



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# Análisis del comportamiento estructural del hormigón de alta resistencia fabricado con árido reciclado

Treball realitzat per:

**Miquel Ramon Pérez Garcia**

Dirigit per:

**Miren Etxeberria Larrañaga**

Grau en:

**Enginyeria de la Construcció**

Barcelona, 20 de Juny de 2014

Departament de Materials de la Construcció

**TREBALL FINAL DE GRAU**

## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	5
RESUMEN .....	8
ABSTRACT .....	9
1. INTRODUCCIÓN .....	10
1.1 ASPECTOS GENERALES .....	10
1.2 OBJETIVOS .....	10
1.3 ESTRUCTURA DE LA TESINA.....	11
2. ESTADO DEL ARTE.....	13
2.1 DEFINICIÓN DE ÁRIDO RECICLADO.....	13
2.2 PROPEIDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS APLICADOS A LA FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN .	13
2.2.1 Granulometría .....	13
2.2.2 Coeficiente de forma e índice de lajas .....	15
2.2.3 Densidad y Absorción .....	15
2.2.5 Coeficiente de Los Angeles.....	16
2.2.5 Contaminantes e impurezas.....	17
2.3 DISEÑO DE MEZCLA DE UN HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO .....	17
2.4 PROPIEDADES FÍSICAS DEL HORMIGÓN RECICLADO.....	19
2.4.1 Densidad.....	19
2.5 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN RECICLADO.....	19
2.5.1 Resistencia a compresión .....	20
2.5.2 Resistencia a tracción .....	24
2.5.3 Módulo elástico del hormigón reciclado.....	26
2.5.4 Adherencia .....	27
2.6 DURABILIDAD DEL HORMIGÓN .....	29
2.6.1 Características físicas.....	29
2.6.2 Durabilidad. Procesos físicos .....	32
2.6.3 Durabilidad. Procesos químicos .....	33
2.6.4 Retracción y fluencia .....	36
2.7 APLICACIÓN DEL HORMIGÓN RECICLADO: LA TRAVIESA.....	39
2.7.1 La traviesa de hormigón .....	40
2.7.2 Especificaciones técnicas para el hormigón de las traviesas .....	41
3. MATERIALES .....	46
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	46
3.3.1 Cemento .....	46

3.3.2 Áridos.....	46
3.3.2 Aditivo .....	50
4. METODOLOGÍA Y ENSAYOS DEL HORMIGÓN.....	51
4.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN.....	51
4.1.1 Fabricación .....	51
4.1.2 Dosificaciones utilizadas.....	52
4.1.3 Probetas, densidad y compactación del hormigón fresco .....	54
4.1.4 Desamoldar, marcaje y conservación de las probetas .....	55
4.2 ENSAYOS DE HORMIGÓN ENDURECIDO .....	56
4.2.1 Ensayo de compresión.....	56
4.2.2 Ensayo de tracción indirecta - Ensayo Brasileño.....	57
4.2.3 Ensayo de adherencia (pull-out) .....	59
4.2.4 Ensayo de retracción por secado .....	61
4.3 ENSAYOS DE LA TRAVIESA .....	63
4.3.1 Ensayo flexión positiva en sección central.....	64
4.3.2 Ensayo flexión negativa en sección central.....	67
4.3.3 Ensayo flexión positiva en sección bajo carril .....	69
4.3.4 Ensayo dinámico en sección bajo carril.....	72
4.3.5 Ensayo de fatiga en sección bajo carril .....	74
5. RESULTADOS.....	77
5.1 ENSAYOS DEL HORMIGÓN ENDURECIDO.....	77
5.1.1 Resistencia a compresión .....	77
5.1.2 Resistencia a tracción indirecta.....	79
5.1.3 Resistencia de adherencia (pull-out).....	80
5.1.4 Retracción por secado .....	84
5.2 ENSAYOS DE LA TRAVIESA .....	87
5.4.1 Ensayo flexión positiva en sección central.....	87
5.4.2 Ensayo flexión negativa en sección central.....	88
5.4.3 Ensayo flexión positiva en sección bajo carril .....	90
5.4.4 Ensayo dinámico en sección bajo carril.....	91
5.4.5 Ensayo de fatiga en sección bajo carril .....	92
6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	94
6.1 CONCLUSIONES .....	94
6.1.1 Hormigón endurecido .....	94
6.1.2 Traviesas .....	96

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA FABRICADO CON ÁRIDOS RECICLADOS

6.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN..... 97

7. REFERENCIAS..... 98

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Parámetros de diseño establecidos por la Especificación AAC .....	42
Tabla 2. Parámetros de diseño establecidos por la Especificación India .....	42
Tabla 3. Parámetros de diseño establecidos por la Especificación Australiana .....	43
Tabla 4. Parámetros de diseño establecidos por la Especificación Española.....	44
Tabla 5. Composición química del cemento CEM I 52,5R.....	46
Tabla 6. Valores resistentes y tiempo de endurecimiento del cemento CEM I 52,5R .....	46
Tabla 7. Propiedades físicas y mecánicas de los áridos gruesos naturales y reciclados.....	48
Tabla 8. Propiedades físicas y mecánicas de los áridos finos naturales .....	50
Tabla 9. Nomenclatura de los hormigones .....	53
Tabla 10. Dosificaciones realizadas en la fase experimental para 1m <sup>3</sup> .....	53
Tabla 11. Resistencia a compresión a los 28 días .....	77
Tabla 12. Resistencia a tracción a los 28 días .....	79
Tabla 13. Detalles del ensayo de Pull-out .....	81
Tabla 14. Resultados ensayo flexión positiva en sección central.....	87
Tabla 15. Resultados ensayo flexión negativa en sección central.....	89
Tabla 16. Resultados ensayo flexión positiva en sección bajo carril .....	90
Tabla 17. Resultados ensayo dinámico en sección bajo carril .....	91
Tabla 18. Resultados ensayo de fatiga en sección bajo carril .....	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sección de rotura por tracción en el hormigón reciclado.....	25
Figura 2. Módulo de elasticidad de los distintos componentes del hormigón.....	26
Figura 3. Distribución del tamaño de los poros; a) Distribución del tamaño de los poros a los 28 días, b) Distribución del tamaño de los poros a los 5 años .....	30
Figura 4. Permeabilidad al paso del oxígeno; a) Resultado expresado en función del % de árido reciclado utilizado, b) Resultado expresado en función del tiempo de curado .....	31
Figura 5. Carbonatación del hormigón según la relación a/c .....	34
Figura 6. Carbonatación del hormigón según el porcentaje de árido reciclado utilizado.....	34
Figura 7. Deformación por retracción en función de la edad del hormigón.....	37
Figura 8. Deformación total debida a la fluencia .....	37
Figura 9. Retracción por secado del hormigón en las Series I y II a los 112 días .....	38
Figura 10. Fluencia del hormigón del hormigón en las Series I y II a los 112 días .....	39
Figura 11. Traviesa monobloque.....	41
Figura 12. Traviesa bibloque.....	41
Figura 13. Temperatura en función del contenido de trióxido de azufre del cemento .....	45
Figura 14. Granulometría de los áridos gruesos.....	47
Figura 15. Mojado de los áridos reciclados.....	49
Figura 16. Granulometría de los áridos finos .....	49
Figura 17. Mezcladora de eje vertical .....	52
Figura 18. Probetas compactadas y enrasadas.....	55
Figura 19. Imagen de la cámara húmeda.....	56
Figura 20. Máquina de ensayo .....	57
Figura 21. Configuración de la carga (a) y rotura de la probeta (b).....	58
Figura 22. Ilustración del principio del ensayo de arrancamiento.....	59
Figura 23. Montaje del molde para el ensayo de arrancamiento (pull-out).....	60
Figura 24. Fotografía tomada durante el ensayo de arrancamiento.....	60
Figura 25. Dispositivo comparador para la variación de longitud; a) barra de control (izquierda), b) lectura de una probeta (derecha) .....	61
Figura 26. Puente de Wheastone .....	62
Figura 27. Moldes y colocación de las galgas para el ensayo de retracción por secado. ....	63
Figura 28. Esquema de montaje para ensayo a flexión positiva en sección central .....	65
Figura 29. Método de ensayo para flexión positiva en sección central.....	65
Figura 30. Colocación de galga extensiométrica para ensayo a flexión positiva en sección central.....	66
Figura 31. Fotografías del ensayo a flexión positiva en sección central; a) Traviesa ensayada, b) Aparición de la primera fisura, c) Desprendimiento del hormigón, d) Detalle de la galga extensiométrica embebida .....	66
Figura 32. Esquema de montaje para ensayo a flexión negativa en sección central .....	67
Figura 33. Método de ensayo para flexión negativa en sección central .....	68
Figura 34. Colocación de galga extensiométrica para ensayo a flexión positiva en sección central.....	69
Figura 35. Fotografías del ensayo a flexión negativa en sección central; a) Traviesa ensayada, b) Aparición de la primera fisura, c) Aparición de fisuras por esfuerzo cortante.....	69
Figura 36. Esquema de montaje sección bajo carril positivo .....	70
Figura 37. Método de ensayo para flexión positiva en sección bajo carril.....	71

Figura 38. Colocación galga extensiométrica para ensayo a flexión positiva en sección bajo carril ....	72
Figura 39. Fotografías del ensayo a flexión positiva en sección bajo carril; a) Traviesa ensayada, b) Detalle de la colocación de la galga en la superficie del hormigón .....	72
Figura 40. Método de ensayo para dinámico en sección bajo carril.....	73
Figura 41. Curva típica ensayo dinámico en sección bajo carril.....	73
Figura 42. Fotografías del ensayo dinámico en sección bajo carril; a) Colocación de la galga en la superficie del hormigón, b) Aparición de fisura.....	74
Figura 43. Método de ensayo para fatiga en sección bajo carril .....	75
Figura 44. Fotografías del ensayo de fatiga en sección bajo carril; a) Vista general del ensayo, b) Colocación de la galga en la superficie del hormigón.....	76
Figura 45. Resistencia a compresión de los diferentes hormigones reciclados, a los 28 días, expresada como porcentaje de la resistencia a compresión del hormigón convencional.....	78
Figura 46. Resistencia a tracción de los diferentes hormigones reciclados, a los 28 días, expresada como porcentaje de la resistencia a tracción del hormigón convencional.....	80
Figura 47. Resistencia de adherencia en función del desplazamiento de la barra para los hormigones de la serie HR-100.....	81
Figura 48. Resistencia de adherencia en función del desplazamiento de la barra para los hormigones de la serie HR-60.....	82
Figura 49. Resistencia de adherencia en función del desplazamiento de la barra para los hormigones de la serie HR-40.....	82
Figura 50. Relación entre la resistencia de adherencia y la resistencia a compresión.....	83
Figura 51. Variación de longitud en función del tiempo para los hormigones de la serie HR-100.....	84
Figura 52. Variación de longitud en función del tiempo para los hormigones de la serie HR-60.....	85
Figura 53. Variación de longitud en función del tiempo para los hormigones de la serie HR-40.....	85
Figura 54. Retracción por secado en función del tiempo; a) HR-100 (superior-izquierdo); b) HR-60 (superior-derechos), c) HR-40 (inferior-izquierdo).....	86
Figura 55. Gráfico fuerza-deformación medido por galgas extensiométricas en las barras de acero para el ensayo estático de flexión positiva en sección central.....	88
Figura 56. Gráfico fuerza-deformación medido por galgas extensiométricas en las barras de acero para el ensayo estático de flexión negativa en sección central.....	89
Figura 57. Gráficos fuerza-deformación medidos por galgas extensiométricas en las barras de acero para el ensayo estático flexión positiva en sección bajo carril; a) HC (superior-izquierdo); b) HR-100-50 (superior-derecho), c) HR-100-100 (inferior-izquierdo).....	91
Figura 58. Gráfico de máximas y mínimas deformaciones en función del número de ciclos registrados por galgas extensiométricas en las barras de acero para el ensayo de fatiga en sección bajo carril positivo.....	93

## RESUMEN

**TÍTULO:** Análisis del comportamiento estructural del hormigón de alta resistencia fabricado con árido reciclado

**AUTOR:** Miquel Ramon Pérez Garcia

**TUTORA:** Miren Etxeberría Larrañaga

El objetivo principal de esta tesina es profundizar en el análisis del comportamiento estructural del hormigón de alta resistencia fabricado con árido reciclado, mediante el estudio de las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón reciclado. Otro propósito que persigue esta tesina, de igual manera que la mayoría de investigaciones que se están desarrollando actualmente, es colaborar con el desarrollo sostenible, intentando fomentar el uso de los áridos reciclados, siempre y cuando los resultados derivados de su utilización sean satisfactorios, y reducir así el malbaratamiento de los recursos naturales.

En la fase experimental, se fabricaron cuatro tipos de hormigones: un hormigón convencional, para el cual se reprodujo la dosificación utilizada en un hormigón procedente de una planta de prefabricación de hormigón para la utilización en traviesas, y tres hormigones reciclados. Para evaluar la influencia de los áridos reciclados en las propiedades del hormigón en función de su calidad, se utilizaron tres tipos de árido grueso obtenidos a partir de residuos de hormigón de diferentes resistencias características (40MPa, 60MPa, 100MPa). Los porcentajes de sustitución de árido natural por árido reciclado utilizados fueron del 20, 50 y 100%, para cada dosificación

Se ensayaron las probetas para determinar sus propiedades mecánicas y de durabilidad y comprobar si cumplían los valores límites establecidos en las especificaciones técnicas de ADIF. Los ensayos que se realizaron fueron: resistencia a compresión, resistencia a tracción, resistencia de adherencia y retracción por secado. Los resultados obtenidos concluyeron que todos los hormigones fabricados estaban dentro de los parámetros exigidos por la normativa. De todos modos, se deberían tomar las siguientes recomendaciones para la fabricación de hormigón estructural: En la serie HR-100 ( $f'_c=100\text{MPa}$ ) puede utilizarse un porcentaje de sustitución hasta del 100%, en la serie de HR-60 ( $f'_c=60\text{MPa}$ ) se recomienda utilizar un porcentaje de sustitución hasta el 50%, y en la serie HR-40 ( $f'_c=40\text{MPa}$ ) sólo se recomienda utilizar un porcentaje de sustitución del 20%.

Por último, se analizaron los resultados de las traviesas, estáticos y dinámicos, para determinar si el hormigón verificaba los parámetros establecidas en las especificaciones técnicas de ADIF. En general, se obtuvieron unos resultados muy satisfactorios, los cuales determinaron que los hormigones reciclados utilizados en la fabricación de las traviesas cumplían los requisitos prescritos. Sin embargo, para el ensayo a flexión negativa en sección central, los resultados logrados no fueron los esperados. De todos modos, las causas se atribuyeron a criterios técnicos de diseño, ya que los resultados que presentaron los hormigones reciclados fueron muy similares a los del hormigón convencional. Por consiguiente, se concluyó que los áridos reciclados no propiciaron ningún efecto negativo en la traviesa.



**ABSTRACT**

**TITLE:** Analysis of the structural behavior of high strength concrete made with recycled aggregate

**AUTHOR:** Miquel Ramon Pérez Garcia

**TUTOR:** Miren Etxeberria Larrañaga

The main purpose of this work is to analyse the mechanical and durability properties of concrete produced with recycled aggregates in order to know if it can be used for structural applications. Another aim may be, in line with other studies, to contribute to sustainable development, trying to promote the use of recycled aggregates, when possible, and thus reducing the disproportionate use of natural resources

Four different types of concrete were produced: conventional concrete, which was made from a mixture of a concrete manufactured on a precast concrete plant, and three recycled concrete aggregates, which were designed to achieve a compressive strength of 40, 60 and 100MPa. In mixtures, the natural aggregate was replaced in volume by recycled aggregate on a percentage of 20, 50 and 100%, in order to check how much the concrete is affected when this ratio increases.

Specimens were tested to study their mechanical and durability properties and also in order to see if they achieve the minimum parameters that they must achieve according the technical specifications of ADIF. The tests performed were: compressive strength, tensile strength, bond strength and drying shrinkage. The results concluded that all concretes met the parameters required parameters.

In conclusion, sleepers were tested too. Static and dynamic test were used, and it was seen that all recycled aggregates mixtures achieved the prescribed requirements in ADIF's technical specifications. However, it was observed that the results of the negative bending tests in the middle section were not as good as expected, since the first crack appears when initial strength was applied. Anyway, these results were attributed to a defect on technical design criteria, as the results provided by the recycled concrete aggregates were very similar to that provided by the conventional concrete.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 ASPECTOS GENERALES**

El estudio del comportamiento de los hormigones fabricados con áridos reciclados se ha ido incrementando progresivamente en los últimos años. Los motivos que han impulsado su utilización responden a criterios ambientales y de sostenibilidad, ya que el uso de áridos reciclados en la fabricación de nuevo hormigón contribuye a reducir la cantidad de recursos naturales utilizados, los costes de transporte y la necesidad de disponer de plantas de tratamiento de restos y escombros.

Hasta la fecha, la mayoría de investigaciones se han centrado en estudiar la influencia que provoca el uso de áridos reciclados en las propiedades del hormigón de baja y media resistencia. Por el contrario, su utilización en la fabricación del hormigón estructural apenas se ha promovido debido a los aspectos inherentes negativos que se asocian a los áridos reciclados, por lo que sólo se han empleado en la fabricación de hormigón de alta resistencia ocasionalmente.

Sin embargo, debido a la creciente utilización del hormigón estructural en todo el mundo, ha surgido la necesidad de investigar la influencia que ejercen los áridos reciclados en las propiedades mecánicas, físicas y químicas del hormigón estructural, presentándose como una alternativa para avanzar hacia un desarrollo sostenible. Por este motivo, gran parte de los estudios que se están desarrollando actualmente están focalizados al estudio del uso de áridos reciclados en la fabricación del hormigón de alta resistencia, presentando las ventajas y los inconvenientes que comporta su utilización.

Algunas investigaciones indican que los hormigones fabricados con áridos de alta calidad presentan unas propiedades mecánicas similares a las de los hormigones convencionales de alta resistencia. Sin embargo, no se ha profundizado en el estudio de las propiedades diferidas como la adherencia del hormigón con las armaduras, comportamientos que se pretenden analizar en el desarrollo de esta tesina.

### **1.2 OBJETIVOS**

El objetivo principal de este proyecto es estudiar el comportamiento estructural del hormigón de alta resistencia fabricado con áridos reciclados aplicado a la fabricación de traviesas. Para ello, se fabricarán cuatro tipos de hormigón: un hormigón convencional (se reproducirá la dosificación utilizada en la fabricación de traviesas de hormigón convencional) y tres hormigones reciclados, fabricados con áridos gruesos procedentes de residuos de hormigón de resistencia característica de 40,

60 y 100MPa. Los porcentajes de sustitución de árido natural por árido reciclado utilizados fueron el 20, 50 y 100%, para cada calidad de árido reciclado.

Los parámetros básicos que se pretenden analizar son los correspondientes a los requisitos exigidos por la normativa para la homologación de traviesas de ADIF, aunque también se estudiarán las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón fabricado, mediante la realización de diferentes ensayos.

Por consiguiente, en la presente tesina se pretenden alcanzar los siguientes objetivos específicos,

- Validar la calidad del árido reciclado para poder utilizarlos en la fabricación del hormigón
- Determinar el procedimiento más adecuado para la fabricación de hormigones de alta resistencia
- Cuantificar el porcentaje máximo de sustitución de árido natural por árido reciclado para que el hormigón resultante cumpla las especificaciones que impone ADIF para su utilización en traviesas.
- Analizar los resultados para verificar que el hormigón reciclado presenta unas propiedades mecánicas y de durabilidad adecuadas, comparándolas con las del hormigón convencional.

### **1.3 ESTRUCTURA DE LA TESINA**

La tesina se compone de cinco capítulos, que permiten seguir el proceso de análisis realizado durante el trabajo investigador y exponer unas conclusiones.

En primer lugar, se expone el estado de arte, donde se definen las principales propiedades del árido reciclado y su influencia en la fabricación del hormigón. Se realiza una búsqueda de las principales publicaciones en las que se estudia el comportamiento del hormigón reciclado de baja, media y alta resistencia, comparándose sus propiedades con las del hormigón convencional. Se recopilan también diferentes normativas sobre el uso de hormigón para traviesas, destacando los requisitos exigidos por la normativa española de ADIF.

En el siguiente capítulo se caracterizan los materiales utilizados en la fabricación del hormigón, definiendo sus principales propiedades

## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA FABRICADO CON ÁRIDOS RECICLADOS

Seguidamente, se detallan la metodología y ensayos del hormigón. Se explica el proceso de fabricación realizado y las dosificaciones utilizadas. Por otro lado, se define los ensayos realizados en las probetas de hormigón endurecido y los ensayos efectuados en las traviesas, estos últimos según las especificaciones de ADIF.

En el siguiente capítulo se presentan los resultados de los ensayos definidos en el capítulo anterior. Se analizan y discuten los resultados obtenidos para el hormigón reciclado y las traviesas, por separado.

Finalmente, se exponen las conclusiones extraídas de la discusión de los resultados y se proponen algunas líneas de investigación para la continuidad del estudio.

## **2. ESTADO DEL ARTE**

### **2.1 DEFINICIÓN DE ÁRIDO RECICLADO**

Se entiende como árido reciclado el árido resultante del procesamiento de materiales inorgánicos utilizados previamente en la construcción [1]. Consecuentemente, la materia prima para su obtención son los materiales pétreos generados como residuo durante los procesos de construcción y demolición.

### **2.2 PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS APLICADOS A LA FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN**

#### **2.2.1 Granulometría**

La distribución granulométrica es un factor relevante porque tiene una incidencia directa en las propiedades del hormigón, afectando en mayor o menor medida a la trabajabilidad, la porosidad, la resistencia, el grado de compactación y la durabilidad [2]. Una distribución continua (el árido está uniformemente graduado para todos los tamaños) proporciona un grado de compactación y una resistencia mecánica más elevados [3].

El módulo granulométrico del árido depende principalmente del tipo de trituración realizado durante el procesamiento y de la calidad del hormigón original. En general, el árido reciclado procedente de hormigones de mayor resistencia presenta módulos granulométricos ligeramente superiores a los procedentes de hormigones menos resistentes, para el mismo sistema de trituración [3]. La relación de árido grueso que suele obtenerse después del procesamiento oscila entre el 70 y 90% del árido total producido, presentando, en la mayoría de casos, una curva granulométrica adecuada.

En la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) [4] se especifican las distribuciones granulométricas óptimas para gravas, arenas y finos que pueden utilizarse para la fabricación de hormigón, debiéndose cumplir en todos los casos una relación  $D/d$  superior a 1,4. Esta norma pretende conseguir una clasificación uniforme de todos los tamaños, lo que comporta obtener una mayor compactación y, por consiguiente, una mayor resistencia y durabilidad del hormigón. Esto implica que la curva de distribución granulométrica sea continua y no uniforme, garantizando así unas propiedades óptimas tanto en el hormigón fresco como en el hormigón endurecido.

### **2.2.1.1 Contenido de finos <0,063mm**

Los finos se generan debido a la aparición de pequeñas partículas que se desprenden durante la manipulación de los áridos reciclados. Algunos ensayos españoles [5] concluyen que la aparición de finos sobre áridos gruesos ya clasificados en el laboratorio puede oscilar entre un 0,27 y un 1,14%. Este porcentaje no resulta muy desfavorable porque en la mayoría de casos los valores se sitúan por debajo del límite establecido por la EHE, que es del 1,5% respecto al volumen del árido reciclado.

