength, the processes of fatigue damage is governed by the characteristics of the cement paste, having low influence the presence of recycled aggregate on the fatigue behaviour.
- Using the STAIRCASE methodology, it can be predicted if the concrete has infinite life, to the corresponding strength levels, from the strain rate of the first  $1 \cdot 10^5$  cycles. If the rate of loss of stiffness is below than 5000 Pa/cycle, this concrete may be considered able to exceed  $2 \cdot 10^6$  cycles (infinite life).
- Finally, it is established a relationship between the fatigue methodology STAIRCASE and LOCATI. The results show that the fatigue limit is around 80% of the maximal strength range of the LOCATI test. This technique combined with a second LOCATI test at a lower strength ranges, around the 80% of the maximal strength range of the step of breaking, will provide more precisely the fatigue limit of the concrete.

## **5.3. RECOMENDACIONES NORMATIVAS**

El objetivo principal de la investigación llevada a cabo a lo largo de estos años ha sido la redacción y posterior revisión del Anejo 15 de la EHE-08, al amparo, en primer lugar, del Proyecto Prenormativo para el Estudio de la Viabilidad Técnica de la utilización de Áridos Reciclados en Hormigones de Aplicación Estructural – RECNHOR- y, después, del proyecto, en la tarea correspondiente al hormigón reciclado, titulado Construcción Limpia, Eficiente y Amigable con el Medio Ambiente – CLEAM-, abordando ambos el estudio de la viabilidad técnica de la utilización de hormigones reciclados de aplicación estructural. En este sentido, y tras las conclusiones obtenidas, se proponen las recomendaciones normativas que se enumeran a continuación.

### **5.3.1. Fabricación del hormigón**

Se recomienda que el hormigón con árido reciclado se fabrique en central amasadora y que el árido reciclado sea presaturado/humectado a fin de reducir el efecto negativo que la alta absorción tiene sobre el hormigón reciclado.

### **5.3.2. Dosificación de materiales componentes**

Los métodos de dosificación habituales para los hormigones convencionales son válidos para los hormigones reciclados con un porcentaje de árido reciclado no superior al 20%. En cualquier caso, se recomienda realizar ensayos previos para ajustar la dosificación. Por debajo de estos porcentajes de incorporación de árido reciclado se permitirá añadir a la mezcla, tras la incorporación del árido grueso, una cantidad de agua extra tal que compense el 70% de la absorción total del árido reciclado.

En hormigones reciclados con sustituciones superiores al 20%, y debido a la menor calidad de los áridos reciclados, para mantener la misma resistencia y durabilidad que un hormigón convencional, se necesitará un contenido mayor de cemento o una menor relación agua/cemento en su dosificación. Ésta pérdida de resistencia será tanto mayor cuanto mayor sea la relación agua/cemento del hormigón. Por ello se

desaconseja su utilización en hormigones con relaciones agua/cemento por debajo de 0,45.

Igualmente, para conseguir la consistencia deseada, suele ser necesario añadir más agua a la dosificación a fin de compensar la mayor absorción del árido reciclado. Esta cantidad extra de agua se incorporará junto con los áridos gruesos mediante presaturación del árido reciclado y/o la utilización de aditivos plastificantes o superplastificantes en la dosificación.

### **5.3.3. Durabilidad del hormigón reciclado**

La durabilidad del hormigón reciclado con un porcentaje de árido reciclado no superior al 20% es similar a la que presenta un hormigón convencional, por lo que son de aplicación las prescripciones recogidas en el articulado. Sin embargo, la mayor porosidad del árido reciclado hace al hormigón reciclado que lo incorpora más susceptible a sufrir los efectos del ambiente, por lo que se deberán tomar medidas especiales cuando se utilice en ambientes agresivos y en porcentajes superiores al 20% de árido reciclado.

Se recomienda llevar a cabo ensayos de caracterización específicos: porosidad, penetración de agua bajo presión y permeabilidad al oxígeno. Este comportamiento deberá tenerse en cuenta en la dosificación de la mezcla, mediante un incremento en el contenido de cemento o una disminución de la relación agua/cemento. Otra posibilidad es aumentar el recubrimiento de las armaduras necesario en determinados ambientes agresivos.

### **5.3.4. Comportamiento a fatiga**

La incorporación del 20% de árido reciclado supone una pérdida de aproximadamente un 10% del módulo de elasticidad y el límite a fatiga.