La presencia de partículas finas en la superficie del árido reciclado puede originar problemas de adherencia entre el árido y la pasta de cemento. Además, genera un aumento de la cantidad de agua de amasado necesaria [6].

### **2.2.1.2 Contenido de arenas (<0,4mm)**

Una vez se ha separado la fracción gruesa, el árido reciclado sigue conteniendo pequeñas cantidades de arena (partículas menores de 4mm) debido a la disgregación que sufre al ser manipulado. Los valores más frecuentes oscilan entre el 0,5 y 0,2% [7].

La EHE admite, para el árido reciclado, hasta un 10% de desclasificados inferiores, entre los cuales se podrían contabilizar también las partículas de arena generadas por la manipulación del árido reciclado. La relación de desclasificados admisible en el árido reciclado ha de ser inferior debido al efecto perjudicial que provoca en las propiedades del hormigón.

### **2.2.1.3 Mortero adherido**

Todos los áridos reciclados contienen un porcentaje de mortero adherido a las caras del árido natural [8]. La presencia de pasta de cemento que queda adherida al árido del hormigón original es uno de los aspectos que más diferencias provoca entre las propiedades del árido natural y las propiedades de los áridos reciclados. Algunos estudios han demostrado que la presencia de mortero adherido afecta a la calidad del hormigón [9].

Los principales factores que determinan la cantidad de pasta de cemento adherida en los áridos reciclados (con la misma máquina y potencia) son: *la relación agua/cemento*, -la cantidad de mortero adherido aumenta con la disminución del tamaño del árido-, *la resistencia del cemento original*, -la cantidad de mortero adherido en el hormigón original es proporcional a la resistencia del hormigón

original-, y *el tamaño del árido* [8]. El proceso de trituración influye en la cantidad de mortero adherido y en la calidad de los áridos reciclados.

Cabe destacar que a mayor proporción de mortero adherido, menor durabilidad obtendrá el hormigón.

### **2.2.2 Coeficiente de forma e índice de lajas**

La presencia de mortero adherido a la superficie de los áridos del hormigón original provoca que la textura de los áridos reciclados sea más rugosa y porosa que la de los áridos naturales. El coeficiente de forma del árido reciclado es similar al que puede presentar el árido natural, situándose en un rango de valores entre 0,17-0,35 [10,11]. En la EHE se especifica que el coeficiente de forma del árido grueso no debe ser inferior a 0,20.

Sin embargo, en los estudios que utilizaron el índice de lajas como método para determinar la forma del árido grueso, se observaron diferencias entre el árido natural y el árido reciclado. Se concluyó que el índice de lajas era menor en los áridos reciclados [10]. Este resultado puede explicarse porque el mortero adherido a las caras planas de los áridos naturales tiende a aumentar el grosor de las partículas con forma de losa y a redondearlas, lo que provoca una disminución en el porcentaje de lajas.

El proceso de trituración escogido determinará, en gran parte, la forma de las partículas de árido grueso.

### **2.2.3 Densidad y Absorción**

En general, la densidad del árido reciclado es inferior a la del árido natural debido a la pasta de cemento que queda adherida a los granos y al contenido de impurezas de menor densidad, como ladrillo o asfalto. El rango de valores de la densidad suele situarse entre 2100-2400kg/m<sup>3</sup>, mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2300-2500kg/m<sup>3</sup> [12]. En todos los casos la densidad del árido puede considerarse normal (no ligera) por situarse en un rango de valores superior a 2000kg/m<sup>3</sup>, que es el límite que se establece en la norma UNE 146.120:97.

Por lo que respecta a la absorción de los áridos reciclados, esta resulta ser una de las propiedades físicas que presenta unos resultados más dispares en comparación a los del árido natural. Esta circunstancia se debe a la alta absorción del mortero adherido a las caras planas del árido natural. Los valores habituales de absorción se sitúan entre 4-10%, incumpléndose en la mayoría de casos el límite del 7% establecido en la EHE.

Los principales factores que determinan la densidad y la capacidad de absorción del árido reciclado son aspectos,

- *El tamaño del árido:* La densidad del árido reciclado es ligeramente superior en las fracciones más gruesas que en las más finas. Esto se debe a que el factor más determinante en la densidad del árido reciclado es la densidad del árido con el que fue fabricado el hormigón, que puede ser muy diferente para hormigones de distintas procedencias. Con respecto a la capacidad de absorción, las partículas más finas presentan mayor absorción (para un mismo hormigón de origen) que las fracciones gruesas, como consecuencia que en las primeras se concentra un mayor porcentaje de mortero adherido al árido reciclado.
- *Calidad del hormigón original:* los áridos reciclados procedentes de hormigones con una baja relación a/c (y por consiguiente de elevada resistencia), suelen ser de más calidad, lo que se traduce en un aumento de la densidad y una disminución de la capacidad de absorción.
- *Técnicas de procesamiento:* cuando se realizan sucesivos procesos de trituración en el procesamiento de un árido, se elimina un mayor contenido de mortero por lo que la calidad del árido mejora sustancialmente, observándose un descenso de la capacidad de absorción y un incremento de la densidad. Los valores adquiridos pueden ser similares a los del árido natural

### 2.2.5 Coeficiente de Los Angeles

El coeficiente de Los Angeles evalúa la resistencia a fragmentación que experimentan los áridos por impacto y abrasión. Los áridos reciclados presentan un elevado coeficiente de Los Angeles porque durante el ensayo se elimina todo el mortero adherido a la superficie del árido, eliminándose también parte del peso propio del árido natural [13].

El valor esperado para el árido reciclado es superior al del árido natural, pudiéndose situar en un amplio rango de valores, comprendidos entre el 25 y el 45% [10,11], dependiendo, entre otros factores, del tamaño de la partícula y de la calidad del hormigón original, así como del propio coeficiente de Los Angeles del árido natural que contenga.

La EHE especifica un coeficiente de Los Angeles máximo de 40%, por lo que en la mayoría de casos el árido grueso reciclado cumplirá con el valor establecido. En cualquier caso, se deben realizar controles para detectar las partidas de árido que incumplen la norma. En este sentido, la limitación del 7% en el valor de absorción excluirá aquellas partidas que contengan un coeficiente de Los Angeles superior al 40% [12].



En general, el coeficiente de Los Angeles aumenta en las fracciones de árido de menor tamaño [11], ya que son las que presentan un mayor porcentaje de mortero adherido al árido natural. Cuando se disminuye la relación de  $a/c$  del hormigón original, el coeficiente también disminuye, pudiéndose hallar diferencias entre el valor del coeficiente de hasta un 10% en los resultados correspondientes a un amplio rango de relaciones  $a/c$ .

### **2.2.5 Contaminantes e impurezas**

La presencia de impurezas y contaminantes en los áridos reciclados es uno de los principales inconvenientes que plantea su utilización, puesto que estos materiales afectan negativamente a las propiedades del hormigón.

Las impurezas, que pueden ser de origen diverso (plástico, madera, yeso, ladrillos, vidrio, materia orgánica, aluminio, asfalto, etc.) producen, en todos los casos, un descenso de la resistencia del hormigón. También pueden originarse otros problemas en función del tipo de contaminante, como reacciones álcali-árido (vidrio), ataque por sulfatos (yeso), desprendimientos superficiales (madera o papel), elevada retracción (arenas arcillosas) o mal comportamiento ante el ciclo hielo-deshielo (ladrillos).

Según la procedencia del árido, éste presentará un mayor o menor porcentaje de impurezas. En este sentido, los áridos procedentes de residuos de hormigón presentan un contenido reducido de impurezas, mientras que los áridos obtenidos a partir de residuos de escombros cerámicos suelen contener diferentes materiales como madera, yeso o vidrio, entre otros.

## **2.3 DISEÑO DE MEZCLA DE UN HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO**

La mezcla del hormigón es un proceso fundamental en la obtención de una pasta adecuada, del cual depende en gran medida la calidad del hormigón fabricado. El proceso de mezclado se considera eficiente cuando la mezcla obtenida es homogénea y muestra las características de trabajabilidad requeridas. Para ello, se debe asegurar una distribución uniforme de las partículas y una hidratación óptima de la pasta de cemento.

Los principales factores que pueden afectar a la calidad de la mezcla son la presencia de mortero adherido a las caras del árido natural y bajas relaciones  $a/c$ . Por consiguiente, estos factores deben ser controlados para evitar aglomeraciones de las partículas finas de cemento, lo que comportaría una

hidratación no uniforme de la pasta y afectaría a la trabajabilidad del hormigón. Un recubrimiento adecuado y una dispersión correcta de las partículas de árido también son aspectos determinantes en la operación de mezclado.

Por otro lado, y con el objetivo de fortalecer la zona de transición interfacial (ITZ) entre el árido reciclado y la nueva pasta de cemento, que suele ser la región del hormigón más débil debido a la alta capacidad de absorción y la alta porosidad de los áridos reciclados, W.Y. Tam et al [15] recomiendan ejecutar el proceso de mezclado en dos etapas. Este método permite que la pasta de cemento se consolide con los áridos reciclados, proporcionando una ITZ más fuerte como consecuencia del llenado de las fisuras y poros dentro de los áridos reciclados. Los autores del estudio observaron resistencias a compresión más elevadas utilizando este método de mezclado.

Para obtener una mezcla adecuada, también se recomienda que el árido reciclado esté humedecido, alrededor del 80% respecto de su capacidad de absorción total [2]. Humedeciendo el árido se pretende reducir su elevada capacidad de absorción para que no influya en la trabajabilidad del hormigón fresco y pueda controlarse la relación a/c efectiva.

Los siguientes aspectos deben ser considerados para obtener una buena dosificación del hormigón [2,15],

- Determinar la densidad del árido reciclado y el árido natural para definir el mismo volumen de árido reciclado en sustitución del árido natural
- Calcular la capacidad de absorción de agua de los áridos reciclados durante la fabricación y añadir la cantidad de agua que absorberán en 30 minutos para asegurar una buena trabajabilidad en el hormigón fresco y una relación a/c efectiva constante.
- Posiblemente se precise ajustar la relación a/c para que el hormigón fabricado con áridos reciclados alcance una resistencia similar a la del hormigón convencional.
- Valorar la cantidad de agua que se precisa para obtener la relación a/c requerida.
- Para obtener una buena adherencia entre el árido reciclado y la nueva pasta de cemento se recomienda realizar el proceso de mezclado en dos etapas.
- En las dosificaciones realizadas con el método *Equivalent Mortar Volumen* (EVM) [16], los hormigones reciclados obtienen propiedades similares a las del hormigón convencional. En este método, los áridos reciclados son tratados como un material constituido por dos

elementos, el mortero y el árido reciclado, de modo que cuando se determina la mezcla se considera que el árido reciclado no sólo sustituye al árido natural sino que también reemplaza al mortero.

Respecto de los puntos anteriormente descritos, se puede definir que la relación de a/c se debe modificar en los hormigones fabricados con áridos reciclados para obtener una resistencia, consistencia y trabajabilidad parecidas a la de los hormigones fabricados con áridos naturales.

Para una misma consistencia, el porcentaje de demanda de agua del hormigón fabricado con áridos reciclados con respecto al hormigón convencional es entre un 5-10% más elevado.

Para que el hormigón reciclado alcance una resistencia similar a la del hormigón convencional, se necesitará una mayor cantidad de cemento, al precisarse una mayor cantidad de agua.

## **2.4 PROPIEDADES FÍSICAS DEL HORMIGÓN RECICLADO**

### **2.4.1 Densidad**

La densidad de un hormigón reciclado es inferior a la de un hormigón convencional debido a la reducida densidad que presenta el árido reciclado como consecuencia del mortero que permanece adherido a las caras planas del árido natural.

Q. Liu et al. [17] informaron que, para una resistencia similar, el hormigón reciclado presentaba disminuciones en el valor de la densidad con respecto al hormigón convencional. Determinaron que la presencia del mortero original en el hormigón reciclado era el causante de esta circunstancia. Los resultados revelaron que la reducción se situaba alrededor del 2,85%.

K. Rahal [18] obtuvieron resultados similares. Los hormigones reciclados presentaron una disminución de la densidad del 3,6% en comparación con el valor alcanzado por el hormigón convencional.

## **2.5 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN RECICLADO**

Se analizarán las siguientes propiedades mecánicas del hormigón reciclado: Resistencia a compresión, resistencia a tracción, módulo elástico y resistencia de adherencia.

En general, la incorporación de árido reciclado en el hormigón influye de forma negativa en todas sus propiedades, aunque en algunos casos, los efectos que produce son más importantes que en otros. Uno de los principales aspectos que se debe considerar es el porcentaje de árido reciclado utilizado para la fabricación del hormigón, ya que de él dependerán en gran medida las propiedades del hormigón fabricado.

### **2.5.1 Resistencia a compresión**

En general, la utilización de árido reciclado para la fabricación del hormigón implica una disminución de la resistencia a compresión en el hormigón reciclado (manteniendo la misma relación agua/cemento), independientemente de cual sea el porcentaje de árido reciclado utilizado.

La disminución de resistencia suele asociarse a una menor resistencia mecánica del árido reciclado, a una mayor absorción y a la adherencia entre el árido y la nueva pasta de cemento en la zona de transición interfacial (ITZ).

L. Butler et al. [19] compararon entre sí los resultados obtenidos para dos hormigones convencionales de resistencia característica 30 y 50MPa, dos hormigón reciclados con un porcentaje de sustitución del 100% y con un ratio a/c constante, y dos hormigones reciclados con un porcentaje de sustitución del 100% diseñados para alcanzar las mismas resistencias a compresión que los hormigones convencionales. Los resultados manifestaron (asumiendo que la capacidad resistente de la fase de mortero era constante) que el factor limitante de la resistencia era la zona de interfase árido-mortero, o la zona de transición interfacial (ITZ), cuando la fisura se producía alrededor del árido, o bien era la propia resistencia del árido si la fisura se originaba a través del él. Se observó que la resistencia árido-mortero entre el nuevo mortero y el hormigón fabricado con áridos reciclados (nueva ITZ) era más elevada que la resistencia árido-mortero entre el nuevo mortero y los áridos naturales. Este incremento de la resistencia en la ITZ probablemente se debía a la mayor rugosidad superficial de los áridos reciclados en comparación con la textura superficial más suave de los áridos naturales.

S.C. Kou et al. [20] ensayaron doce probetas de hormigón (cuatro tipos de hormigón por cada una de las tres dosificaciones realizadas) fabricado con un porcentaje de árido reciclado del 0, 25, 50 y 100%. Se mantuvo constante la relación a/c y la cantidad de cemento para todas las dosificaciones. La resistencia a compresión se ensayó a las edades de 1, 4, 7, 28 y 90 días, y en todos los casos, para cualquier edad, la resistencia disminuyó a medida que el porcentaje de reemplazo de árido natural por árido natural se incrementaba. Los resultados obtenidos se podrían atribuir a la menor resistencia mecánica y a la elevada capacidad de los áridos reciclados en relación con los áridos naturales.

Liu et al. [17] analizaron la capacidad resistente de un hormigón reciclado con una resistencia a compresión superior a la del hormigón original, y determinaron que el mecanismo de rotura por compresión se produjo por la acción combinada de la superficie rugosa y la forma irregular de los áridos reciclados, aspectos que originaron la concentración de tensiones que provocaron la fisuración a lo largo de la superficie de los áridos naturales. Las investigaciones también reportaron que en comparación con la zona de transición interfacial que envolvía a los áridos finos, la ITZ alrededor de los áridos gruesos tendía a comprender más discontinuidades y de mayor tamaño, las cuales reducían la resistencia del hormigón. Sin embargo, estas discontinuidades absorbían energía durante el proceso de ruptura, de modo que propiciaban una mejora en la ductilidad del material.

Otros estudios confirman [2] que la adquisición de la resistencia a compresión del hormigón reciclado viene dada por la rugosidad y la capacidad de absorción del mortero adherido a las caras planas del árido natural, proporcionando una mejor adherencia entre la pasta de cemento y los áridos reciclados en la zona de transición interfacial (ITZ) en comparación con la de un hormigón convencional. Los resultados se obtuvieron tras ensayar cuatro tipos distintos de hormigón fabricados con un porcentaje de árido reciclado del 0, 25, 50 y 100%, la dosificación de los cuales se ajustó para obtener las mismas resistencias características que el hormigón convencional.

Tabsh y Abdelfatah [21] evaluaron la resistencia a compresión de una mezcla de hormigón fabricada con áridos reciclados de alta calidad (procedentes de residuos de hormigón de elevada resistencia característica). El hormigón producido presentó prácticamente la misma resistencia a compresión que el hormigón de control, excepto en aquellos casos donde la resistencia del hormigón de origen era menor o desconocida, obteniéndose por tanto hormigones reciclados de resistencias más bajas. La resistencia del hormigón depende tanto del árido grueso como de la pasta de cemento, por lo que un incremento en la cantidad de cemento va en detrimento de la colaboración de la fracción de árido gruesa. Para cuantificar este fenómeno, los autores destacan que para un hormigón fabricado con áridos reciclados procedentes de un hormigón con una resistencia característica de 30MPa se experimentan pérdidas del 30% de la resistencia a compresión, y de hasta un 40% si la procedencia de los áridos es desconocida. La utilización de áridos reciclados procedentes de hormigones de resistencia característica de 50MPa resultó en valores comparables entre el hormigón reciclado resultante y el hormigón de control, afirmación extensible al uso de hormigones originales más resistentes. Otra de las conclusiones que se presentan en este estudio es que el incremento del contenido de agua en un 10% en la fabricación del hormigón reciclado para mantener la consistencia del hormigón fresco repercute en la resistencia a compresión adquirida. En este sentido, el uso de aditivos mejora la trabajabilidad del hormigón aun manteniendo las cantidades de agua en las dos mezclas, razón por la

que los autores plantean la hipótesis que de haber seguido este procedimiento la resistencia del hormigón reciclado habría superado a la del hormigón de control.

A. Domingo et al. [22] observaron que el hormigón reciclado alcanzó a los 7 días el 80% de la capacidad resistente a compresión respecto de la resistencia característica del hormigón de control a los 28 días. A medida que se incrementaron los porcentajes de sustitución de árido natural por árido reciclado, se produjeron aumentos en la capacidad resistente del hormigón, contrariamente a lo observado en otros estudios. Los autores comentan que el fenómeno podría deberse a la reducción de la relación a/c efectiva debido a la alta capacidad de absorción de los áridos reciclados y por efecto del aditivo superplastificante utilizado. También se observó que en caso de mantener el ratio a/c efectivo, el asentamiento del hormigón fresco y la resistencia a compresión se mantenían constantes. Por este motivo se dedujo que el efecto de la sustitución no resultó significativo, concluyendo que la calidad de los áridos reciclados utilizados era muy buena.

Los resultados de la investigación desarrollada por Gomes y Brito [23] manifestaron que la resistencia a compresión no se veía alterada con el porcentaje de sustitución de árido natural por árido reciclado cuando el mortero adherido a los áridos reciclados tenía una gran resistencia mecánica y se presentaba en cantidades elevadas. Añaden que este fenómeno se vio favorecido por el proceso de mezcla realizado, el cual consistió en verter el agua en dos fases desfasadas en el tiempo de modo que la pasta de cemento pudiese envolver correctamente los áridos reciclados, ocupando sus fisuras y poros. Esto se tradujo en la obtención de una ITZ más resistente.

Algunas investigaciones [19] revelaron que el hormigón reciclado seguía adquiriendo gran parte de sus propiedades resistentes una vez superados los 28 días de edad, mientras que el hormigón de control alcanzó la mayor parte de la resistencia que tenía a los 28 días durante los primeros 7 días. Transcurridos 56 días desde la fabricación de ambos hormigones, el aumento de las resistencias en el hormigón reciclado y en el hormigón de control fueron, respectivamente, del 7 y del 4% respecto de la resistencia característica a los 28 días. Según el autor, la relevancia de las diferencias en las reducciones de la capacidad resistente muestra el efecto de factores diversos tales como el origen de los áridos reciclados y resalta la necesidad de particularizar la caracterización de los materiales utilizados para poder describir su comportamiento de manera adecuada.

Tsung-Yueh Tu et al. [24] centraron su investigación en el análisis de las propiedades de un hormigón de alta resistencia fabricado con áridos reciclados. Por lo que se refiere al estudio de la resistencia a compresión, observaron una disminución entre el 20 y 30% en el hormigón reciclado en comparación con el hormigón convencional. Sin embargo, se satisficieron algunas propiedades físicas

(significativos resultaron ser los valores obtenidos para la durabilidad, los cuales cumplían los requerimientos exigidos para un hormigón de alta resistencia), por lo que los autores recomiendan incrementar la resistencia a compresión de diseño cuando se quieran utilizar áridos reciclados en la fabricación de hormigón.

Siguiendo esta tendencia, Nyok Yong Ho [25] analizaron la utilización de áridos reciclados en hormigón estructural. Para el transcurso de la investigación, hormigones fabricados con unos porcentajes de sustitución de árido natural del 0, 20, 40, 60, 80 y 100% fueron examinados con diferentes ratios  $a/c$ . Se observó que a los 3 y 7 días de edad, el hormigón reciclado presentaba resistencias a compresión más elevadas que el hormigón convencional, para cualquier porcentaje de sustitución utilizado e independientemente de la relación  $a/c$  aplicada. Este fenómeno puede atribuirse al hecho que el contenido de agua libre que se precisa para la hidratación del cemento fue parcialmente absorbido por los áridos reciclados debido a su alta capacidad de absorción. Por consiguiente, se produjo una reducción en la relación  $a/c$ , efecto que se intensificó a medida que el porcentaje de áridos reciclados se incrementaba.

Se determinó, pues, que con la reducción del ratio  $a/c$ , la resistencia del mortero de los áridos reciclados era superior a la de los hormigones de control. Dado que el mortero todavía sigue participando en el proceso de hidratación del cemento a edades tempranas, la resistencia del mortero es menor que la resistencia de adherencia entre los áridos reciclados y la pasta de cemento en la zona de transición interfacial (ITZ), por lo que la resistencia del mortero es el factor relevante en la determinación de la resistencia a los primeros días de edad. Sin embargo, a los 28 días desde la fabricación la tendencia se invirtió, y para un ratio  $a/c$  inferior a 0,45 se observó una disminución de resistencia a compresión en los hormigones fabricados con un porcentaje de reemplazo del 40%. Sin embargo, la incorporación de áridos reciclados en el hormigón tuvo un efecto insignificante en la determinación de la resistencia a compresión para aquellos hormigones con ratios  $a/c$  superiores a 0,45.

Estos fenómenos pueden atribuirse a dos factores: el ratio  $a/c$  efectivo y la ITZ. De manera análoga, se produjo una disminución en el ratio  $a/c$  efectivo del hormigón fabricado con áridos reciclados como consecuencia de su alta capacidad de absorción. En general, a mayor porcentaje de sustitución, menor ratio  $a/c$  efectivo. Sin embargo, el hormigón de control sólo tiene una ITZ, mientras que el hormigón reciclado tiene dos ITZs; la interfase entre el árido natural y el mortero adherido (ITZ original) y la interfase entre el mortero adherido y el mortero nuevo (nueva ITZ). Las conclusiones extraídas fueron que el mortero adherido puede desarrollar un papel determinante en la definición de la resistencia a compresión del hormigón reciclado.

### 2.5.2 Resistencia a tracción

La resistencia a tracción es una de las propiedades del hormigón que experimenta menores variaciones con respecto al hormigón de control, aunque no se ha encontrado una tendencia clara de su comportamiento.

La mayoría de investigaciones realizadas en este ámbito coinciden en destacar que el factor más determinante en la resistencia a tracción del hormigón es la adherencia entre la pasta de cemento y el árido utilizado, tal y como se observa en la bibliografía consultada.

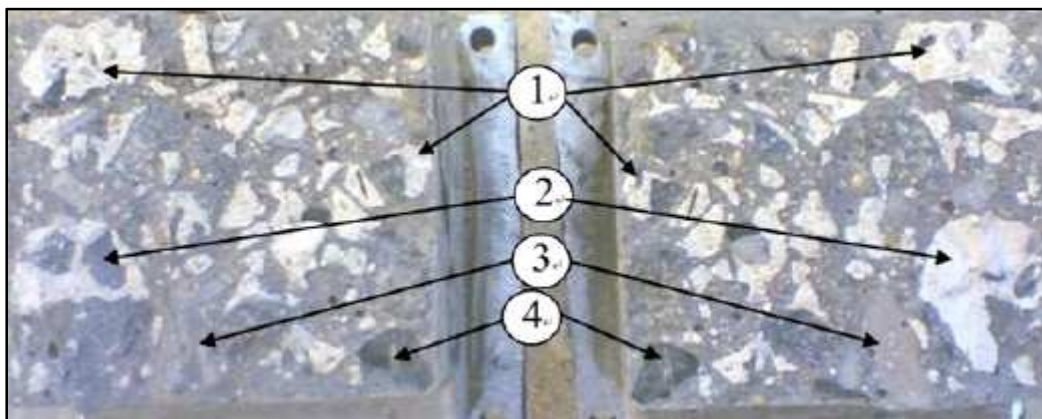
Los resultados obtenidos por L. Butler et al. [19] coincidieron con esa tendencia. Determinaron que para hormigones de resistencia media (30MPa) el factor que determina la resistencia a tracción es la adherencia entre el árido y la pasta de cemento. Sin embargo, para hormigones más resistentes (50MPa), observaron que el factor más relevante en la determinación de la resistencia a tracción es el coeficiente de friabilidad de los áridos (ACV). Se demostró que a mayores coeficientes de friabilidad de los áridos, las resistencias que se alcanzaban eran menores. Concluyeron que los hormigones más resistentes (50MPa) eran más susceptibles de verse alterados por la resistencia mecánica del árido o por el coeficiente de friabilidad del árido. Todos los hormigones reciclados fueron fabricados con un porcentaje de reemplazo de áridos natural del 100%.

S.C. Kou et al. [20] también obtuvieron resultados concluyentes en este aspecto. Observaron que los hormigones reciclados alcanzaron mayores resistencias que el hormigón de control, para los casos donde el porcentaje de sustitución de árido natural fue del 25 y 50%. Los autores apuntan que esta circunstancia podría deberse al hecho que los áridos reciclados mejoraron la microestructura de la zona de transición interfacial (ITZ) y aumentaron la fuerza de adherencia entre los áridos y la pasta de cemento. Debido a la porosidad de la superficie de los áridos reciclados, la pasta de cemento propició los siguientes efectos cuando entró en contacto con el árido: (i) una cierta cantidad de cemento penetró en los áridos, provocando un aumento en la hidratación interna de la pasta de cemento, (ii) las fisuras disminuyeron en la zona interfacial, (iii) se produjo una reorientación de los cristales  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Por tanto, la investigación concluyó que la calidad de la ITZ en los hormigones reciclados es mejor que la de la pasta original con los áridos naturales.

Liu et al. [17] centraron sus investigaciones en evaluar cómo afectaba la rotura por tracción en la ITZ. Los resultados manifestaron que los hormigones fabricados con un porcentaje de árido reciclado del 20 y del 30%, y diseñados para obtener la misma resistencia que el hormigón de control (20 y 30MPa), lograron una resistencia a tracción superior a la del hormigón de control. La causa que propició esta



mejora de resistencia en el hormigón reciclado fue la buena adherencia entre el mortero nuevo y el mortero original, que se concluyó a partir de la observación de las fisuras producidas en las probetas como consecuencia de la rotura por tracción (Figura 1). Se observó que la mayor parte de las fisuras se originaban en el mortero nuevo y en el mortero original (punto 1, Figura 1), aunque también se detectaron fisuras que atravesaban la ITZ formada por los áridos naturales y el mortero original (punto 2, Figura 1) y fisuras que atravesaban la ITZ formada por los áridos naturales y el mortero nuevo (punto 3, Figura 1). También se encontraron fisuras que atravesaban los áridos naturales (punto 4, Figura 1). Sin embargo, apenas se observaron fisuras que atravesaran la ITZ formada por el mortero nuevo y el mortero original.



*Figura 1. Sección de rotura por tracción en el hormigón reciclado*

M. Etxeberria et al [2] examinaron la rotura a tracción en probetas de hormigón con un porcentaje de sustitución de árido natural del 0, 25, 50 y 100% (las dosificaciones fueron ajustadas para que los hormigones obtuviesen las mismas resistencias a compresión). Los resultados corroboraron que la resistencia a tracción de los hormigones reciclados fue superior a la del hormigón convencional, excepto en la dosificación con un porcentaje de sustitución del 100%. Se observó una disminución en la resistencia a tracción a medida que el porcentaje de reemplazo de árido natural se incrementaba. Los autores atribuyeron esta mejora en la resistencia (excluyendo el hormigón reciclado con un porcentaje de reemplazo del 100%) a la capacidad de absorción del mortero adherido a los áridos naturales y a la efectividad de la nueva zona de transición interfacial del árido reciclado.

Por último, Tabsh y Abdelfatah [21] analizaron la resistencia a tracción del hormigón reciclado en base a dos variables: El origen de los áridos y la definición de la resistencia a compresión de diseño. Las conclusiones del estudio revelaron que los hormigones fabricados con áridos reciclados procedentes de un hormigón con una resistencia característica de 50MPa alcanzaron la misma resistencia característica que el hormigón de control. Sin embargo, cuando los áridos provenían de un hormigón con una resistencia característica de 30MPa o su origen era desconocido, se producía una

reducción de la resistencia a tracción entre el 25-30% (para una  $f'_c = 30\text{MPa}$ ) y el 10-15% (para una  $f'_c = 50\text{MPa}$ ).

### 2.5.3 Módulo elástico del hormigón reciclado

El módulo de elasticidad es una de las propiedades del hormigón que experimenta una mayor disminución cuando se utiliza árido reciclado. Esta disminución puede deberse, principalmente, a los siguientes factores,

- Menor módulo de elasticidad del árido reciclado, ya que una parte de él lo forma la pasta, y como se observa en la Figura 2, su módulo de elasticidad es inferior tanto al del árido natural como al del hormigón.
- La textura superficial rugosa del árido reciclado y las pequeñas fisuras que puede presentar el mortero adherido, disminuyen también el módulo de elasticidad del hormigón.

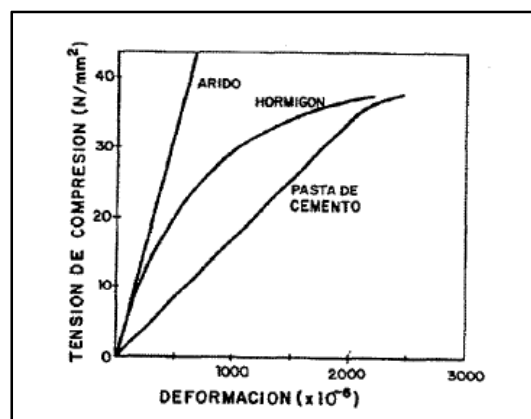


Figura 2. Módulo de elasticidad de los distintos componentes del hormigón

La investigación desarrollada por M. Etxebarria et al [2] reveló que el módulo de elasticidad del hormigón reciclado disminuía a medida que el porcentaje de utilización de árido reciclado aumentaba. Los autores destacan que este resultado era el esperado porque los áridos reciclados son más proclives a deformarse que los áridos naturales, y de igual manera añaden que es bien conocido que el módulo de elasticidad del hormigón depende en gran medida del módulo de elasticidad de los áridos.

S.C. Kou et al. [20] evaluaron el módulo de elasticidad a los 28 y 90 días. En todos los casos, el valor del módulo de los hormigones reciclados fue menor que el del hormigón de control, y en la misma línea que la investigación anterior, a medida que el porcentaje de sustitución se incrementaba, el módulo de elasticidad se veía reducido.

La investigación de Liu et al. [17] se centró en el análisis de la influencia del mortero sobre el módulo elástico. Para ello, se compararon los módulos de Young de dos hormigones reciclados con un porcentaje de reemplazo de árido natural distinto (del 20 y del 30%, respectivamente). Los resultados concluyeron que la diferencia de valor entre ambos era insignificante. El motivo se debe a que el mortero nuevo tiene una influencia considerable en el módulo del hormigón reciclado, mientras que el mortero original ejerce una influencia muy escasa sobre él, como consecuencia de la cantidad en la que se presenta y su distribución. Esta conclusión se extrajo a partir del análisis de las secciones transversales del hormigón fabricado con áridos reciclados, donde se observó que el mortero nuevo ocupaba alrededor de un 52% del volumen total, mientras que el mortero original sólo ocupaba alrededor de un 23%. Por consiguiente, el mayor porcentaje de mortero nuevo resulta ser un factor determinante en el módulo de elasticidad del hormigón reciclado.

K. Rahal [18] observó un aumento significativo del módulo de elasticidad con un incremento de la resistencia a compresión en hormigones convencionales. Esta observación resultó ser menos evidente en los hormigones reciclados porque las dosificaciones utilizadas fueron diseñadas para obtener valores de resistencia característica entre 25 y 30MPa. En cualquier caso, pudo hacerse una comparación entre el módulo elástico y la resistencia, a partir de la cual se observó que el módulo de los hormigones reciclados sólo era un 3% menor que el de los hormigones convencionales.

R.K. Dhir et al. [26] suscriben que, en general, el módulo elástico se considera proporcional a la resistencia a compresión, aun refiriéndose a casos en los que se ha observado que el módulo no era proporcional a la capacidad resistente de hormigón o en los que se han detectado variaciones de hasta  $15\text{kN/mm}^2$ .

#### **2.5.4 Adherencia**

La resistencia de adherencia viene determinada por una serie de factores que responden a criterios de adhesión química, fricción y enclavamiento mecánico entre el acero y el hormigón que lo rodea.

Por lo que respecta al estudio de la adherencia entre el acero y el hormigón, L. Butler et al. [19]. observaron una fuerte relación entre el coeficiente de friabilidad de los áridos (ACV) y la tensión de adherencia para hormigones reciclados con una resistencia característica de 30 y 50MPa, respectivamente. Tanto en las dosificaciones de resistencia 30MPa como en las de resistencia 50MPa, la tensión de adherencia se correlacionó correctamente con el ACV. Esta tendencia sugiere que para varios valores de longitud de sujeción y resistencia a compresión del hormigón puede existir una relación entre la tensión de adherencia y el coeficiente de friabilidad del árido grueso (ACV), que

podría deberse a la influencia del árido grueso en la energía de fractura del hormigón que se ha relacionado con la resistencia de adherencia entre el hormigón y el refuerzo de acero. Se ha demostrado que la calidad de los áridos reciclados, en lo que se refiere a su resistencia, influye en la energía de fractura del hormigón y la resistencia de adherencia entre el hormigón y el refuerzo de acero. En este sentido, a mayor resistencia mecánica del árido reciclado, mayor energía de fractura y resistencia de adherencia. Con respecto al hormigón convencional, los hormigones reciclados presentaron una disminución en la resistencia de adherencia, entre el 10,4-19% y el 9,4-21,3%, para una resistencia característica de 30 y 50MPa, respectivamente. Este comportamiento podría explicarse porque los áridos reciclados tienen un ACV superior al de los áridos naturales, lo que indica una menor resistencia mecánica del árido grueso.

En la investigación realizado por S. Seara-Paz et al [27], dos tipos de hormigón, con distinto ratio a/c utilizado, y cuatros series de hormigón por tipo, con unos porcentajes de sustitución del 0, 20, 50 y 100%, fueron fabricados y ensayados para determinar la resistencia de adherencia entre el acero y el hormigón reciclado. Los resultados revelaron que se producía una disminución en la resistencia a medida que aumentaba el porcentaje de sustitución de árido natural por árido reciclado. Los autores también reportaron que cuando se utilizó el ratio a/c mayor en la dosificación del hormigón, la diferencia de resistencia entre el hormigón reciclado y el hormigón convencional disminuyó.

J. Xiao et al [28] compararon la resistencia de adherencia del hormigón reciclado con barras de acero lisas y la resistencia del hormigón reciclado con barras de acero deformadas. Se fabricaron tres series de hormigón con un porcentaje de reemplazo del 0, 50 y 100%. En todas las dosificaciones se mantuvieron constantes la cantidad de cemento utilizada y el ratio a/c. Los resultados manifestaron un descenso de la resistencia de adherencia entre el hormigón reciclado y las barras de acero lisas del 12 y 6% con respecto al hormigón convencional para un porcentaje de sustitución del 50 y 100%, respectivamente. Sin embargo, apenas se observaron diferencias en la resistencia de adherencia entre el hormigón reciclado y las barras de acero deformadas. Esto se debe a que la resistencia de adherencia entre el hormigón reciclado y las barras de acero deformadas depende mucho más del anclaje mecánico y de la resistencia por fricción, mientras que la resistencia de adherencia entre el hormigón reciclado y las barras de acero lisas depende principalmente de la adhesión entre el acero y el hormigón, el cual está fuertemente influenciado por el porcentaje de sustitución utilizado. Los resultados también revelaron que se obtuvieron unos valores de resistencia más elevados cuando el porcentaje de reemplazo fue del 100%, tanto para las barras de acero lisas como las barras de acero deformadas. Esto podría deberse a que el módulo de elasticidad del árido reciclado es similar al de la pasta de cemento del hormigón reciclado.

## **2.6 DURABILIDAD DEL HORMIGÓN**

### **2.6.1 Características físicas**

#### **2.6.1.1 Porosidad**

La porosidad se define como la relación entre el volumen de poros de un material y su volumen aparente. En fenómenos ligados a la durabilidad del hormigón, habitualmente se entiende por porosidad del hormigón la relación entre el volumen de poros accesibles al agua y el volumen aparente de la muestra de hormigón, expresada en tanto por ciento. Se trata, pues, de la porosidad accesible al agua, no la porosidad total, ya que es la que se repercute en el ingreso de sustancias agresivas desde el exterior.

Su medición en el laboratorio puede obtener mediante técnicas de permeabilidad bajo presión, saturando la muestra y examinando las diferencias de pesos. También se puede determinar a partir de la aplicación de técnicas porosimétricas por intrusión de mercurio.

Los hormigones reciclados presentan una porosidad más elevada que la de los hormigones convencionales debido a la mayor porosidad de los áridos reciclados provocada por la presencia de la pasta de cemento. La porosidad de los hormigones reciclados con porcentajes inferiores al 30% de árido grueso reciclado apenas sufre aumentos. Sin embargo, a partir de este porcentaje la porosidad se incrementa, hasta alcanzar para una sustitución total, incrementos entre el 10 y el 70% con respecto al hormigón convencional.

S.C. Kou et al. [19] midieron la porosidad de un hormigón reciclado con un porcentaje de sustitución de árido natural del 100% a los 28 días y a los 5 años. Los resultados reflejaron que a los 28 días el hormigón reciclado presentaba unos resultados muy similares a los del hormigón convencional. Sin embargo, transcurridos 5 años de curado en agua se produjeron diferencias significativas. El hormigón reciclado experimentó una pérdida de porosidad del 44,9% respecto del valor obtenidos a los 28 días, mientras que las pérdidas que se ocasionaron en el hormigón convencional fueron del 28,9% en comparación con los resultados adquiridos a los 28 días (Figura 3).

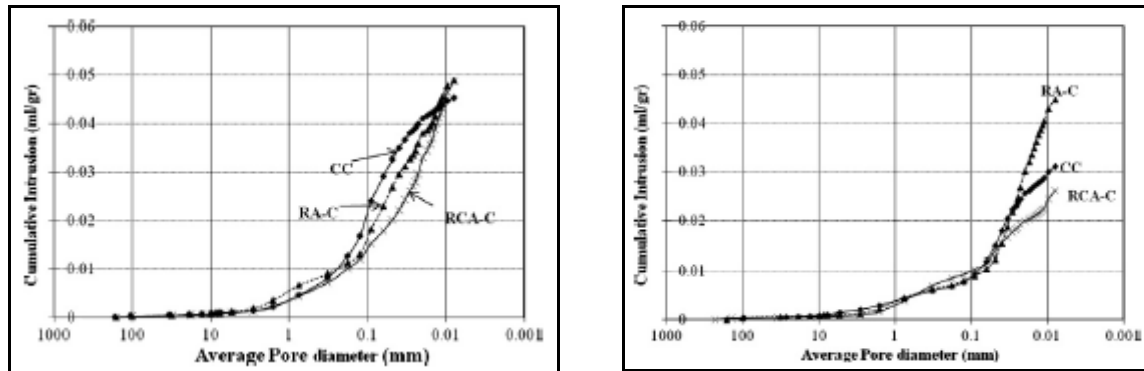


Figura 3. Distribución del tamaño de los poros; a) Distribución del tamaño de los poros a los 28 días, b) Distribución del tamaño de los poros a los 5 años

Otras investigaciones [30] apuntan que el factor determinante en la porosidad de los hormigones reciclados es la pasta de cemento. Los autores del estudio observaron que los hormigones con un porcentaje de árido reciclado utilizado entre el 50 y el 100% presentaban una alta capacidad de absorción de agua y unas densidades menores respecto de las del hormigón convencional. Atribuyeron esta circunstancia la mayor porosidad del mortero adherido [30].

### 2.6.1.2 Permeabilidad

La mayoría de los procesos de degradación del hormigón dependen de su permeabilidad. El coeficiente de permeabilidad es una característica del material que describe el flujo de los gases o los líquidos a través de un material poroso, debido a la aplicación de un gradiente de presiones.

En este tipo de ensayos se mide el volumen de líquido que ha sido absorbido por una determinada probeta de hormigón, en un tiempo dado y en una condiciones experimentales prefijadas.

Los resultados de la investigación de Wai Hoe Kwan [31] manifestaron que la permeabilidad aumentaba a medida que el porcentaje de áridos reciclados utilizados se incrementaba. También se observó que la permeabilidad se reducía con la edad del hormigón como consecuencia del proceso continuo de curado interno que experimenta el hormigón. Esto se traduce en el hecho de que las reacciones de hidratación de la pasta de cemento provocan la auto-deseccación del cemento y por consiguiente los espacios capilares se ven reducidos. Para la realización del ensayo, las probetas se colocaron verticalmente en un cilindro anular de acero inoxidable que se tapó cuidadosamente para evitar cualquier fuga. Seguidamente, se aplicó un caudal de gas nitrógeno, el cual fue avanzando a través de la probeta. Antes de registrar las lecturas, se dejó reposar el sistema un mínimo de 15 minutos para lograr un estado estacionario del flujo.

Otros estudios [32] determinaron la permeabilidad del hormigón mediante la aplicación de la Técnica de Permeabilidad del Oxígeno (OPI), que describe el proceso de movimientos de fluidos a través de la estructura de poros bajo una presión aplicada externamente, a medida que los poros se van saturando con un fluido específico. Por consiguiente, la permeabilidad se corresponde con una medida de la capacidad del hormigón para el transporte de fluidos por penetración, que depende de la microestructura del hormigón, de la condición de humedad del material y de las características del fluido utilizado.

En definitiva, la técnica del OPI mide la caída de presión que experimenta el gas oxígeno cuando penetra a través de la muestra de hormigón. Por tanto, se deduce que cuanto mayor es el valor del OPI, menos gas oxígeno penetra en la muestra.

Los resultados de la investigación [32] revelaron que, para una edad de curado determinada, el valor del OPI se reducía a medida que la proporción de árido reciclado utilizada en la mezcla de hormigón aumentaba, tal y como se observa en la Figura 4 (a).

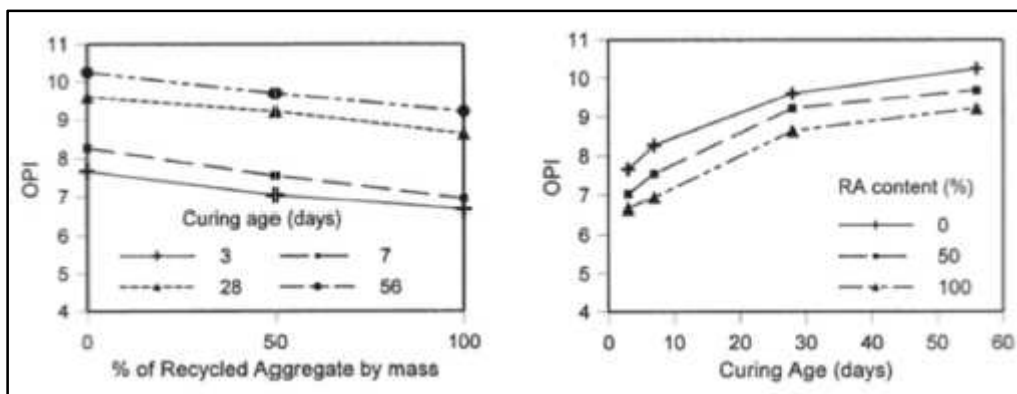


Figura 4. Permeabilidad al paso del oxígeno; a) Resultado expresado en función del % de árido reciclado utilizado, b) Resultado expresado en función del tiempo de curado

Analizando los resultados en función del tiempo de curado (Figura 4, b), se observa que a los 3 días los hormigones fabricados con un porcentaje de árido reciclado del 100% experimentaron una reducción del valor del OPI alrededor del 15% con respecto al hormigón convencional. Esta tendencia se mantiene a lo largo de todo el proceso de curado, donde se dieron reducciones del 16, 10 y 10% a los 7, 28 y 56 días, respectivamente.

Los autores concluyeron que la reducción del valor del OPI en los hormigones reciclados con mayor porcentaje de sustitución de árido natural era consecuencia de las fisuras y grietas del árido reciclado, originadas durante el proceso de trituración. Por consiguiente, la presencia de fisuras y grietas en los áridos reciclados facilita el paso de los fluidos a través de la mezcla de hormigón.

## **2.6.2 Durabilidad. Procesos físicos**

### **2.6.2.1 Resistencia frente a las altas temperaturas**

Las altas temperaturas pueden afectar negativamente la estructura del hormigón reciclado. El umbral de temperaturas a partir del cual se produce una pérdida importante en las propiedades físicas y resistentes del hormigón es 300-400°C [33], ya que hasta alcanzarse esos valores las propiedades se mantienen prácticamente inalteradas. Las principales pérdidas de resistencia (más de un 50%) se producen antes de alcanzar los 800°C. El hormigón también experimenta una reducción en la masa, provocada porque los poros de mayor tamaño se engrandecen, generando un aumento muy notable en la permeabilidad [33,34].

Las consecuencias derivadas de exponer el hormigón a altas temperaturas son más considerables en los hormigones reciclados, para una misma relación a/c respecto del hormigón de control [31,32]. Los autores relacionan este efecto con la porosidad y el tamaño de los poros, concluyendo que a mayor porosidad, mayor efecto producen las altas temperaturas.

Sin embargo, en los hormigones reciclados con áridos reciclados con una menor relación a/c, se han observado mejoras en el comportamiento frente a las altas temperaturas, incluso en sustituciones del 100% de árido natura por árido reciclado [21].

En consonancia con estos resultados, la investigación realizada por S.C. Kou et al. [35] reveló que un hormigón reciclado con un porcentaje de sustitución del 100% expuesto a altas temperaturas experimentaba menos daños en sus propiedades, tanto mecánicas como de durabilidad, en comparación con el hormigón convencional.