La incorporación del 100% de árido reciclado puede suponer una pérdida en el módulo de elasticidad y el límite a fatiga de un 30%. La incorporación de altos porcentajes de sustitución penaliza en mayor medida a los hormigones con menores relaciones agua/cemento. Estas pérdidas podrán ser compensadas con la reducción de la relación agua/cemento y el incremento de la cantidad de cemento.



Se deberán llevar a cabo ensayos específicos con el objetivo de garantizar el adecuado comportamiento del hormigón con sustituciones mayores del 20%.

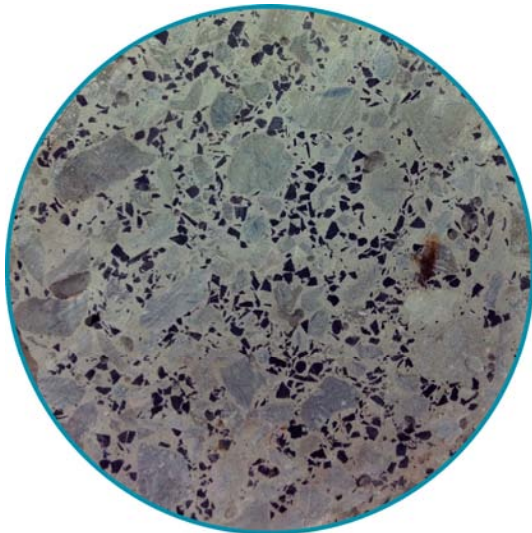


## 5.4. TRABAJO FUTURO

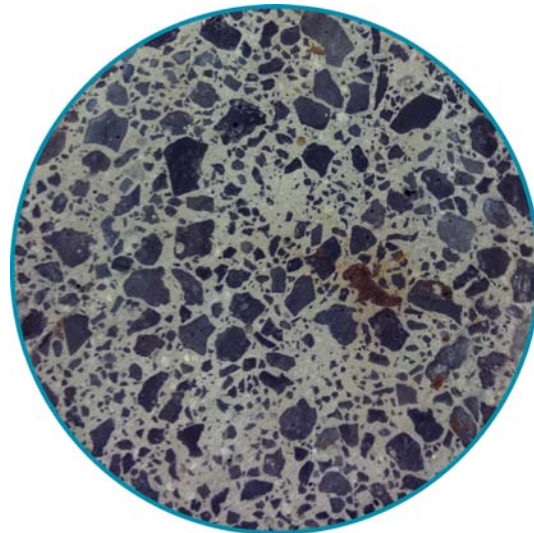
Dentro de las posibilidades que ofrece el hormigón reciclado como sumidero de residuos se pueden encontrar, además de los áridos reciclados procedentes de RCD aquí analizados, una amplia gama de materiales cuya utilización supondría un beneficio medioambiental y, en algunos casos, una mejora en alguna de las características de los hormigones obtenidos con ellos.

Entre otros materiales susceptibles de ser incorporados en el hormigón están los materiales poliméricos, como es el caso de la poliamida reforzada con fibra de vidrio, Fig. 234. Un caso particular es el de las placas acodadas de las sujeciones del tren de alta velocidad español, fabricadas por inyección de poliamida reforzada con fibra de vidrio, y la ingente cantidad de residuos que se producen cuando estas placas son sustituidas al haber cumplido su vida útil. Además, los hormigones fabricados con este tipo de incorporación poseen comportamientos elásticos que no se consiguen con otros materiales.

Por otro lado, el hormigón es susceptible de ser sumidero de otros residuos industriales, como es el caso de las escorias negras de fundición, Fig. 235.



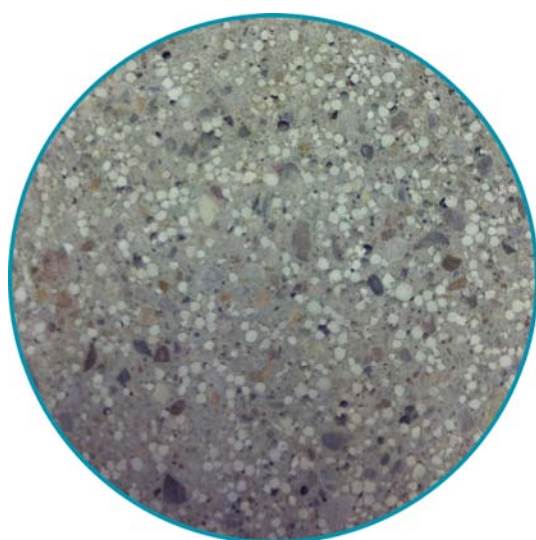
*Fig. 234. Hormigón con incorporación de poliamida reforzada con fibra de vidrio.*



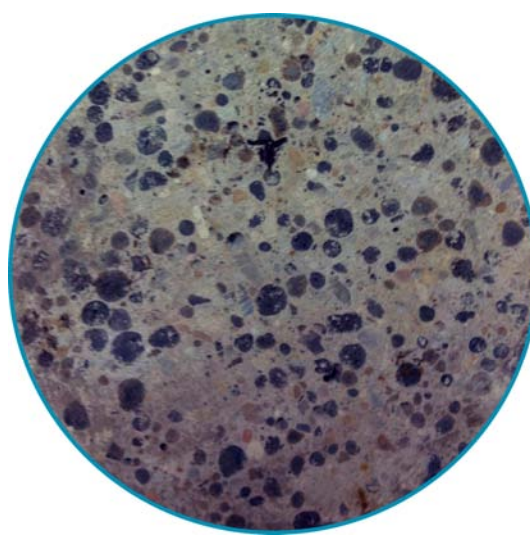
*Fig. 235. Hormigón con incorporación de escorias negras de fundición.*

En este caso, la escoria aporta al hormigón una gran densidad sin menoscabo de propiedades mecánicas, interesante desde el punto de vista de las cimentaciones.

En contraposición, la incorporación de materiales ligeros, como por ejemplo el polietileno expandido, Fig. 236, confiere al hormigón reciclado fabricado con él una menor densidad. No obstante, como puede suponerse, este tipo de incorporaciones conlleva una importante merma en las propiedades mecánicas. Una manera alternativa para aligerar los hormigones es la incorporación de arlita, Fig. 237. En esta ocasión, el material incorporado contribuye a la resistencia del material al tiempo que reduce la densidad del conjunto notablemente.



*Fig. 236. Hormigón con incorporación de polietileno expandido.*

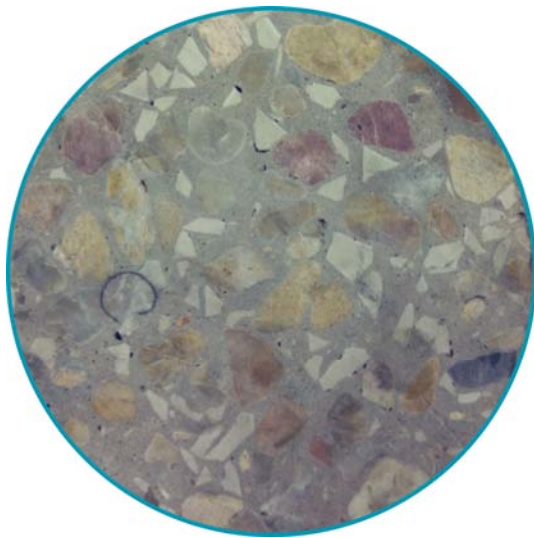


*Fig. 237. Hormigón con incorporación de arlita.*

Otro tipo de materiales susceptibles de ser incorporados en el hormigón son los cerámicos. La Fig. 238 representa el corte de una probeta cilíndrica normalizada fabricada con residuos cerámicos procedentes de sanitarios, considerados también RCD. En este caso, este tipo de áridos presenta un buen comportamiento en cuanto a la durabilidad aunque la unión entre la pasta de cemento y la superficie esmaltada no suele ser buena.

En frente se encuentran los hormigones con incorporación de árido reciclado cerámico procedente de ladrillo, Fig. 239. En esta ocasión, el material presenta una

muy buen unión con la matriz de cemento aunque, como puede entreverse, su utilización presenta dos inconvenientes. En primer lugar, la resistencia de los áridos suele ser baja y la friabilidad alta, motivos por los cuales el hormigón presentará unas pérdidas importantes de resistencia a compresión. Por otra parte, la alta porosidad de estos áridos reciclados redonda negativamente en la elaboración de los hormigones puesto que esta alta porosidad y absorción demandará mayor cantidad de agua en el momento del amasado.