### **2.6.2.2 Resistencia frente a los ciclos hielo-deshielo**

La degradación del hormigón debida a la helada se produce principalmente en la pasta de cemento como consecuencia de varios fenómeno, como el aumento del volumen debido a la formación de hielo, la variación del punto de congelación del agua en función del diámetro de los poros y la existencia de difusión de las moléculas de agua hacia los cristales ya formados.

La resistencia del hormigón a la helada suele evaluarse a través del efecto que produce en distintos parámetros del hormigón, como la pérdida de peso, cuando se somete a sucesivos ciclos de hielo-deshielo, sumergidos en agua o en una solución de cloruro sódico.



En general, los hormigones reciclados suelen presentar una menor resistencia a la helada debido a que suelen ser más permeables y a que los áridos reciclados suelen ser más susceptibles a los ciclos hielo-deshielo debido a su elevada capacidad de absorción. Así lo constatan algunos estudios [36,37].

Sin embargo, algunos estudios [38,39] obtuvieron resistencia a la helada ligeramente superiores en el hormigón reciclados con respecto al hormigón convencional. Esta mejora en el comportamiento podría atribuirse a que la mayor porosidad del árido reciclado provee al hormigón de una mejor distribución de poros para resistir las presiones provocadas por la formación de hielo.

Algunos estudios concluyeron que añadiendo aireante en la mezcla de hormigón reciclado se mejoraba sustancialmente su comportamiento frente a los ciclos hielo-deshielo. Esto se consigue porque el aireante proporciona cierta flexibilidad al hormigón, actuando como cámara de expansión.

Otros estudios [40,41] revelaron que hormigones fabricados con áridos reciclados que contenían contaminantes derivados de sulfatos, tras ser sometidos a sucesivos ciclos de hielo-deshielo, no presentaban deterioros significativos (inspección visual). Los autores hallaron una correlación entre la pérdida de masa y la absorción de agua que determinó que la pérdida de masa en los áridos reciclados contaminados no era superior al 1% [40]. Kwok Kai Yueno [41] observaron que los hormigones fabricados con áridos reciclados contaminados por derivados de sulfato presentaban un comportamiento adecuado ante las heladas aunque no tuviesen una mayor porosidad.

### **2.6.3 Durabilidad. Procesos químicos**

#### **2.6.3.1. Carbonatación**

La carbonatación es una reacción química donde el hidróxido de calcio presente en el hormigón reacciona con el dióxido de carbono disuelto en el medio acuoso formando carbonato cálcico y agua.

Ha-Won Song [42] determinaron que en hormigones con mayor relación  $a/c$ , y por tanto con mayor porosidad y permeabilidad, el efecto de la carbonatación será mayor (Figura 5).

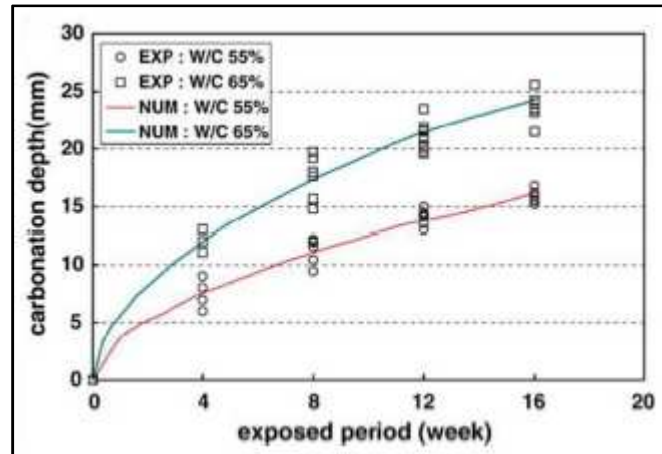


Figura 5. Carbonatación del hormigón según la relación a/c

Consecuentemente, se deduce que para una misma relación a/c efectiva, se obtendrán mayores profundidades de penetración por carbonatación a medida que el porcentaje de sustitución de árido natural por árido reciclado aumenta [43]. Este comportamiento es el que se observa en la Figura 6.

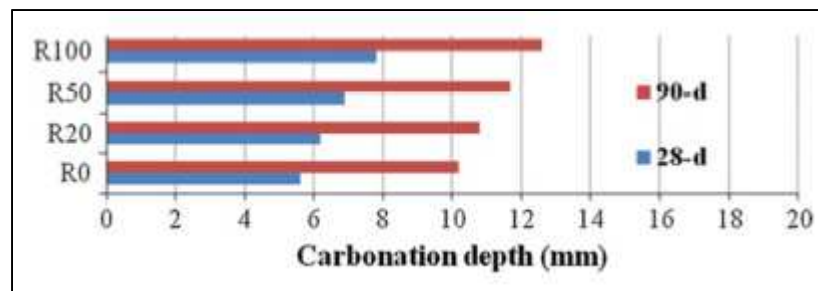


Figura 6. Carbonatación del hormigón según el porcentaje de árido reciclado utilizado

La carbonatación del hormigón comporta el aumento del valor de algunas propiedades, como la densidad, resistencia, módulo elástico y retracción. Por el contrario, produce una reducción en el tamaño de los poros y el pH del hormigón, circunstancias que facilitan la corrosión. Todos los efectos dependen proporcionalmente del contenido de cemento [42].

### 2.6.3.2. Ataque por sulfatos en los hormigones reciclados

El ataque por sulfatos se produce cuando estos entran en contacto con el hormigón, de manera que reaccionan con la portlandita y los aluminatos de cálcico hidratados formando yeso y etringita. Estas reacciones comportan un aumento de volumen (de hasta el 250% en el caso de la etringita) provocando la aparición de fisuras que facilitan todavía más la penetración de sulfatos. Esta circunstancia comporta una pérdida de resistencia y disgregación final del hormigón.

Cabe esperar un comportamiento más desfavorable del hormigón reciclado frente al ataque por sulfatos debido a la mayor permeabilidad que presentan, facilitando así el acceso de los sulfatos.

Se debe considerar además, que los áridos reciclados pueden contener un mayor porcentaje de sulfatos, bien procedentes de la pasta de cemento o por la incorporación de impurezas como el yeso, en cuyo caso pueden ser muy perjudiciales en el hormigón. Por este motivo, incluso en los hormigones con la misma permeabilidad, el hormigón reciclado puede ser más vulnerable frente al ataque por sulfatos. La instrucción EHE especifica unas concentraciones máximas del 0.8% en sulfatos solubles y del 1% en componentes totales de azufre.

De igual manera que ocurre en otras propiedades del hormigón reciclado, su comportamiento frente al ataque por sulfatos es similar que el del hormigón convencional cuando el porcentaje de árido reciclado utilizado es inferior al 30%, aunque para porcentajes mayores se puede obtener incrementos entre 35-70% [44].

La tendencia observada es que a mayores relaciones a/c se produce una mayor penetración de iones sulfatos en el hormigón.

### **2.6.3.3. Ataque por cloruros en los hormigones reciclados**

El hormigón que recubre el acero evita su corrosión debido al pH altamente alcalino del hormigón ( $\approx 12-13$ ). La formación de una fina capa de óxido entre el acero y el hormigón es el factor que evita la oxidación de las armaduras. Este fenómeno se conoce como pasivación.

Sin embargo, cuando el valor del pH se reduce hasta 9 [45] el proceso de oxidación se inicia. El proceso se origina porque los iones cloruros penetran a través del hormigón y entran en contacto con el acero, rompiendo la capa de pasivación y, por consiguiente, oxidando el acero. A lo largo del proceso, el hierro que compone el acero se convierte en óxido de hierro II y III, elementos que se depositan en la superficie de las armaduras aumentando su tamaño. Ese incremento de volumen provoca que se desprendan del acero, originando la aparición de fisuras que aceleran el proceso de corrosión.

Los principales factores que propician la penetración de los iones cloruros son:

- Absorción: Se produce en hormigones expuestos a la humedad y en los que la superficie se seca periódicamente. Cuando la superficie está seca, el agua, la cual puede contener cloruros,

es absorbida por succión capilar. Este mecanismo no permite que los iones alcancen grandes profundidades, pero propicia que los cloruros accedan rápidamente a la estructura del hormigón. [46]

- **Difusión:** Se produce cuando se combinan los siguientes factores, (i) buena interconexión entre los poros, (ii) presencia de agua en los poros, (iii) gradiente de concentraciones en el ion cloruro.

En general, se considera que para concentraciones de cloruros menores al 0,2% respecto del volumen total de cemento no hay peligro de corrosión, mientras que para valores superiores al 1% el riesgo es elevado [47].

En base al mecanismo observado mediante el cual los iones cloruros penetran en el hormigón, se establece que su presencia en el hormigón fabricado con áridos reciclados dependerá de su porosidad. Al igual que sucede en otras propiedades, la mayor permeabilidad del hormigón reciclado comporta una mayor penetración de cloruros.

#### **2.6.4 Retracción y fluencia**

La utilización de árido reciclado produce mayor retracción en el hormigón que el árido natural. Esto se debe, entre otros motivos, al menor módulo de elasticidad que presenta el árido reciclado debido a su contenido de mortero, así como a los mayores contenidos de agua y cemento que se suelen utilizar en el hormigón reciclado. Por otro lado, el valor final dependerá en gran medida del porcentaje de árido reciclado utilizado en la dosificación, observándose en términos generales que la retracción aumentará a medida que el porcentaje de sustitución aumente.

Por lo que se refiere a la fluencia, esta sigue la misma tendencia que la retracción, es decir, su efecto es más notable en el hormigón reciclado que en el hormigón convencional. Esto se debe principalmente al menor módulo de elasticidad del mortero que incorpora el árido reciclado.

A. Domingo-Cabo et al. [48] estudiaron el efecto de la retracción y la fluencia en hormigones fabricados con unos porcentajes de sustitución del 20, 50 y 100%. En las dosificaciones realizadas se mantuvieron constantes el ratio a/c efectivo (0,5) y la cantidad de cemento (380kg). La mezcla del hormigón de control se preparó para que obtuviera una resistencia característica de 40MPa. Sus investigaciones concluyeron que el porcentaje de sustitución influye considerablemente en la retracción (Figura 7). Se observa que a mayor porcentaje de reemplazo, mayor es la deformación experimentada por el hormigón. Los resultados manifestaron que la retracción en el hormigón

## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA FABRICADO CON ÁRIDOS RECICLADOS

fabricado con un porcentaje de sustitución del 50% fue alrededor de un 20% más elevada que en el hormigón convencional, mientras que en el hormigón fabricado con un porcentaje de áridos reciclados del 100% la retracción se incrementó un 70% después de 180 días.

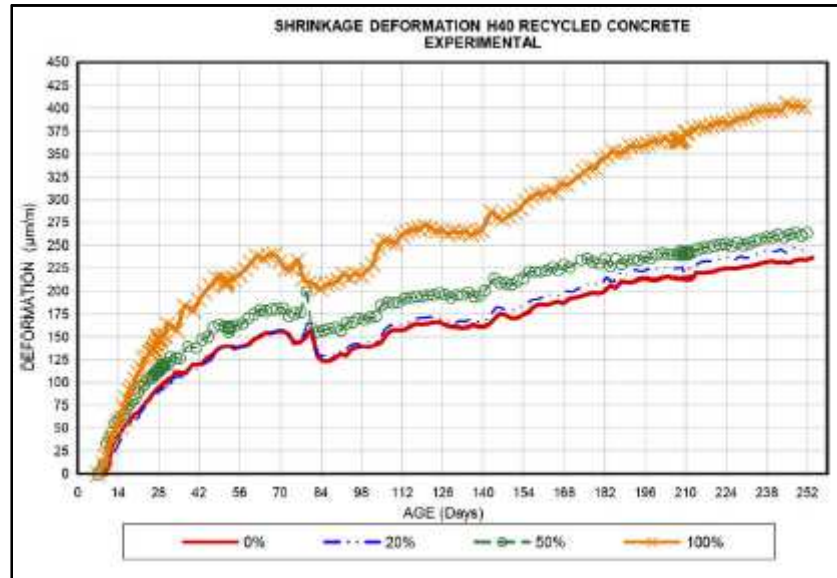


Figura 7. Deformación por retracción en función de la edad del hormigón

La deformación debida a la fluencia siguió la misma tendencia que la deformación por retracción. En la Figura 8 se representan gráficamente los resultados que se obtuvieron. Se puede observar que la deformación que experimentó el hormigón fabricado con un porcentaje de sustitución del 20% fue un 35% más elevada que la del hormigón convencional. Para la sustitución del 50%, el incremento fue del 42%, mientras que para la sustitución del 100% la deformación debida a la fluencia fue un 51% más elevada.

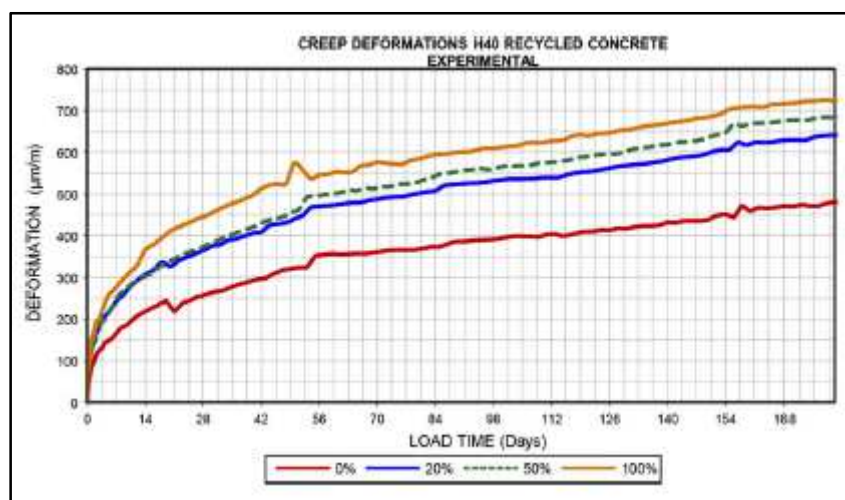


Figura 8. Deformación total debida a la fluencia

La investigación de S.C. Kou y C.S. Poon [43] se centró en analizar cómo influye la incorporación de cenizas volantes en el hormigón reciclado. Los resultados obtenidos (Figura 9) concluyeron que la retracción por secado de los hormigones aumentaba a medida que se incrementaba el porcentaje de sustitución. Los autores determinaron que el mortero que incorporaban los áridos reciclados contribuyó a un incremento en el volumen de la pasta (original + nueva), lo que comportó una mayor retracción en el hormigón resultante. Sin embargo, la incorporación de cenizas volantes propició una reducción en los valores de retracción, que atribuyeron al efecto de dilución de las partículas de cenizas volantes. También observaron que una disminución del ratio agua-aglomerante reducía el efecto de la retracción por secado.

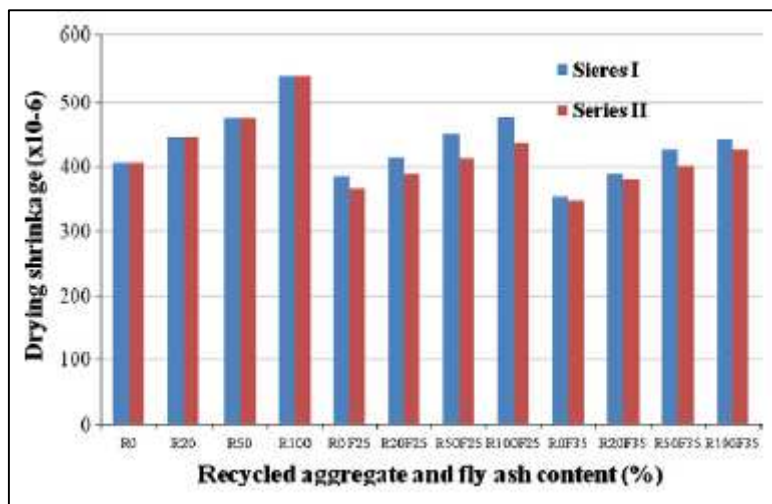


Figura 9. Retracción por secado del hormigón en las Series I y II a los 112 días

Los resultados obtenidos para la deformación debida a la fluencia manifestaron un comportamiento muy similar al observado en la retracción. La deformación aumentó a medida que el porcentaje de sustitución se incrementaba, debido al aumento de volumen del mortero en el hormigón reciclado. La incorporación a la mezcla de cenizas volantes propició una reducción de la deformación tanto en los hormigones reciclados como en los hormigones convencionales. Los autores también informaron que el uso de cenizas volantes propiciaba una reducción en el ratio agua-aglomerante y comportaba un aumento en la resistencia a compresión.

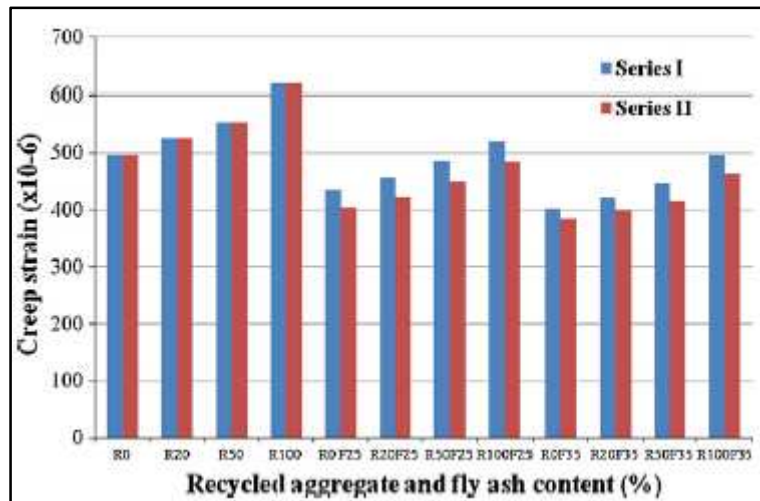


Figura 10. Fluencia del hormigón del hormigón en las Series I y II a los 112 días

M.C. Limbachiya et al [44], determinaron que hasta un porcentaje de sustitución del 30%, el uso de áridos reciclados no provocaba ningún efecto en el hormigón. Los resultados indicaron que tanto la retracción como la fluencia aumentaban a medida que se incrementaba el porcentaje de áridos reciclados utilizado en la dosificación. Los autores reportaron que la pasta de cemento adherida a la superficie de los áridos naturales contribuyó de forma determinante al aumento de la retracción y la fluencia.

S.C. Kou et al [20] determinaron que los hormigones fabricados con una fracción de árido menor experimentaron una retracción más elevada. Se observó que los hormigones fabricados con un porcentaje de sustitución del 50% presentaron unos valores entre el 15 y el 33% más elevados respecto del hormigón convencional, mientras que en el hormigón fabricado con un porcentaje de áridos reciclados del 100% la retracción aumentó entre el 35 y el 45%. Estos resultados están en consonancia con los reportados por A. Domingo-Cabo et al [48].

## 2.7 APLICACIÓN DEL HORMIGÓN RECICLADO: LA TRAVIESA

La traviesa es la estructura encargada de soportar los esfuerzos provenientes del carril y de transmitirlos a la capa inferior. En los orígenes del ferrocarril, las traviesas que se utilizaban eran de madera debido a su facilidad de obtención y abundancia, además de poder sustituirse con facilidad en caso de que alguna quedara inutilizada. Tras la aparición del hormigón pretensado una vez finalizada la Segunda Guerra Mundial, se empezaron a fabricar las traviesas con este material. Este tipo de traviesas presentan una vida útil 3 veces superior a las de madera (estimada en 20 años) y tienen un mejor comportamiento resistente.

Uno de los principales problemas que afectaba a las traviesas de madera es que con el paso del ferrocarril éstas podían romperse con relativa facilidad y por tanto dejaban de fijar correctamente los carriles, mientras que las traviesas de hormigón pre o postesado se mantenían casi inalterables a lo largo de los años. De todas formas, a través de la realización de estudios posteriores se ha demostrado que no todas las maderas son iguales y que existen algunas variedades que presentan calidades superiores a las del hormigón.

Sin embargo, dado que la separación entre dos traviesas consecutivas se sitúa entre los 50 y 70 cm y que las dimensiones son aproximadamente 260x24x14 cm, la cantidad de madera necesaria para construir y mantener las vías es muy elevada, por lo que se necesitaría mucha materia prima y esto supondría un impacto ambiental demasiado elevado.

Hoy en día, la mayor parte de las traviesas de la red ferroviaria española son de hormigón, conservándose las de madera en algunas estaciones y vías secundarias donde siguen resultando útiles gracias a su facilidad para ser maniobradas (80 kg frente a los 180 kg de las traviesas de hormigón bloque o a los 300 kg de las monobloque), a la posibilidad de ser reutilizadas y al buen comportamiento frente a los descarrilamientos.

En la última década han surgido varios países interesados en la posibilidad de fabricar traviesas de plástico reciclado, concretamente de poliestireno y polietileno. Los principales países impulsores de esta tendencia son Inglaterra, Alemania y Estados Unidos. En este último se han instalado ya alrededor de 1,5 millones de traviesas de plástico reciclado (2010).

### **2.7.1 La traviesa de hormigón**

En Europa, donde la mayoría de países utilizan el ancho de vía internacional tanto para los trenes convencionales como para los de alta velocidad, sorprende ver como las semejanzas entre las distintas infraestructuras se limitan al tipo de carril. El resto de elementos que componen la infraestructura son diferentes para cada país, y entre esos elementos se encuentra la traviesa.

Se entiende por traviesa el elemento constructivo necesario en toda línea ferroviaria cuya principal función consiste en sujetar ambos raíles de la vía. Éstas se disponen en posición perpendicular a los raíles y se fijan a ellos mediante juntas de sujeción.

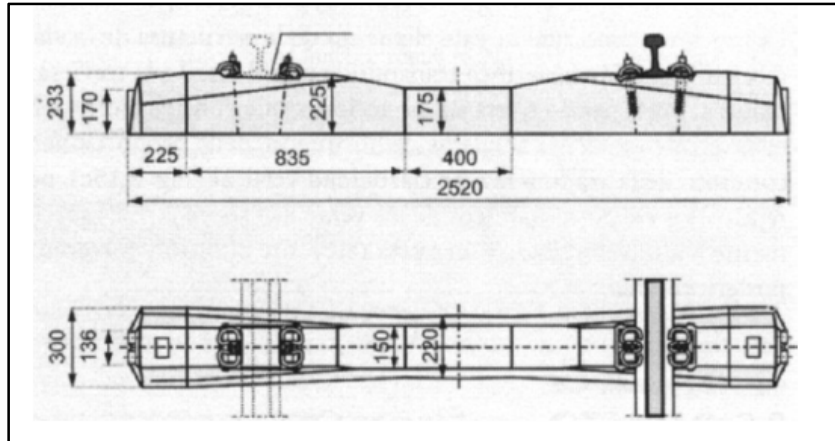
El parámetro principal que define una traviesa es su área de apoyo, ya que esta área determinará la forma en la que se distribuyen las tensiones verticales en el balasto. En función del país y del tipo de



línea ferroviaria se establecen diferentes valores, situándose la mayoría alrededor de  $2400 \text{ cm}^2$  para líneas convencionales y  $3000 \text{ cm}^2$  para líneas de alta velocidad [49].

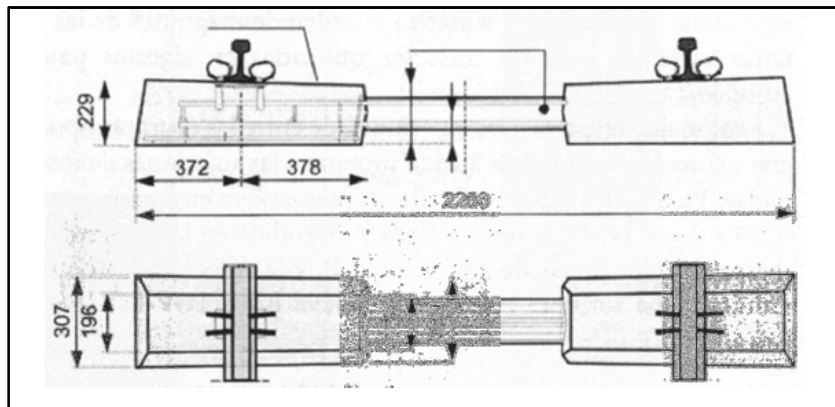
En la actualidad existen dos grandes tipos de traviesa de hormigón,

- La traviesa monobloque, utilizada en países como Reino Unido, Alemania, Italia y España, Figura 11,



*Figura 11. Traviesa monobloque*

- La traviesa bibloque (popularmente conocida como RS en honor a su inventor, Roger Sonneville), utilizada principalmente en Francia, Figura 12,



*Figura 12. Traviesa bibloque*

Las traviesas deben resistir grandes esfuerzos de corta duración y muy repetitivos. Por este motivo es necesario utilizar un hormigón de alta resistencia y una estructura de acero pre o postesada que ayude a prevenir y a reducir los daños causados por la fatiga.

## 2.7.2 Especificaciones técnicas para el hormigón de las traviesas

A lo largo de la vida del ferrocarril, cada país ha ido desarrollando su propio diseño de la infraestructura conjuntamente con los requisitos que han de cumplir los diferentes componentes de ésta. En este apartado se recogen algunas especificaciones.

### 2.7.2.1 Especificación AAC [50]

Los ensayos realizados en las probetas cúbicas deberán satisfacer los requisitos detallados en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de diseño establecidos por la Especificación AAC

Tiempo de ensayo	Resistencias mínimas
24 horas	30 MPa
7 días	45 MPa
28 días	60 MPa

Tras ensayar las probetas en los periodos especificados en la Tabla 1, la resistencia característica de la probeta debe ser igual o superior a 60MPa para la aprobación del diseño de la mezcla, no dándose en ningún caso una resistencia inferior a 51 MPa.

### 2.7.2.2 Especificación India [51]

El tamaño máximo nominal de los áridos utilizados en la fabricación del hormigón será de 20mm, aunque la especificación recoge que se podrán usar áridos de hasta 25mm cuando el espaciamiento entre barras lo permita. Los áridos gruesos y los áridos finos se procesarán por separado. El hormigón deberá cumplir los requisitos expuestos en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de diseño establecidos por la Especificación India

Característica	M55	M60
i) Resistencia mínima a compresión (curado al vapor)	40 MPa	40 MPa
ii) Resistencia mínima a compresión a 15 días (curado por inmersión en agua)	55 MPa	60 MPa
iii) Porcentaje de probetas con una resistencia inferior a la característica	<2,5%	<2,5%
iv) Coeficiente de variación máximo	7%	7%

Donde,

- M55: cantidad de cemento superior a 350 kg/m<sup>3</sup> y menor a 480 kg/m<sup>3</sup>
- M60: cantidad de cemento menor a 500 kg/m<sup>3</sup>

Para la aprobación/revisión del diseño de la mezcla, se fabricarán 80 probetas cúbicas de 15cm de lado, en 10 tongadas de 8 probetas cada una, 4 curadas al vapor y 4 curadas por inmersión en agua. Las 40 probetas curadas al vapor deberán alcanzar las resistencias mínimas mostradas en la tabla anterior (apartado i). El análisis estático de los valores de resistencia a compresión de las 40 probetas curadas por inmersión en agua deberán satisfacer los parámetros de diseño expuestos en la Tabla 2 (apartados ii, iii, iv). Está prohibido el uso de agua marina para el proceso de curado.

### 2.7.2.3 Especificación Australiana [52]

El hormigón se fabricará según lo establecido en la AS 1379 (Tabla 3) Los áridos utilizados en la fabricación del hormigón deberán satisfacer los parámetros prescritos en la AS 2758. Si los áridos ensayados resultan ser potencialmente reactivos, se adoptarán estrategias para minimizar el riesgo de daño debido a la reacción entre el árido y el álcali.

Tabla 3. Parámetros de diseño establecidos por la Especificación Australiana

Característica	Valor
i) Resistencia característica a compresión	>50MPa
ii) Resistencia mínima a compresión	30MPa
iii) Densidad del hormigón saturado con superficie seca	1800/2600 Kg/m <sup>3</sup>
iv) Contenido de cloruros	s/ AS 3600

### 2.7.3.4 Especificaciones técnicas para el hormigón de las traviesas (ADIF) [53]

La especificación española es una de las más restrictivas, tanto en lo que se refiere a la composición del hormigón como en los ensayos de las probetas. En la Tabla 4 se describen los parámetros de diseño prescritos en esta especificación.

Tabla 4. Parámetros de diseño establecidos por la Especificación Española

Característica	Valor
i) Resistencia a compresión	C45/55
ii) Dosificación mínima del cemento	>300kg/m <sup>3</sup>
iii) Relación agua/cemento	<0,45
iv) Resistencia mínima a compresión simple a los 28 días	>59N/mm <sup>2</sup> (probeta cúbica 20cm) >60N/mm <sup>2</sup> (probeta cúbica 15cm)
v) Diferencia entre los distintos valores obtenidos a compresión simple a los 28 días	<18N/mm <sup>2</sup>
vi) Resistencia media a flexotracción a los 7 días (probeta prismática de 15x15x70cm)	>6,5N/mm <sup>2</sup>
vii) Resistencia mínima a flexotracción a los 7 días (probeta prismática de 15x15x70cm)	>5,10N/mm <sup>2</sup>
viii) Resistencia media a tracción indirecta a los 28 días (probeta cilíndrica de Ø 15 x 30 cm)	>4,5N/mm <sup>2</sup>
ix) Porosidad del hormigón	<12%
x) Resistencia a compresión antes de la transferencia de tensión	>45N/mm <sup>2</sup> (probeta cúbica 20cm) >46N/mm <sup>2</sup> (probeta cúbica 15cm)

Por otro lado, en caso de realizar tratamiento térmico, se deberán considerar los criterios descritos a continuación,

- El gradiente de temperatura no podrá superar los 10 °C/hora en el calentamiento ni los 15 °C/hora en el proceso de enfriamiento. Las temperaturas en el hormigón se medirán en el punto más cálido de la línea de fabricación en la fase de curado y lo más cerca posible de la altura media y de la anchura media de la traviesa. En cualquier caso, si el fabricante facilita una relación entre la temperatura del hormigón y la del aire durante todo el ciclo de curado, se podrá medir la temperatura exterior del entorno de la traviesa en la línea de fabricación.
- La temperatura máxima, no deberá rebasar los 60 °C medidos igual que en el párrafo anterior.

Esta temperatura se reduce si el contenido de trióxido de azufre del cemento, expresado como porcentaje en peso de cemento, supera el 2 %, de acuerdo con el gráfico adjunto, Figura 13.

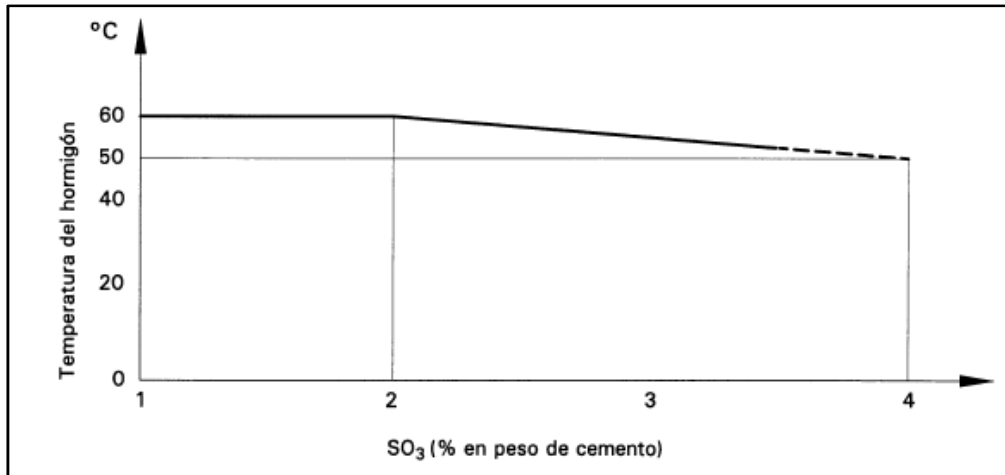


Figura 13. Temperatura en función del contenido de trióxido de azufre del cemento

También se deben seguir las siguientes consideraciones durante el llenado de los moldes,

- Para evitar choques térmicos en el hormigón, la diferencia de temperatura entre el molde y el hormigón no superará los 15 °C
- Deberá mantenerse el grado de humedad necesario para evitar la desecación del hormigón
- Se impedirá la proyección directa del vapor sobre el hormigón en aquellas superficies que no estén cubiertas por el encofrado

El cumplimiento de las especificaciones técnicas se evaluará mediante la realización de una serie de ensayos, descritos en el siguiente apartado, donde los valores obtenidos determinarán si el diseño de la mezcla ensayada es apto para la fabricación del hormigón o, por el contrario, debe ser desechada.

### **3. MATERIALES**

En el presente capítulo se caracterizarán los materiales que intervinieron en el proceso de fabricación del hormigón reciclado para las distintas dosificaciones. Se detallarán sus propiedades y las proporciones en las que fueron aplicados.

#### **3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES**

##### **3.3.1 Cemento**

El cemento que se utilizó para la fabricación de los distintos hormigones fue el CEM I 52,5R, que se caracteriza por su bajo contenido en álcalis (Na y K). En la Tabla 5 se definen las propiedades químicas del cemento.

*Tabla 5. Composición química del cemento CEM I 52,5R*

<b>Composición</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>LOI</b>
(%)	21,75	3,38	4,55	64,65	1,63	0,64	0,01	2,66	0,91

La resistencia y el tiempo de endurecimiento del cemento se especifican en la Tabla 6. Estos valores fueron obtenidos por el fabricante tras el ensayo de 105 muestras.

*Tabla 6. Valores resistentes y tiempo de endurecimiento del cemento CEM I 52,5R*

	<b>Especificación</b>	<b>Valor medio</b>	<b>Desviación típica</b>
Resistencia a los 2 días (MPa)	> 30	34,7	1,54
Resistencia a los 28 días (MPa)	> 52,5	65,6	1,78
Inicio fase endurecimiento (minutos)	> 45	262	35
Final fase endurecimiento (minutos)	< 720	361	40

##### **3.3.2 Áridos**

Los áridos utilizados en el proceso de fabricación de los diferentes hormigones reciclados fueron los siguientes.

###### **3.3.2.1 Áridos gruesos**

Se utilizaron áridos naturales y áridos reciclados como árido grueso para la fabricación del hormigón.

Los áridos naturales que se usaron fueron dolomita triturada 4/10mm y grava de río 4/11mm. Estos dos tipos de árido natural fueron los utilizados en la dosificación del hormigón de alta resistencia aplicado a la utilización de traviesas.

Para evaluar la influencia de los áridos reciclados en las propiedades del hormigón en función de su calidad, se utilizaron tres tipos de árido grueso obtenidos a partir de residuos de hormigón de diferentes resistencias características (40MPa, 60MPa, 100MPa). En primer lugar, se trituraron algunas muestras desechadas de hormigones de 100MPa procedentes de una planta de prefabricado para obtener áridos reciclados de alta resistencia. Posteriormente, el árido reciclado de 60MPa se obtuvo a partir de la trituración, a los 28 días, de las probetas de hormigón de 60MPa fabricadas en el laboratorio de Materiales de la Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña. Finalmente, se trituraron algunos residuos de la construcción de hormigones de 40MPa procedentes de la trituración de vigas en desuso fabricadas en el laboratorio de Tecnología de Estructuras de la misma universidad.

Para la fabricación de los distintos hormigones se utilizó el tamaño de árido 4/10mm, que se obtuvo triturando las muestras en repetidas ocasiones.

La granulometría de los áridos se determinó siguiendo las especificaciones de la norma UNE EN 933-1:1998, donde se precisan las medidas nominales y la forma de la apertura de los diferente tamices utilizados para determinar el tamaño de las partículas de los áridos. En la Figura 14 se muestra la distribución granulométrica de los áridos gruesos. Se puede observar que la granulometría de los áridos naturales se aproxima a las de los áridos reciclados.

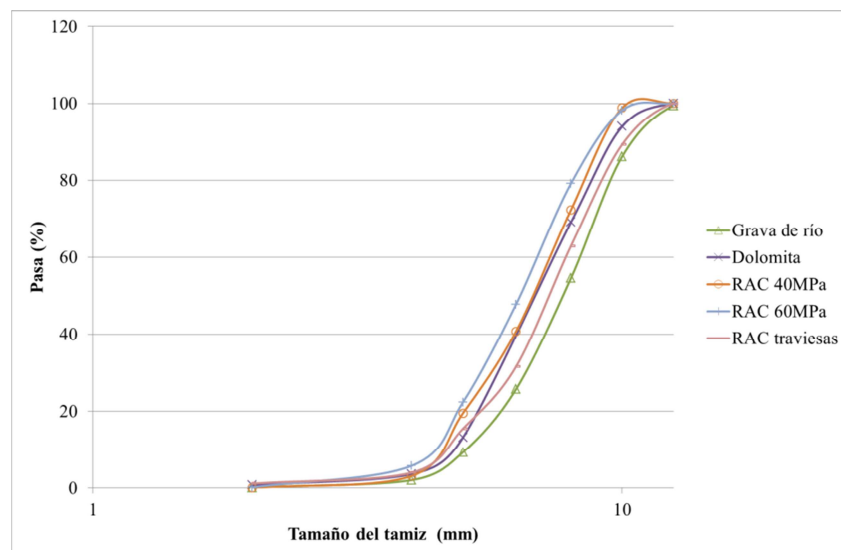


Figura 14. Granulometría de los áridos gruesos

También se determinaron las propiedades físicas y mecánicas de los áridos gruesos. Para ello, se siguieron las especificaciones UNE. Como se observa en la Tabla 7, los áridos naturales presentan una densidad mayor que los áridos reciclados, mientras que la capacidad de absorción de agua es menor en los áridos naturales. En cualquier caso, todos los áridos gruesos cumplen con el límite de absorción de agua del 7% especificado en la EHE. También se puede observar que las propiedades de los áridos reciclados mejoran cuando la resistencia a compresión del hormigón original es más elevada. Con respecto al índice de lajas, que indica la relación del peso de las partículas en forma de laja respecto al peso total, se puede ver que los áridos reciclados presentan una forma adecuada ya que los porcentajes obtenidos son similares a los de los áridos naturales. El desgaste de los áridos naturales es parecido al de los áridos reciclados, a excepción de la grava de río, que obtuvo un porcentaje menor. Esta característica se mide con el coeficiente de Los Angeles, mediante el cual se evalúa la resistencia a la fragmentación por choque de los áridos gruesos.

*Tabla 7. Propiedades físicas y mecánicas de los áridos gruesos naturales y reciclados*

	<b>Densidad de la partícula secada en horno (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorción de agua (%)</b>	<b>Índice de lajas (%)</b>	<b>Coefficiente de los Ángeles (%)</b>
Grava de río	2,61	1,29	17,71	19,61
Grava Dolomita	2,68	2,13	7,81	24,77
RAC 40 MPa	2,30	5,91	9,59	24,31
RAC 60 MPa	2,39	4,90	13,57	25,24
RAC 100 MPa	2,47	3,74	16,53	24,01

Debido a su alta capacidad de absorción, los áridos reciclados deben saturarse antes de ser utilizados en el proceso de fabricación del hormigón, con el objetivo de mantener la trabajabilidad en el hormigón fresco y controlar la relación a/c efectiva. Siguiendo las recomendaciones de M. Etxeberria et al. [2], se mojaron hasta conseguir un nivel de humedad del 80% respecto de su capacidad de absorción total. Es importante destacar que no se saturaron al 100% para evitar la pérdida de adherencia entre el árido reciclado y la nueva pasta de cemento en la zona de transición interfacial [53]. Previamente a la fabricación, los áridos reciclados se extendieron en una lona de plástico, donde se humedecieron con la ayuda de un rociador. Finalmente, se comprobó que tuviesen la humedad adecuada.





Figura 15. Mojado de los áridos reciclados

### 3.3.2.1 Áridos finos

Para la fabricación de los diferentes hormigones se utilizaron dos tipos de árido fino natural: arena 0/2mm y arena 0/4mm, ambas procedentes de arena de río.

La granulometría obtenida para los áridos finos se muestra en la Figura 16. La arena 0/2mm presenta una mejor compacidad.

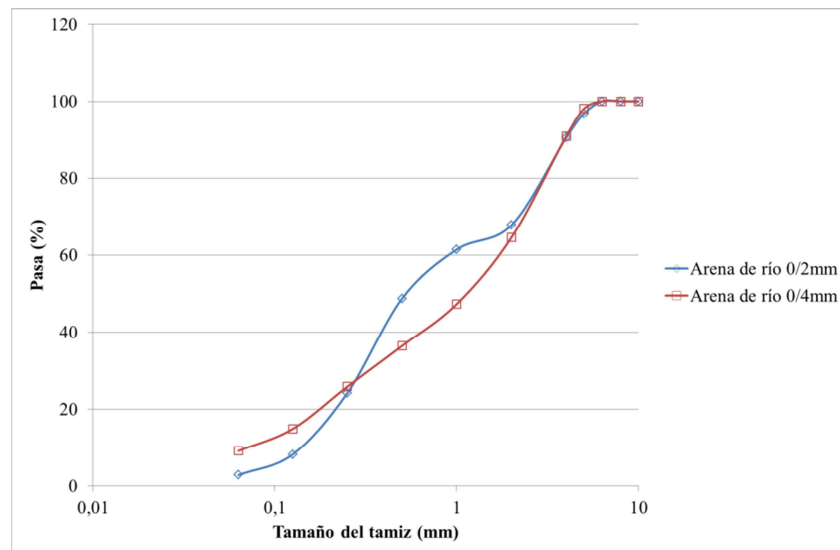


Figura 16. Granulometría de los áridos finos

En la Tabla 8 se definen las propiedades físicas y mecánicas de los áridos finos.

Tabla 8. Propiedades físicas y mecánicas de los áridos finos naturales

	Densidad de la partícula secada en horno ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )	Absorción de agua (%)
Arena de río 0/2mm	2,50	1,02
Arena de río 0/4mm	2,57	1,93

Antes de iniciar el proceso de fabricación, la arena se humedeció con la ayuda de un rociador, hasta conseguir una humedad del 3-4%, con lo que se pretendía alcanzar resistencias a compresión más elevadas a la edad de 1 día [53]. Se siguió el procedimiento realizado en la planta referencia para la fabricación de hormigón de alta resistencia aplicado a la utilización de traviesas.

### 3.3.2 Aditivo

En todas las dosificaciones se utilizó el aditivo SIKA VISCOCRETE 20 HE. Se define como un superplastificante especialmente indicado para hormigones de alta resistencia con una elevada resistencia inicial y baja permeabilidad. También se caracteriza por su buena adsorción a la superficie de los áridos finos y su buena dispersión durante el proceso de hidratación. Con su utilización se producen los siguientes efectos,

- Elevada aptitud de autocompactación, por lo que su uso está ampliamente extendido en hormigones autocompactables
- Considerable reducción del agua de amasado, obteniendo hormigones de altas resistencias y con gran impermeabilidad
- Altas resistencias iniciales
- Disminución de la fluencia y retracción
- Demora de los efectos relativos a la carbonatación del hormigón

La dosificación recomendada es del 0,5 al 1,5% del peso del conglomerado.

## **4. METODOLOGÍA Y ENSAYOS DEL HORMIGÓN**

En este capítulo se explicará el proceso de fabricación del hormigón, donde se definirán las distintas fases del proceso y se especificarán los ensayos que se realizaron en el hormigón endurecido, de modo que las propiedades y la caracterización de los diferentes hormigones quedarán definidas.

### **4.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN**

Durante el proceso de fabricación se realizaron diferentes dosificaciones. En todos los casos, se mantuvo constante la cantidad de cemento y la relación a/c efectiva, y únicamente se modificó la cantidad de árido natural en función del porcentaje de reemplazo aplicado. Para cada tipo de hormigón, se utilizaron tres porcentajes de sustitución de árido natural: 20%, 50% y 100%. El tipo de hormigón venía definido por la calidad del árido grueso, que se obtuvo a partir de la trituración de residuos de hormigón de diferentes resistencias características (40MPa, 60MPa, 100MPa).

Para definir las propiedades mecánicas del hormigón, se realizaron los ensayos de resistencia a compresión, de resistencia a tracción y de resistencia de adherencia entre la barra de acero y el hormigón, a los 28 días. La durabilidad del hormigón fabricado se evaluó mediante la retracción por secado de las probetas. Los resultados obtenidos se compararon con los del hormigón convencional.

#### **4.1.1 Fabricación**

La fabricación de todos los hormigones se realizó en el laboratorio de Materiales de la Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña. Para la fabricación de probetas se utilizó una mezcladora de eje vertical (Figura 17).

Se siguió el mismo proceso de pastado para todos los hormigones. En primer lugar, se introdujeron las fracciones de árido gruesas (árido reciclado y gravas) en la mezcladora. A continuación, se añadieron las fracciones de árido finas y el cemento, y se realizó un primer ciclo de mezclado (mezcla seca). Una vez realizada la mezcla de los áridos con el cemento, se realizó un último ciclo de mezclado en el que se añadió el agua en el menor tiempo posible desde la puesta en marcha de la mezcladora. El aditivo, el cual se suele añadir en los casos en que el hormigón puede presentar una consistencia seca, se vertió en última instancia.

Después del pasado se comprobó la consistencia del hormigón fresco con el Cono de Abrams. Con este ensayo se pretende verificar que el hormigón fabricado tenga la consistencia adecuada antes de introducirlo en los moldes correspondientes.



*Figura 17. Mezcladora de eje vertical*

#### **4.1.2 Dosificaciones utilizadas**

Se fabricaron cuatro tipos de hormigón; un hormigón convencional, fabricado con áridos naturales, y tres hormigones reciclados, fabricados a partir de la sustitución de árido natural por áridos reciclados de distintas calidades. Los hormigones reciclados se denominaron como HR-100, HR-60 y HR-40, en función de la resistencia a compresión característica que presentaba el hormigón original. El porcentaje de sustitución (en volumen) de árido natural por árido reciclado fue del 20%, 50% y 100%, para cada tipo de hormigón reciclado.

Para controlar la fabricación del hormigón, el árido reciclado se humedeció y se cubrió con una lona de plástico hasta el inicio de la fabricación para mantener un alto nivel de humedad. M. Etxeberria et al. [2] recomiendan utilizar los áridos reciclados con un nivel de humedad del 80% respecto de su capacidad de absorción total, aunque el factor más determinante fue que los áridos reciclados estuviesen mojados para reducir su alta capacidad de absorción [56]. Debido al contenido moderado de humedad inicial que presentan, los áridos reciclados absorbieron una cierta cantidad de agua libre que provocó una disminución del ratio  $a/c$  inicial en la zona de transición interfacial. Por consiguiente, se consiguió una mejor adherencia en la interfase entre los áridos y el cemento [56]. Sin embargo, los áridos reciclados no deben estar saturados [54], ya que de ser así probablemente se produciría un fallo en la zona de transición interfacial entre los áridos reciclados saturados y la nueva pasta de cemento. En consonancia con esta idea, Poon et al. [58] encontraron resistencias más bajas, a cualquier edad, en los hormigones fabricados utilizando áridos con la superficie saturada con respecto al hormigón fabricado con áridos secados por aire, debido al efecto negativo de exudación de los áridos saturados.