*Fig. 238. Hormigón con incorporación de cerámicos procedentes de sanitarios.*

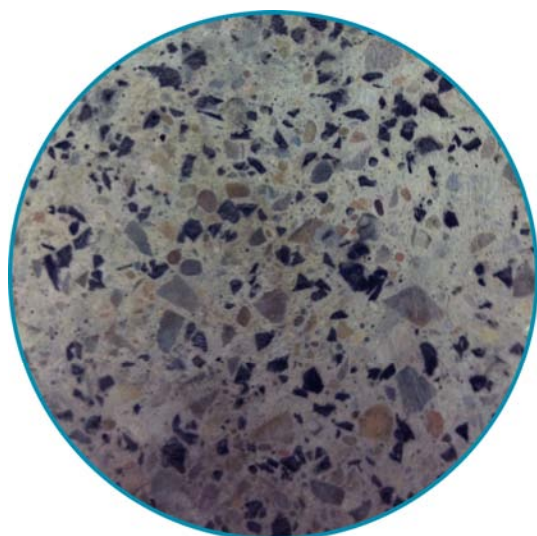


*Fig. 239. Hormigón con incorporación de cerámicos procedentes de ladrillos.*

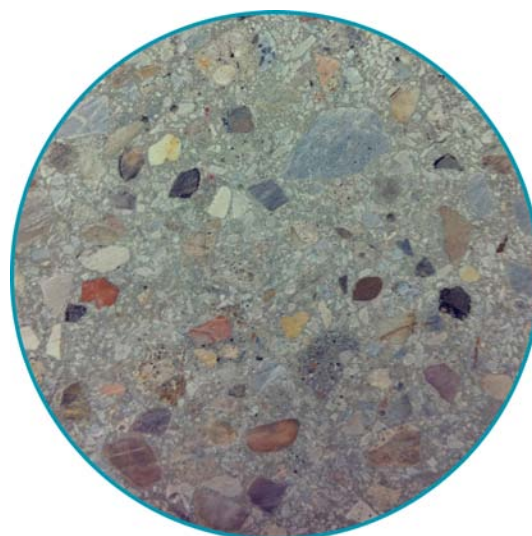
En la Fig. 240 se muestra el corte transversal de una probeta normalizada fabricada con incorporación de residuos procedentes de la trituración de caucho de neumáticos fuera de uso. En este caso los hormigones poseen un notable comportamiento elástico, aunque con una importante pérdida de resistencia. Asimismo, en los estudios llevados a cabo en el LADICIM, se ha podido comprobar cómo estos materiales compuestos no responden adecuadamente a los ciclos de humedad-sequedad o hielo-deshielo, en tanto en cuanto los materiales presentan coeficientes de dilatación muy diferentes.

Finalmente, la opción más viable, similar a la ampliamente analizada en esta Tesis, es la que incorpora áridos reciclados mixtos con distintos porcentajes de árido procedente de hormigón y árido procedente de materiales cerámicos, Fig. 241. Por

ello, un profundo estudio de este tipo de áridos, atendiendo a las propiedades de los componentes y productos, y la búsqueda de aplicaciones supondría otra importante reducción en el volumen de residuos de construcción y demolición generados.



*Fig. 240. Hormigón con incorporación de caucho procedente de neumáticos.*



*Fig. 241. Hormigón con incorporación de áridos reciclado mixtos: hormigón y cerámicos.*

En lo referente a los hormigones reciclados con áridos provenientes de hormigón, analizados en esta Tesis como hormigones estructurales, variaciones en las proporciones con las que son incorporados, en las cantidades de cemento, en las relaciones agua/cemento y mediante la utilización de aditivos podrían conducir al descubrimiento de que éstos pueden trabajar como hormigones autocompactantes e incluso como hormigones de alta resistencia.

En referencia a las cuestiones que esta Tesis no ha alcanzado a analizar, se encuentra, por ejemplo, el estudio del comportamiento al fuego, la fluencia, el ataque de agentes químicos agresivos (sulfatos, ácidos, álcali-sílice, etc.) y el comportamiento bajo ciclos de humedad-sequedad o hielo-deshielo. Tampoco, la viabilidad para la reparación de estructuras fabricadas con hormigón reciclado (utilización de superficies protectoras, protección catódica, extracción de electrolitos de cloro, etc.).

En cuanto a las cuestiones que la presente Tesis no ha alcanzado a resolver, de los resultados del comportamiento a fatiga presentados podrán obtenerse conclusiones más generales que permitan entender con mayor rigor la respuesta de los hormigones reciclados a las cargas cíclicas de compresión, así como establecer una correlación entre el comportamiento a fatiga y el comportamiento bajo cargas estáticas.