Los áridos finos también se humedecieron el día antes de la fabricación para controlar los resultados de resistencia a compresión a la edad de 1 día y evitar dispersiones. El contenido de humedad de los áridos finos se fijó en un 3-4% (sobresaturados) para lograr resistencias a compresión más elevadas en los primeros días, debido a la menor cantidad de agua libre añadida durante el proceso de fabricación.

La dosificación del hormigón convencional se realizó por el método de Fuller [59]. Para las dosificaciones de hormigón reciclado, se dieron como aceptables las aproximaciones a la curva teórica de Fuller.

En la Tabla 9 y en la Tabla 10 se muestran las denominaciones de los distintos hormigones y las dosificaciones realizadas, respectivamente.

Tabla 9. Nomenclatura de los hormigones

Tipos de hormigón	Nomenclatura
Hormigón convencional	HC
Hormigón con un 20% de sustitución por áridos de 100 MPa	HR-100-20
Hormigón con un 50% de sustitución por áridos de 100 MPa	HR-100-50
Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 100 MPa	HR-100-100
Hormigón con un 20% de sustitución por áridos de 60 MPa	HR-60-20
Hormigón con un 50% de sustitución por áridos de 60 MPa	HR-60-50
Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 60 MPa	HR-60-100
Hormigón con un 20% de sustitución por áridos de 40 MPa	HR-40-20
Hormigón con un 50% de sustitución por áridos de 40 MPa	HR-40-50
Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 40 MPa	HR-40-100

Tabla 10. Dosificaciones realizadas en la fase experimental para 1m<sup>3</sup>

Hormigones	Arena (0-2) (Kg)	Arena (0-4) (Kg)	Gravilla (4-11) (Kg)	Gravilla (4-10) (Kg)	AR (Kg)	Cemento (Kg)	Agua total (Kg)	A/C efectiva	Aditivo (%)
<b>HC</b>	215	711	302	784	-	380	135.4	0.287	1.5
<b>HR-100-20</b>	215	711	242	628	202	380	137.1	0.287	1.5
<b>HR-100-50</b>	215	711	151	392	505	380	146.5	0.287	1.5
<b>HR-100-100</b>	215	711	-	-	1010	380	162.3	0.287	1.5
<b>HR-60-20</b>	215	711	242	628	195	380	138.2	0.287	1.5
<b>HR-60-50</b>	215	711	151	392	487	380	149.8	0.287	1.5
<b>HR-60-100</b>	215	711	-	-	975	380	170.4	0.287	1.5
<b>HR-40-20</b>	215	711	242	628	188	380	139.7	0.287	1.5
<b>HR-40-50</b>	215	711	151	392	469	380	153.1	0.287	1.5
<b>HR-40-100</b>	215	711	-	-	939	380	175.3	0.287	1.5

Para todas las dosificaciones, se mantuvo constante la cantidad de cemento y la relación a/c efectiva, cuyos valores fueron 380kg y 0,287, respectivamente. Se determinó el ratio a/c del hormigón convencional y se mantuvo constante para el resto de hormigones (el agua efectiva se consideró como

la que componía la pasta de cemento). Para controlar el ratio a/c efectivo en los hormigones reciclados, se sobresaturaron los áridos finos (el agua no absorbida se consideró parte del agua efectiva), se secaron los áridos gruesos naturales, considerando que absorbieron el 20% de agua de su capacidad de absorción total (esa fue la capacidad de absorción de los áridos tras ser sumergidos durante 30 minutos en agua), y se utilizaron los áridos reciclados con aproximadamente el 80% de humedad, considerando que absorbieron el 70% de su capacidad de absorción total. La cantidad de agua total del cemento se consideró como el peso de agua efectiva más el agua absorbida por los áridos.

Por lo que respecta a la consistencia del hormigón, todas las dosificaciones presentaron una consistencia seca y en todos los casos se utilizó un 1,5% de superplastificante (respecto del peso de cemento).

#### **4.1.3 Probetas, densidad y compactación del hormigón fresco**

Se tomó como referencia la norma UNE- EN 12390-2:2001 “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.

Los moldes que se utilizaron en la fase experimental fueron: Tres cúbicos 100x100mm para el ensayo de compresión, tres cilíndricos Ø100x200mm para el ensayo de tracción indirecta, tres cúbicos 150x150mm para el ensayo de adherencia, tres prismáticos 75x75x285mm para el ensayo de retracción por secado (variación de longitud) y dos prismáticos 100x100x400mm para el ensayo de retracción por secado (galgas extensiométricas embebidas).

Una vez pastado, el hormigón se introdujo en los moldes, las paredes y bases de los cuales se habían impregnado previamente con un tipo de aceite que facilitaba su posterior desamoldaje. El llenado de las probetas se realizó en dos capas, cada una de las cuales se compactó para eliminar el aire recluso en el hormigón y evitar así una excesiva porosidad. En algunos casos, debido a la baja relación a/c utilizada, fue necesario realizar otro ciclo de mezclado para evitar un endurecimiento excesivo del hormigón.

El proceso de compactación se realizó inmediatamente después del llenado de los moldes, con el objetivo de obtener una compactación completa y sin excesiva segregación. Se utilizó una mesa de vibrado, ya que debido a la consistencia seca del hormigón resultaba difícil hacer una compactación manual. El tiempo de vibrado aplicado fue de 30 segundos por ciclo, aunque se alargó algunos segundos más en los casos donde todavía se apreciaban burbujas de aire en la superficie del hormigón.

Tras la compactación de las probetas, los moldes se enrasaron para eliminar el material residual y conseguir la máxima planicidad en la cara superior.

Finalmente, se cubrieron con una arpillera húmeda para evitar la evaporación del agua superficial, la cual se retiró transcurridas 24 horas para proceder al desamoldaje.



*Figura 18. Probetas compactadas y enrasadas*

También se determinó la densidad del hormigón fresco. Para ello, se calculó la diferencia de pesos entre el peso inicial de una probeta metálica de un litro de volumen y el peso de la misma probeta rellena con hormigón. Esta densidad experimental debe corresponderse con la calculada previamente para realizar la dosificación.

#### **4.1.4 Desamoldar, marcaje y conservación de las probetas**

El proceso de desamoldaje se realizó transcurridas 24 horas desde el llenado de las probetas, retirando cuidadosamente el hormigón depositado en su interior para evitar causar cualquier daño en la probeta u hormigón. Seguidamente, se marcan las muestras con un rotulador permanente indicando el tipo de hormigón fabricado, utilizando la nomenclatura previamente detallada (Tabla 9), y la fecha de fabricación.

Posteriormente, se almacenan en la cámara húmeda hasta la realización de los ensayos. Esta cámara se mantiene en unas condiciones estacionarias de 21°C y un 95% de humedad.



Figura 19. Imagen de la cámara húmeda

## 4.2 ENSAYOS DE HORMIGÓN ENDURECIDO

En este capítulo se detallarán y explicarán los diferentes ensayos realizados en los hormigones fabricados durante la fase experimental.

### 4.2.1 Ensayo de compresión

Este ensayo consiste en determinar la resistencia a compresión de las probetas. Para ello, se comprimen hasta rotura en una máquina de ensayo de compresión (prensa), registrándose la carga máxima alcanzada por la probeta. Posteriormente, se calcula la resistencia a compresión del hormigón ( $f_c$ ).

Se siguieron las especificaciones de la norma española UNE-EN 12390-3 [60]. Para cada hormigón se ensayaron tres probetas cúbicas de 100mm, a los 28 días.

Para la correcta realización del ensayo, las probetas se colocaron de tal forma que la carga aplicara perpendicularmente a la dirección del hormigonado. También se secó el exceso de humedad de la superficie de la probeta y se eliminaron los pequeños restos de gravilla de las superficies de la probeta que estuvieran en contacto con los platos de la máquina de ensayo. Se debe garantizar el repartimiento uniforme de la carga aplicada sobre toda la superficie de contacto entre la probeta y la prensa.

Se seleccionó una velocidad de carga constante dentro del rango de 0,2 MPa/s ( $N/mm^2/s$ ) a 1,0 MPa ( $N/mm^2/s$ ). La carga se aplicó a la probeta sin choques y se incrementó continuamente, a la velocidad seleccionada  $\pm 10\%$ , hasta que no se pudiera soportar más carga.





Figura 20. Máquina de ensayo

La fuerza aplicada y la deformación experimentada por la probeta a lo largo del ensayo fueron registradas por un sistema de adquisición de datos conectado a la máquina de ensayo.

Finalmente, se calculó la resistencia a compresión a partir de la expresión,

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Donde,

$f_c$ : resistencia a compresión

$F$ : carga máxima en rotura

$A_c$ : área transversal de la probeta sobre la que actúa la fuerza a compresión

#### 4.2.2 Ensayo de tracción indirecta - Ensayo Brasileño

Este ensayo permite determinar la resistencia a tracción indirecta ( $f_{ct}$ ) de probetas cilíndricas de hormigón endurecido. Para ello, se siguió la norma española UNE-EN 12390-6 [61] y se ensayaron tres probetas cilíndricas de Ø100x200mm para cada hormigón, a los 28 días. Las muestras se sometieron a una fuerza de compresión aplicada en una banda estrecha en toda su longitud, y el resultado de la fuerza a tracción ortogonal resultante originó que la probeta rompiera a tracción. En la Figura 21 se representa la configuración del ensayo y la rotura de la probeta por tracción indirecta.

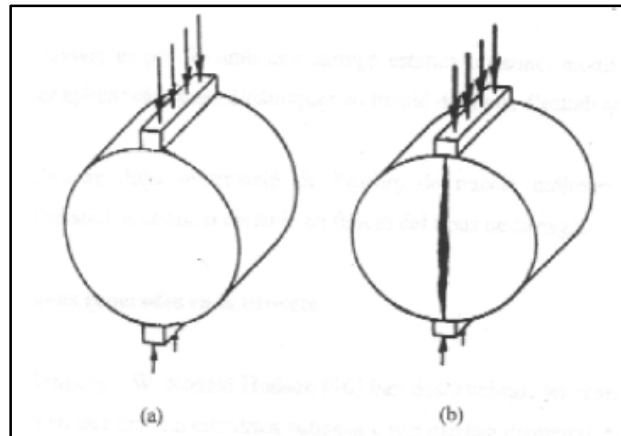


Figura 21. Configuración de la carga (a) y rotura de la probeta (b)

Antes de colocar las probetas en la máquina de ensayo, se eliminó el exceso de humedad de la superficie de la probeta y se eliminó la arena de las superficies de la probeta que estuvieran en contacto con los soportes del dispositivo.

Durante el ensayo, la probeta permaneció centrada, y se colocó horizontalmente de modo que las caras planas quedaran perpendiculares a los platos de carga.

El incremento de tensión que se seleccionó fue constante dentro del rango de  $0,03 \pm 0,01$  MPa/s ( $\text{N}/\text{mm}^2/\text{s}$ ). La carga se aplicó sin brusquedades y se incrementó constantemente, a la velocidad seleccionada  $\pm 1\%$ , hasta que la probeta no pudiera soportar más carga.

Un sistema de adquisición de datos conectado al dispositivo de ensayo permitió medir la fuerza aplicada y la deformación experimentada por la probeta a lo largo del ensayo.

La tensión indirecta se obtuvo a partir de la expresión,

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l \cdot d}$$

Donde,

$f_{ct}$ : tensión indirecta

$P$ : carga aplicada

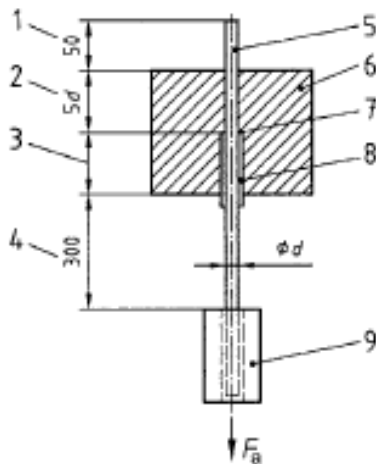
$l$ : longitud de la probeta

$d$ : diámetro de la probeta

### 4.2.3 Ensayo de adherencia (pull-out)

El ensayo de pull-out consiste en determinar la adherencia del acero para armaduras de hormigón armado. Para ello, se aplica una carga de tracción a una barra embebida en una longitud determinada en el interior de un cubo de hormigón, permaneciendo el otro extremo de la barra sin ningún tipo de tensión, tal y como se recoge en la norma española UNE-EN-10080 [62]. La relación existente entre la fuerza de tracción aplicada y el deslizamiento producido (el deslizamiento relativo entre el acero y el hormigón) se mide hasta que se produce el fallo. La fuerza de tracción se va incrementando hasta que se produce el fallo de la adherencia o hasta que rompe el acero para armar.

En la Figura 22 se ilustra el principio del ensayo.



Donde,

- 1) Parte de la barra hasta el punto de aplicación del dispositivo de medida del desplazamiento
- 2) Longitud de adherencia
- 3) Longitud libre de adherencia  $5d$ , min,  $200\text{mm} - 5d$
- 4) Parta de la barra hasta el punto de aplicación de la fuerza de tracción
- 5) Barra de armadura
- 6) Hormigón
- 7) Obturador
- 8) Manguito de plástico
- 9) Mordaza de la máquina de ensayo

Figura 22. Ilustración del principio del ensayo de arrancamiento

Se utilizaron tres probetas cúbicas de 150mm para cada dosificación, ensayadas a los 28 días y en cuyo centro se dispuso la barra de acero, que sobresalía por ambos lados del molde. Se cubrieron 10mm de barra en el interior del cubo mediante un cilindro de plástico, que impedía que el hormigón se adhiriese a la barra. Esta longitud estaba libre de adherencia. Los 5 milímetros restantes de barra en el interior del cubo se cubrieron con hormigón, formándose la longitud de adherencia entre el hormigón y el acero. La disposición de la armadura y el montaje del molde pueden observarse en la Figura 23. El acero utilizado para la realización del ensayo eran barras pretensadas de  $\text{Ø}10\text{mm}$ . Se usó este tipo de acero porque sus características correspondían con las de las armaduras empleadas en la fabricación de las traviesas.



Figura 23. Montaje del molde para el ensayo de arrancamiento (pull-out)

La tracción se aplicó, con un gato hidráulico, en el extremo de la barra que más sobresalía, con el objetivo de desplazarla hasta 55mm. El dispositivo para medir el deslizamiento se dispuso en el extremo que menos sobresalía, y en todo momento se registró la fuerza aplicada y el desplazamiento que se producía en la barra.

Se seleccionó una velocidad de carga de 1mm/min para los primeros 20mm y de 2mm/min para el resto de milímetros. El desplazamiento total registrado fue de 55mm.

En la Figura 24 se muestra una fotografía tomada durante la realización del ensayo.



Figura 24. Fotografía tomada durante el ensayo de arrancamiento

Para obtener los resultados deseados se transformaron las fuerzas de tracción  $F_a$  medidas durante el ensayo en tensiones de adherencia mediante la siguiente expresión,

$$\tau_{dm} = \frac{1}{5\pi} \frac{F_a f_{cm}}{d^2 f_c}$$

Donde,

$f_{cm}$ : valor de la clase de resistencia del hormigón

$f_c$ : resistencia media del hormigón de las probetas de ensayo

El ensayo de arrancamiento también proporcionó la relación,

$$\tau_{dm} = f(\Delta_o)$$

Donde,

$\Delta_o$ : deslizamiento medido bajo la fuerza de tracción  $F_a$ . Las curvas carga-deslizamiento de todos los ensayos individuales realizados sirvieron como base para la evaluación de la adherencia. Esto se verá en el capítulo de resultados.

#### 4.2.4 Ensayo de retracción por secado

##### 4.2.4.1 Retracción por secado - Método de variación de longitud

La variación de longitud se midió registrando la deformación que habían experimentado las probetas a lo largo del tiempo. Se utilizaron unos clavos de acero insertados en los extremos de las probetas como puntos de referencia, y el aparato que permitió medir las variaciones de longitud fue un dispositivo comparador (Figura 25). Se ensayaron tres probetas prismáticas de 75x75x285mm para cada dosificación a los 7, 14, 21 y 28 días de edad.



Figura 25. Dispositivo comparador para la variación de longitud; a) barra de control (izquierda), b) lectura de una probeta (derecha)

Las probetas se curaron al aire libre cubiertas por una arpillera húmeda y un plástico en las primeras 24h. Después se sacaron y se sumergieron en agua durante dos días. A partir del tercer día se depositaron en una cámara a una temperatura de 20°C y una humedad del 50%.

Para medir la variación de longitud de la probeta de un modo correcto, era necesario referenciar la barra de control a 0 antes de realizar cualquier lectura. A continuación, se introducía la probeta en el aparato y se medía la variación de longitud. Seguidamente, se comprobaba la lectura de la barra de control para corroborar que la medición de la probeta se había realizado correctamente. Para ello, la lectura de la barra de control debía estar comprendida entre -0,003 y 0,003mm. De lo contrario, el ensayo debía repetirse.

La variación de longitud se calculó como la diferencia entre la lectura de la barra de control y la lectura de la probeta.

#### 4.2.4.2 Retracción por secado - Método de galgas embebidas

Se utilizaron dos probetas prismáticas de 100x100x400mm para cada dosificación. La variación de longitud se registró a partir de las lecturas proporcionadas por las galgas extensiométricas embebidas en el hormigón y conectados a un sistema de adquisición de datos. El funcionamiento de estas galgas consiste en la variación de la resistencia eléctrica que experimentan en función de la tensión aplicada en el dispositivo. La tensión puede ser positiva, en caso de alargamiento, o negativa, en caso de retracción. Debido a que los cambios de resistencia que se registran son muy pequeños, las galgas utilizan una configuración puente conocida como puente de Wheastone, que se divide en cuatro brazos resistentes. Estos brazos se alimentan con una fuente de excitación del voltaje, tal y como se ilustra en la Figura 26.

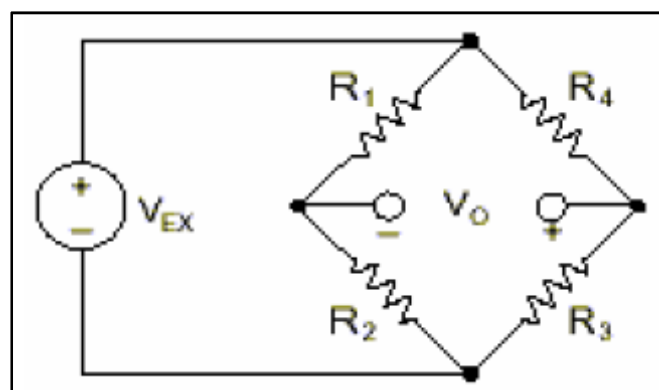
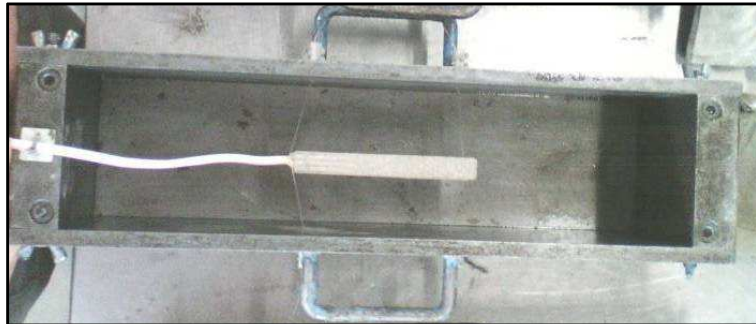


Figura 26. Puente de Wheastone

El curado de las probetas se realizó siguiendo el procedimiento explicado para el método de variación de longitud (punto 4.2.4.1). En la Figura 27 se puede observar la disposición de la galga en el interior del molde antes de que fuera hormigonado.



*Figura 27. Moldes y colocación de las galgas para el ensayo de retracción por secado.*

El sistema de adquisición de datos al cual fueron conectadas las galgas estaba situado en una cámara a una temperatura de 20°C y una humedad del 50%.

Las lecturas registradas por las galgas tuvieron que ser tratadas para expresar los resultados de un modo comprensible.

### **4.3 ENSAYOS DE LA TRAVIESA**

En esta apartado se definirán los ensayos que se realizaron en las traviesas. Se siguieron las prescripciones técnicas ET 03.360.571.8: “Traviesas monobloque de hormigón pretensado” de ADIF [53]. Se instrumentaron algunas de las traviesas ensayadas para medir las deformaciones que se producían en el hormigón y en las armaduras de acero, mediante el uso de galgas extensiométricas, que se colocaron en la superficie de la traviesa (para medir las deformaciones del hormigón) y en las barras de acero (para medir las deformaciones de las armaduras).

Se realizaron tres tipos de ensayo: El estático, realizado en la sección bajo carril y en la sección central de la traviesa, el dinámico, realizado en la sección bajo carril, y el ensayo de fatiga, realizado en la sección bajo carril.

#### **➤ Ensayo estático**

Consiste en la aplicación de una carga estática para confirmar el comportamiento del elemento de hormigón. Se realiza en la sección bajo carril y en la sección central de la traviesa.

Para la ejecución de estos ensayos se considerará como primera fisura la que se origina en cualquier cara de la traviesa debida a las cargas de ensayo, observada a simple vista a 15 mm de la base de ésta, y que aumenta en dimensión según se incrementa la carga.

Para Homologación Técnica [53], se prescribe el empleo de una lupa de cinco aumentos e iluminación artificial mediante un punto de luz.

#### ➤ **Ensayo dinámico**

Consiste en la aplicación de una carga pulsatoria creciente al elemento de hormigón para simular la aparición en la vía de cargas de impacto excepcionales.

Dada la ejecución de estos ensayos se considerará como primera fisura la definida en el ensayo estático.

#### ➤ **Ensayo de fatiga**

Consiste en aplicar una carga dinámica a la traviesa de hormigón, actuando del mismo modo que lo hace habitualmente el tráfico. Los esfuerzos aplicados simulan cargas de tráfico altas y frecuentes con un mínimo de 2 millones de ciclos durante la vida en servicio del elemento de hormigón.

### **4.3.1 Ensayo flexión positiva en sección central**

El criterio de aceptación para el ensayo estático a flexión positiva en la sección central consistirá en que la carga que produce la primera fisura en el centro de la traviesa,  $F_{c_r}$ , sea mayor que la carga de referencia,  $F_{c_0}$ , por lo que se debe cumplir que  $F_{c_r} > F_{c_0}$ .

El montaje para el ensayo a flexión positiva en la sección central de la traviesa se describe en la Figura 28.



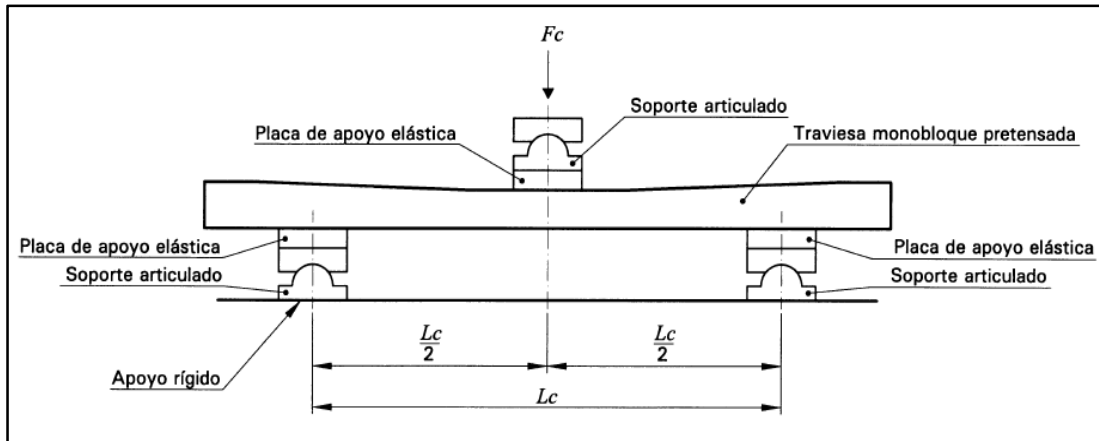


Figura 28. Esquema de montaje para ensayo a flexión positiva en sección central

Siendo  $L_c$  la distancia entre los ejes de carril (m).

El procedimiento del ensayo se realizó según se indica en la Figura 29.

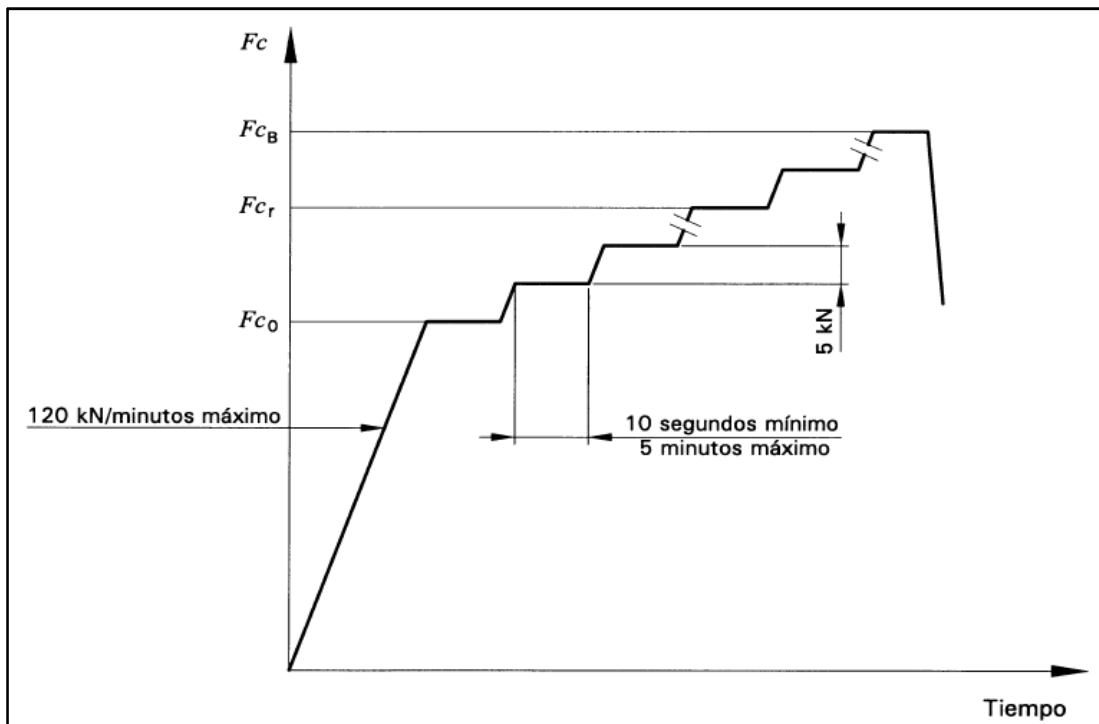


Figura 29. Método de ensayo para flexión positiva en sección central

Siendo,

$F_{c0}$ : carga de referencia inicial para ensayo en sección central de la traviesa (30kN)

$F_{cr}$ : carga que produce la primera fisura en el centro de la traviesa

$F_{cb}$ : carga de rotura para la sección central

## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA FABRICADO CON ÁRIDOS RECICLADOS

En la Figura 30 se muestra la posición de las galgas extensiométricas en el interior de las traviesas. Se colocó una galga en cada una de las dos barras inferiores.

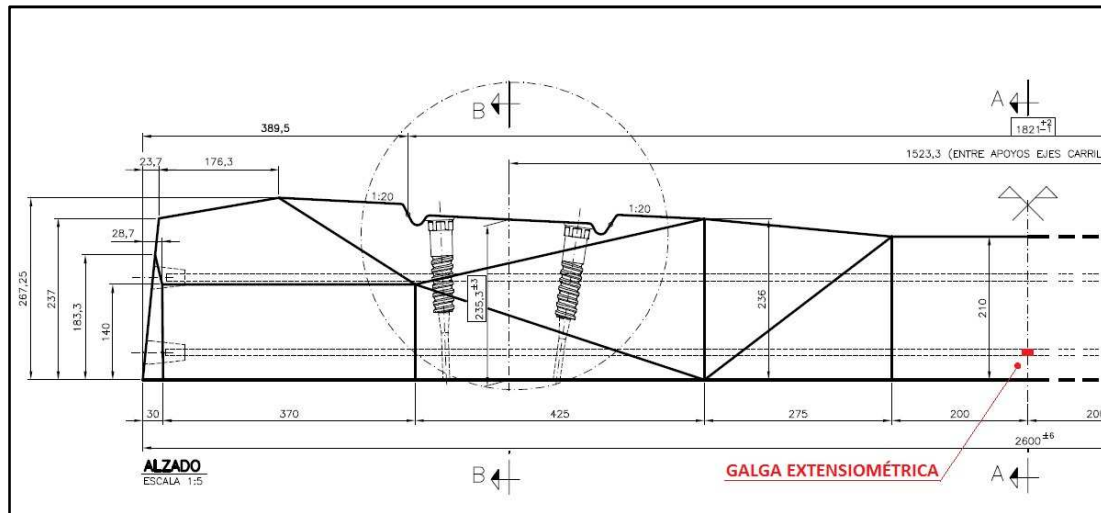


Figura 30. Colocación de galga extensiométrica para ensayo a flexión positiva en sección central

A continuación se adjuntan algunas fotografías tomadas durante la realización del ensayo (Figura 31).

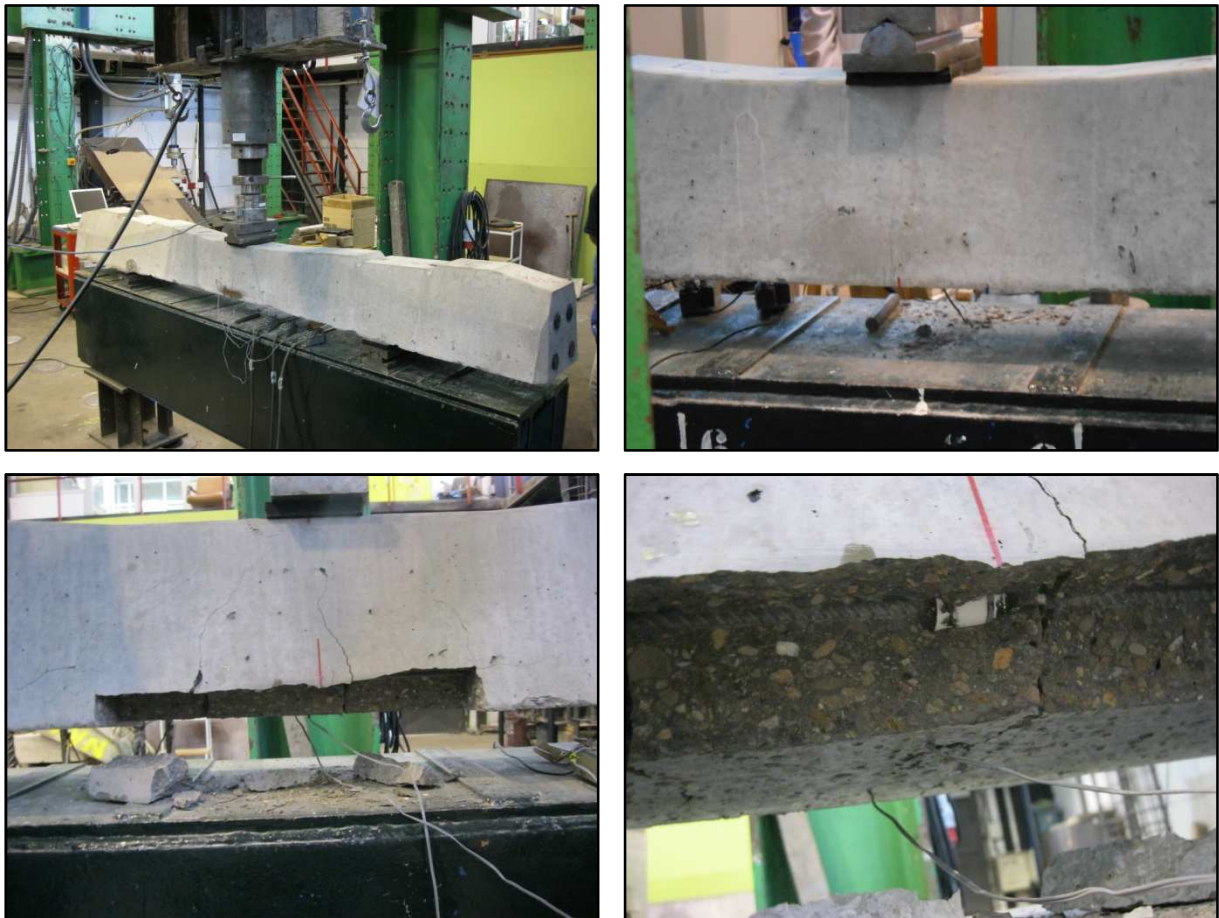


Figura 31. Fotografías del ensayo a flexión positiva en sección central; a) Traviesa ensayada, b) Aparición de la primera fisura, c) Desprendimiento del hormigón, d) Detalle de la galga extensiométrica embebida

### 4.3.2 Ensayo flexión negativa en sección central

Tras la aplicación de la carga  $F_c$  en la sección central de la traviesa, se debe cumplir que la carga que produce la primera fisura en el centro de la traviesa,  $F_{c_r}$ , es mayor que la carga de referencia,  $F_{c_0}$ . Es decir,  $F_{c_r} > F_{c_0}$ .

El montaje para el ensayo a flexión negativa en la sección central de la traviesa se describe en la Figura 32.

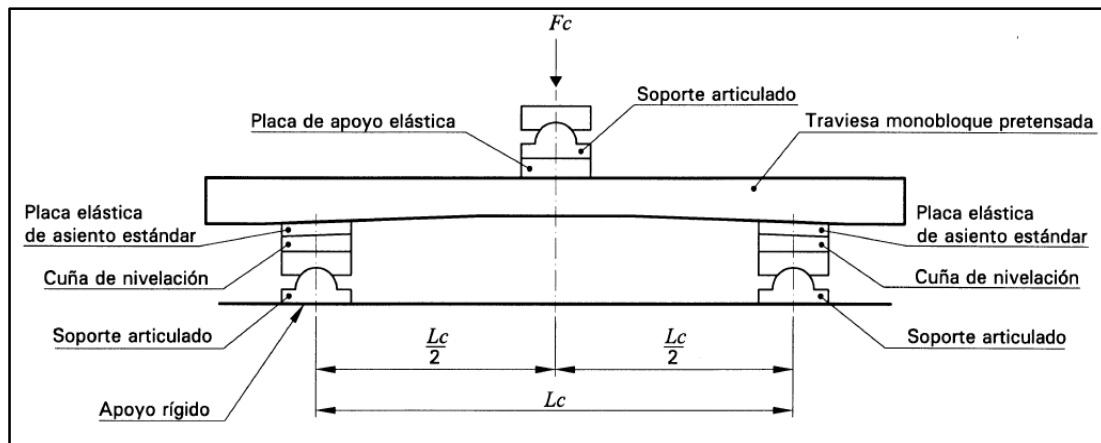


Figura 32. Esquema de montaje para ensayo a flexión negativa en sección central

Siendo  $L_c$  la distancia entre los ejes de carril (m).

El procedimiento del ensayo se realizó según se indica en la figura siguiente (Figura 33).

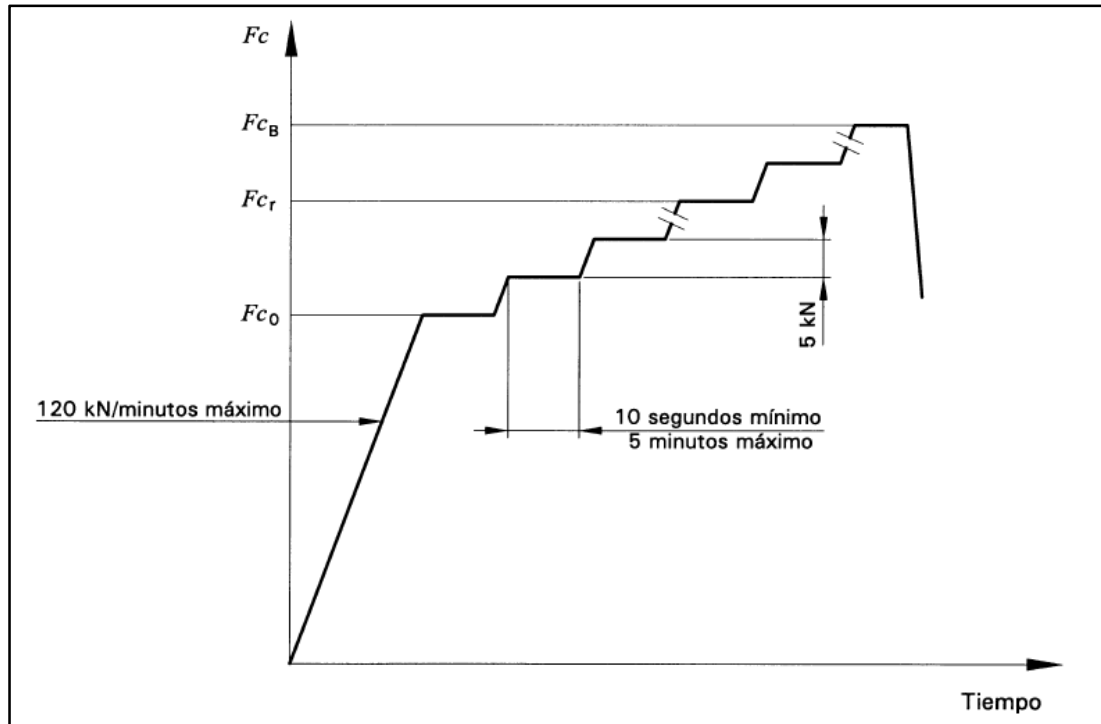


Figura 33. Método de ensayo para flexión negativa en sección central

Siendo,

$F_{c0}$ : carga de referencia inicial para ensayo en sección central de la traviesa (42,5kN)

$F_{c1}$ : carga que produce la primera fisura en el centro de la traviesa

$F_{cB}$ : carga de rotura para la sección central

La posición de las galgas extensiométricas en el interior de las traviesas se muestra en la Figura 34. Se colocó una galga en cada una de las dos barras superiores.

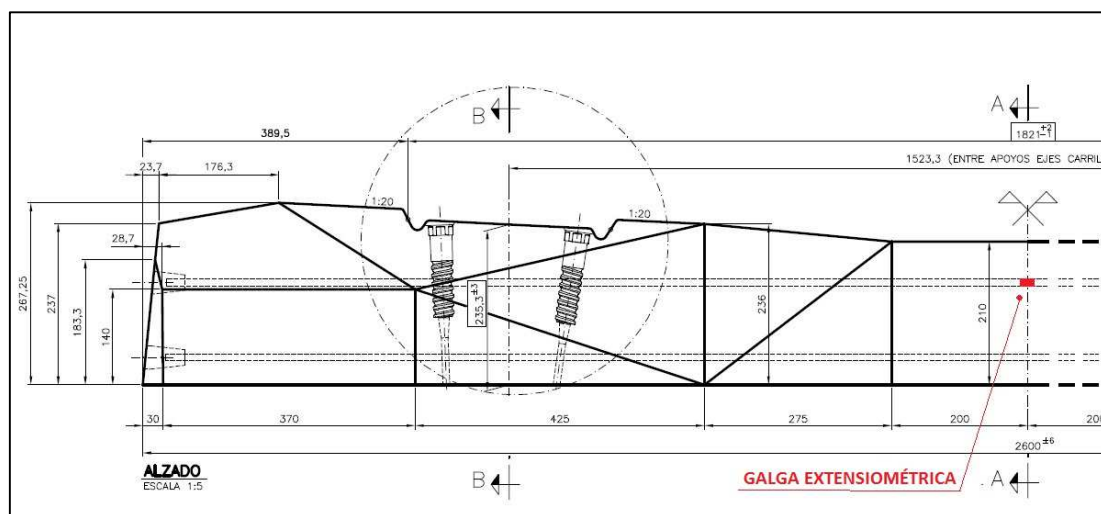


Figura 34. Colocación de galga extensiométrica para ensayo a flexión positiva en sección central

Seguidamente algunas fotografías tomadas durante la realización del ensayo.



Figura 35. Fotografías del ensayo a flexión negativa en sección central; a) Traviesa ensayada, b) Aparición de la primera fisura, c) Aparición de fisuras por esfuerzo cortante

#### 4.3.3 Ensayo flexión positiva en sección bajo carril

Tras la aplicación de la carga  $Fr$  en la sección bajo carril, se debe cumplir que la carga que produce la primera fisura en la fibra inferior de la sección,  $Fr_r$ , es mayor que la carga de referencia,  $Fr_0$ . Es decir,  $Fr_r > Fr_0$ .

Tras realizar la segunda parte del ensayo, se debe cumplir que la carga que produce una fisura remanente de 0,05 mm en la fibra inferior de la sección,  $Fr_{0,05}$ , es mayor que el producto de la carga  $Fr_0$  por un coeficiente de impacto debido a carga excepcional  $K_{1s} = 1,8$ , y además cumplir que la carga de rotura para la sección bajo carril,  $Fr_B$ , es mayor que el producto de la carga  $Fr_0$  por un coeficiente debido a carga accidental  $K_{2s} = 2,5$ . Es decir:

$$Fr_{0,05} > k_{1s} \cdot Fr_0$$

$$Fr_B > k_{2s} \cdot Fr_0$$

En la Figura 36 se describe el montaje para el ensayo a flexión positiva en la sección bajo carril.

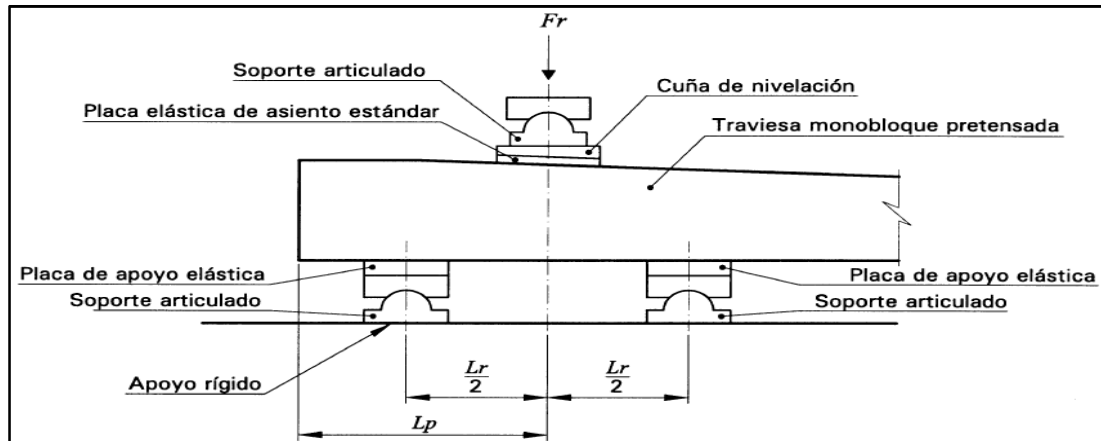


Figura 36. Esquema de montaje sección bajo carril positivo

Siendo,

$Lr$ : distancia entre los ejes de los apoyos articulados utilizados en el montaje de ensayo bajo carril (m).

$Lp$ : distancia entre el eje del carril al nivel de la tabla de apoyo y el extremo de la superficie inferior de la traviesa (0,54m)

$Fr$ : carga aplicada perpendicularmente a la base de la traviesa. El otro extremo de la traviesa debe quedar libre

El procedimiento del ensayo se realizó según se indica en la Figura 37.

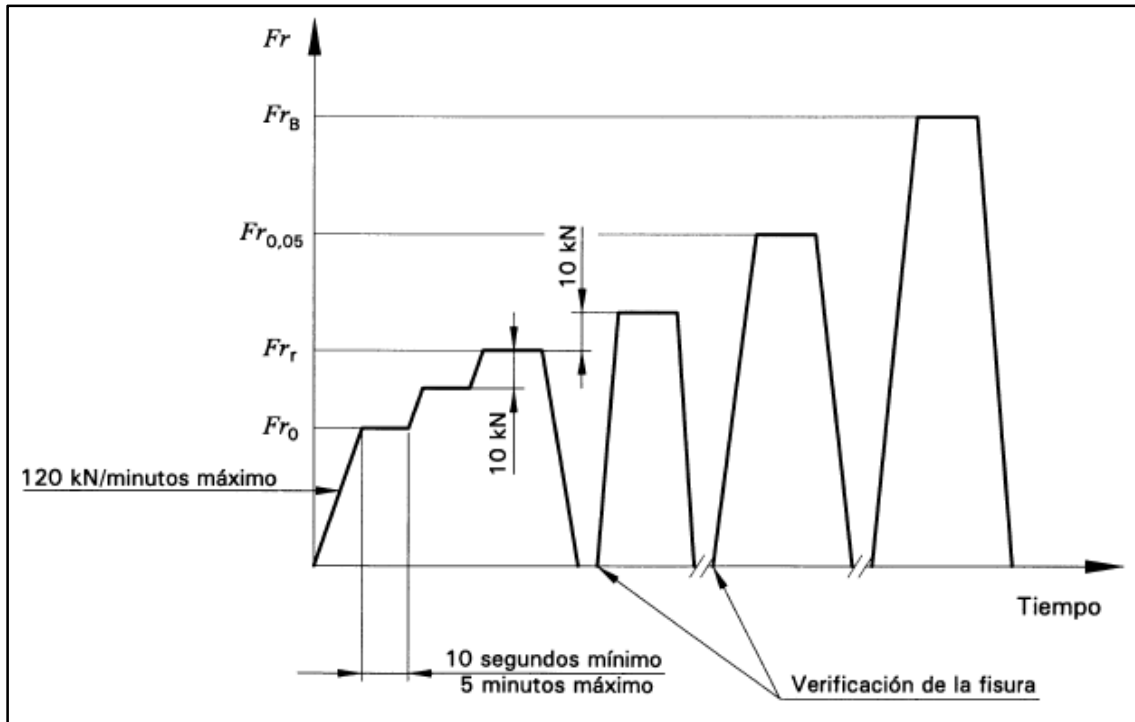


Figura 37. Método de ensayo para flexión positiva en sección bajo carril

Siendo,

$Fr_0$ : carga de referencia inicial para ensayo en la sección bajo carril (156kN)

$Fr_f$ : carga que produce la primera fisura en la fibra inferior de la sección bajo carril

$Fr_{0,05}$ : carga que produce una fisura remanente de 0,05 mm de abertura en la fibra inferior de la sección bajo carril

$Fr_B$ : carga de rotura para la sección bajo carril

En Control de Proceso diario, siguiendo lo indicado en la norma EN 13230-2, tras la parada de carga correspondiente a  $Fr_0$  se continúa hasta la aparición de la primera fisura, obteniendo de ese modo información sobre la proximidad del valor resultante al dato establecido como estándar.

En la Figura 38 se muestra de forma esquemática la posición de las galgas extensiométricas en el interior de las traviesas, una en cada una de las dos barras inferiores.

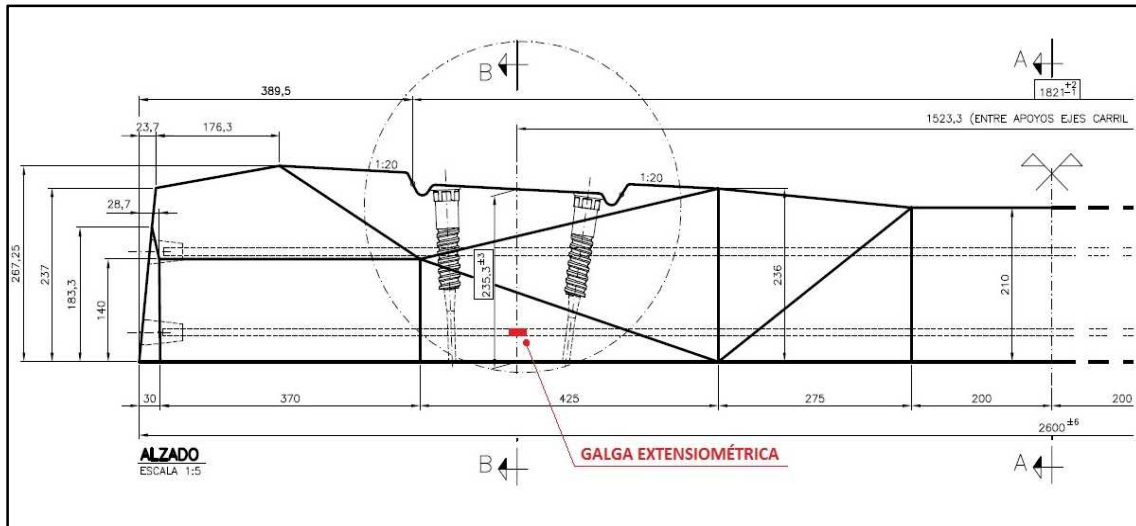


Figura 38. Colocación galga extensiométrica para ensayo a flexión positiva en sección bajo carril

Las fotografías que se adjuntan a continuación fueron tomadas durante la realización del ensayo (Figura 39).

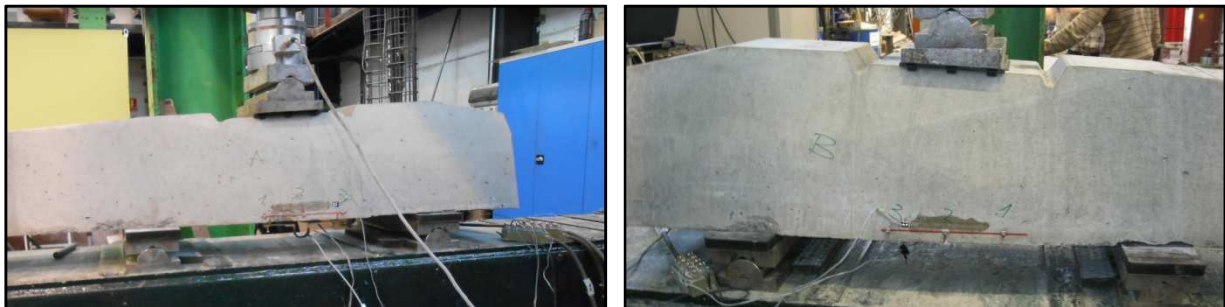


Figura 39. Fotografías del ensayo a flexión positiva en sección bajo carril; a) Traviesa ensayada, b) Detalle de la colocación de la galga en la superficie del hormigón

#### 4.3.4 Ensayo dinámico en sección bajo carril

Tras la aplicación de la carga  $Fr$  en la sección bajo carril, se debe cumplir que la carga que produce una fisura remanente de 0,05 mm en la fibra inferior de la sección,  $Fr_{0,05}$ , es mayor que el producto de la carga  $Fr_0$  por un coeficiente de impacto dinámico  $K_{1d} = 1,5$ , y además cumplir que la carga de rotura para la sección bajo carril,  $Fr_B$ , es mayor que el producto de la carga  $Fr_0$  por un coeficiente de impacto dinámico  $K_{2d} = 2,2$ , o bien la carga que produce una fisura remanente de 0,5 mm en la fibra inferior de la sección,  $Fr_{0,5}$ , es mayor que el producto de la carga aplicada,  $Fr_0$ , por un coeficiente de impacto dinámico  $K_{2d} = 2,2$ . Es decir:

$$Fr_{0,05} > k_{1d} \cdot Fr_0$$

$$Fr_B > k_{2d} \cdot Fr_0 \text{ o bien } Fr_{0,5} > k_{2d} \cdot Fr_0$$



La anchura de fisura debe determinarse mediante un microscopio graduado con una potencia de aumento mínima de 20 veces y precisión de 0,01mm.

El montaje para el ensayo dinámico bajo carril coincide con el realizado para el ensayo estático en la sección bajo carril (Figura 36).

El procedimiento del ensayo se realizó según se indica en la figura siguiente (Figura 40).

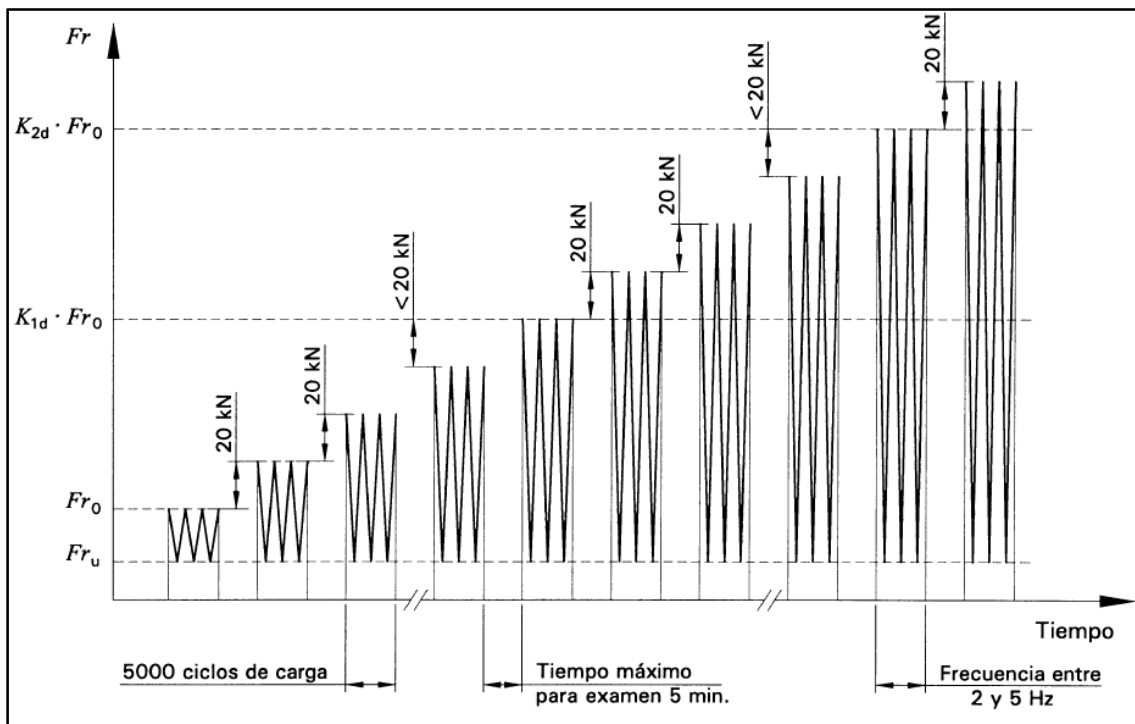


Figura 40. Método de ensayo para dinámico en sección bajo carril

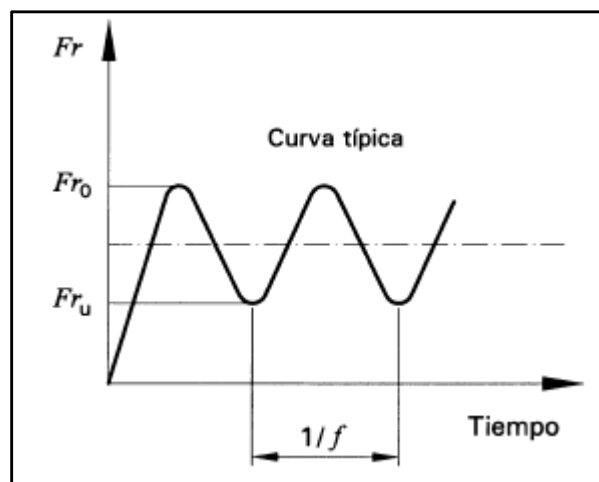


Figura 41. Curva típica ensayo dinámico en sección bajo carril

Se mantuvo la misma frecuencia de aplicación de carga durante la totalidad del ensayo.

Los escalones de carga inmediatamente anteriores a los escalones de cumplimientos definidos por  $K_{1d} \cdot Fr_0$  y por  $K_{2d} \cdot Fr_0$  serán inferiores a 20 kN llegando justamente hasta la carga de referencia.

Siendo,

$Fr_0$ : carga de referencia inicial para ensayo en la sección bajo carril (156kN)

$Fr_u$ : carga mínima para la sección bajo carril en el ensayo dinámico (50kN)

$Fr_r$ : carga que produce la primera fisura en la fibra inferior de la sección bajo carril

$Fr_{0,05}$ : carga de ensayo para la cual una fisura de 0,05 mm de abertura, en la fibra inferior de la sección bajo carril, persiste después de retirar la carga

$Fr_{0,5}$ : carga de ensayo para la cual una fisura de 0,5 mm de abertura, en la fibra inferior de la sección bajo carril, persiste después de retirar la carga

$Fr_B$ : carga de rotura para la sección bajo carril

La colocación de las galgas extensiométricas coincide con la del ensayo estático a flexión positiva en sección bajo carril (Figura 38).

A continuación se adjuntan algunas fotografías tomadas durante la realización del ensayo (Figura 42).

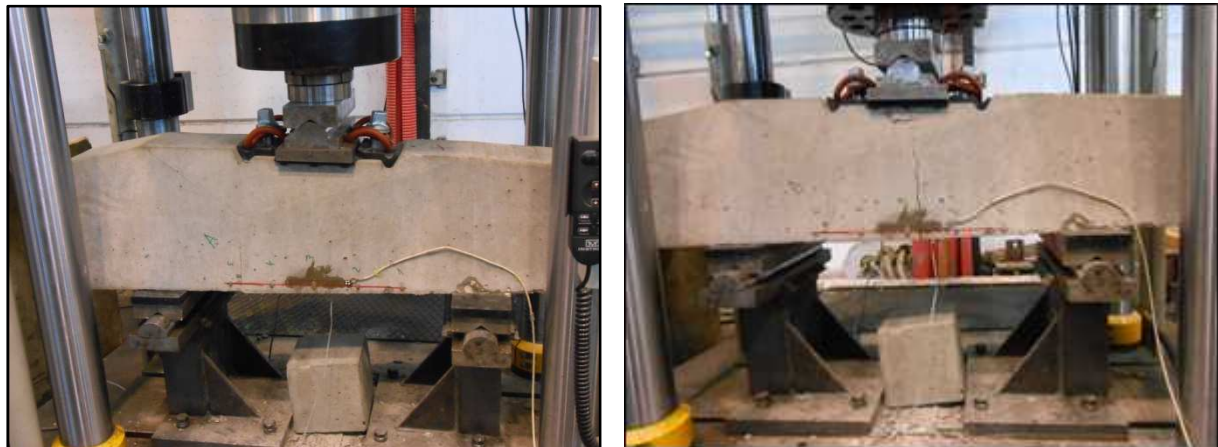


Figura 42. Fotografías del ensayo dinámico en sección bajo carril; a) Colocación de la galga en la superficie del hormigón, b) Aparición de fisura

#### 4.3.5 Ensayo de fatiga en sección bajo carril

Tras la aplicación de la carga  $Fr$  en la sección bajo carril, después de  $2 \cdot 10^6$  ciclos se debe cumplir que,

- Anchura de la fisura  $\leq 0,1$  mm bajo la carga  $Fr_0$
- Anchura de la fisura  $\leq 0,05$  mm después de la descarga
- $Fr_B > K_3 \cdot Fr_0$ , es decir, la carga de rotura para la sección bajo carril,  $Fr_B$ , es mayor que el producto de la carga aplicada,  $Fr_0$ , por un coeficiente de impacto  $K_3 = 2,5$ , después de aumentar la carga de forma continua a 120 kN/min, desde 0 kN hasta rotura  $Fr_B$

La magnitud de la fisura se determinará del mismo modo que para el ensayo dinámico (punto 4.3.4).

El montaje para el ensayo de fatiga bajo carril coincide con el realizado para el ensayo estático en la sección bajo carril (Figura 36).

El procedimiento del ensayo se realizó según se indica en la Figura 43.

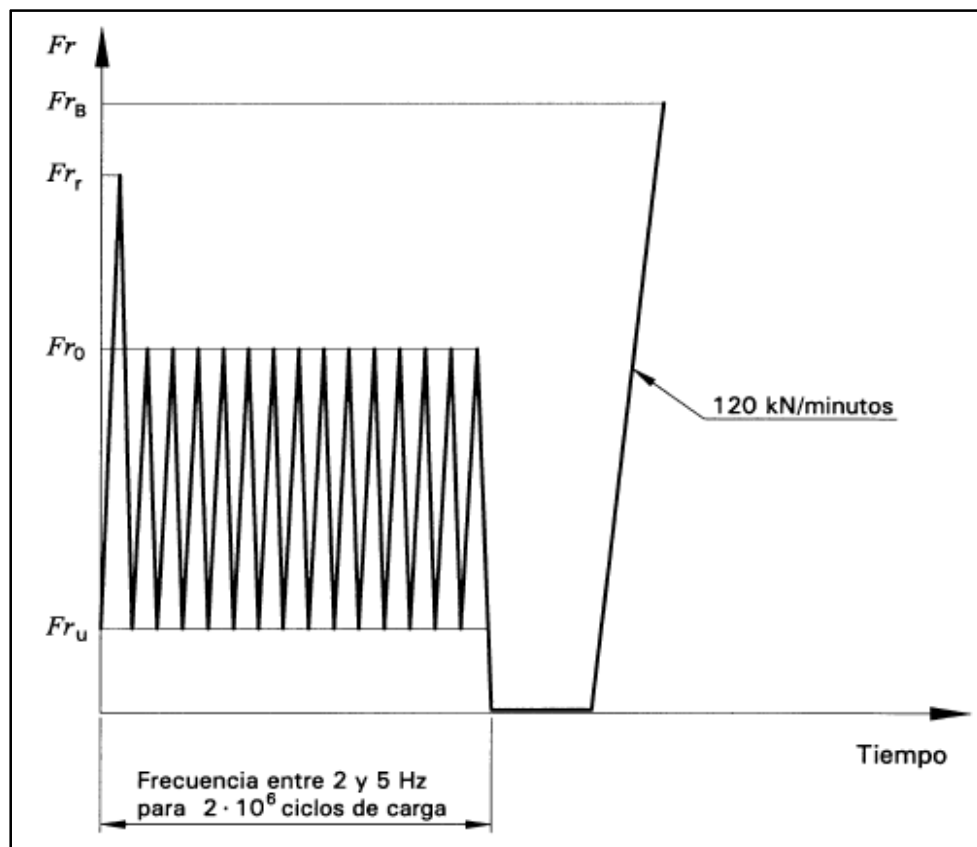


Figura 43. Método de ensayo para fatiga en sección bajo carril

La curva típica coincide con la mostrada en la Figura 41 para el ensayo a flexión dinámico en sección bajo carril positivo.

## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA FABRICADO CON ÁRIDOS RECICLADOS

Siendo,

$F_{r0}$ : carga de referencia inicial para ensayo en la sección bajo carril (156kN)

$F_{r1}$ : carga mínima para la sección bajo carril en el ensayo dinámico (50kN)

$F_{r2}$ : carga que produce la primera fisura en la fibra inferior de la sección bajo carril

$F_{r3}$ : carga de rotura para la sección bajo carril

La colocación de las galgas extensiométricas fue la misma que la mostrada para el ensayo estático a flexión positiva en sección bajo carril (Figura 38).

Seguidamente algunas fotografías tomadas durante la realización del ensayo.



*Figura 44. Fotografías del ensayo de fatiga en sección bajo carril; a) Vista general del ensayo, b) Colocación de la galga en la superficie del hormigón*

## **5. RESULTADOS**

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos a partir de la realización de los ensayos detallados en el capítulo 4 (apartado 4.3).

En primer lugar, se explicarán los valores obtenidos para el hormigón endurecido. El estudio de los resultados nos permitirá hallar las propiedades mecánicas y de durabilidad de los hormigones fabricados.

Posteriormente, se procederá al análisis de los ensayos realizados en las traviesas fabricadas con hormigón reciclado, mediante el cual podremos concluir si el hormigón fabricado es apto para el uso en traviesas ferroviarias. Los áridos reciclados utilizados en la fabricación del hormigón eran de alta calidad, ya que procedían de hormigones de resistencia característica de 100MPa. En la dosificación, se aplicaron unos porcentajes de sustitución del 50 y 100%.

### **5.1 ENSAYOS DEL HORMIGÓN ENDURECIDO**

En este apartado se detallarán y explicarán los resultados obtenidos para el hormigón endurecido fabricado y ensayado en el laboratorio de Materiales de la Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña.

#### **5.1.1 Resistencia a compresión**

En la Tabla 11 se muestran los valores de resistencia a compresión del hormigón a los 28 días.

*Tabla 11. Resistencia a compresión a los 28 días*

<b>Hormigones</b>	<b>Resistencia a compresión a los 28 días (MPa)</b>
<b>HC</b>	102,09
<b>HR-100-20</b>	108,03
<b>HR-100-50</b>	104,80
<b>HR-100-100</b>	108,51
<b>HR-60-20</b>	102,59
<b>HR-60-50</b>	105,89
<b>HR-60-100</b>	98,17
<b>HR-40-20</b>	104,08
<b>HR-40-50</b>	91,57
<b>HR-40-100</b>	89,50

La normativa española de ADIF establece que la resistencia mínima a compresión simple a los 28 días no debe ser menor que 60MPa. Como se puede observar, todas las dosificaciones presentaron resistencias a compresión superiores a este valor. Los hormigones de la serie HR-100 obtuvieron resistencias a compresión superiores a la lograda por el hormigón convencional, probablemente debido a la alta calidad del árido reciclado. La dosificación HR-100-100 alcanzó la mayor resistencia, mientras que el hormigón HR-40-100 presentó la resistencia a compresión más baja. En la Figura 45 se representan los valores de resistencia a compresión de los hormigones fabricados con áridos reciclados como porcentaje del valor de resistencia a compresión del hormigón convencional.

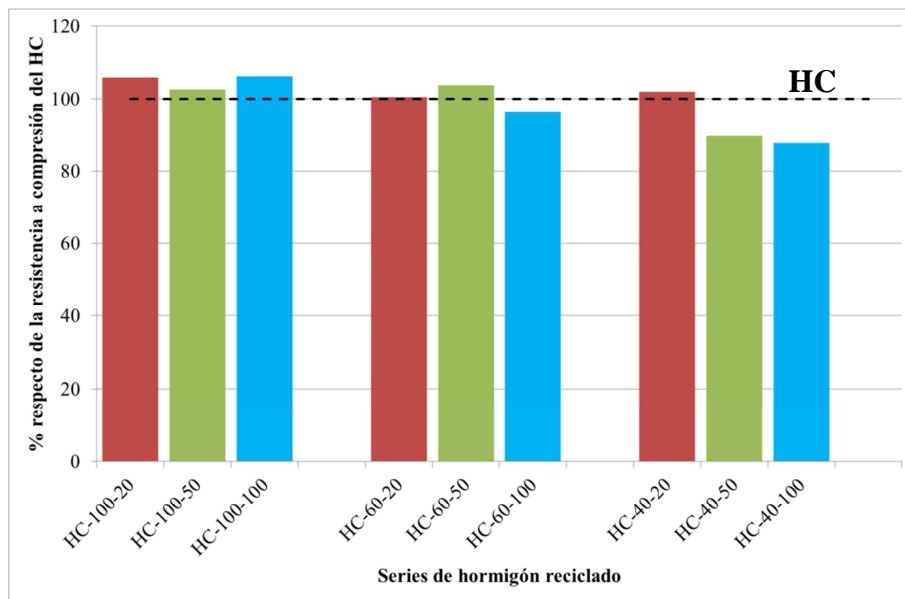


Figura 45. Resistencia a compresión de los diferentes hormigones reciclados, a los 28 días, expresada como porcentaje de la resistencia a compresión del hormigón convencional

En general, la resistencia a compresión disminuye con la calidad del árido reciclado [2,60] Los valores de resistencia alcanzados por los hormigones de la serie HR-60 sólo presentaron una disminución del 6% respecto de los valores obtenidos por el hormigón convencional. En cambio, las dosificaciones de la serie HR-40 presentaron los valores de resistencia más bajos, aunque en ningún caso se observaron disminuciones de resistencia superiores a un 11% respecto de la resistencia del hormigón convencional.

Por lo que respecta al análisis de los resultados en función del porcentaje de sustitución de árido natural por árido reciclado, en general se observa que la resistencia a compresión disminuye a medida que aumenta el porcentaje de sustitución [2, 54] Sin embargo, los hormigones HR-100-100 y HR-60-50 no siguieron esta tendencia. Esto podría deberse a que el mortero adherido a los áridos reciclados tiene una buena resistencia mecánica y se presenta en cantidades elevadas [58]. Todas las dosificaciones fabricadas con un porcentaje de sustitución del 20% alcanzaron resistencias superiores

a las del hormigón convencional. Cuando la relación de sustitución fue del 100%, se obtuvieron los valores de resistencia más bajos para la misma calidad de árido, a excepción de los hormigones de la serie HR-100, donde el hormigón con un porcentaje de reemplazo del 100% alcanzó el valor de resistencia más elevado.

Por otro lado, el hecho de que los hormigones de la serie HR-100 presentaran las resistencias más elevadas obedece al fenómeno descrito por Poon et al [56]. Este tipo de hormigones tienen un ratio a/c menor que el del hormigón convencional en la zona de transición interfacial (ITZ) debido a que los áridos reciclados tienen una capacidad de absorción más elevada que los áridos naturales, por lo tanto, la pasta de cemento tiene mayor calidad y la ITZ, lo que comporta obtener mayores valores de resistencia a compresión.

### 5.1.2 Resistencia a tracción indirecta

En la Tabla 12 se muestran los valores de resistencia a tracción del hormigón a los 28 días.

Tabla 12. Resistencia a tracción a los 28 días

Hormigones	Resistencia a tracción a los 28 días (MPa)
HC	6,36
HR-100-20	6,27
HR-100-50	5,46
HR-100-100	5,70
HR-60-20	6,14
HR-60-50	5,93
HR-60-100	5,15
HR-40-20	5,76
HR-40-50	5,04
HR-40-100	5,52

Todos los valores satisfacen el límite de 4,5MPa de resistencia media a la tracción indirecta a los 28 días establecido en las especificaciones técnicas de ADIF. Se observa que el hormigón que alcanzó la mayor resistencia a tracción fue el hormigón convencional. En la Figura 46 se representan los valores de resistencia a tracción de los hormigones fabricados con áridos reciclados como porcentaje del valor de la resistencia a tracción del hormigón convencional.

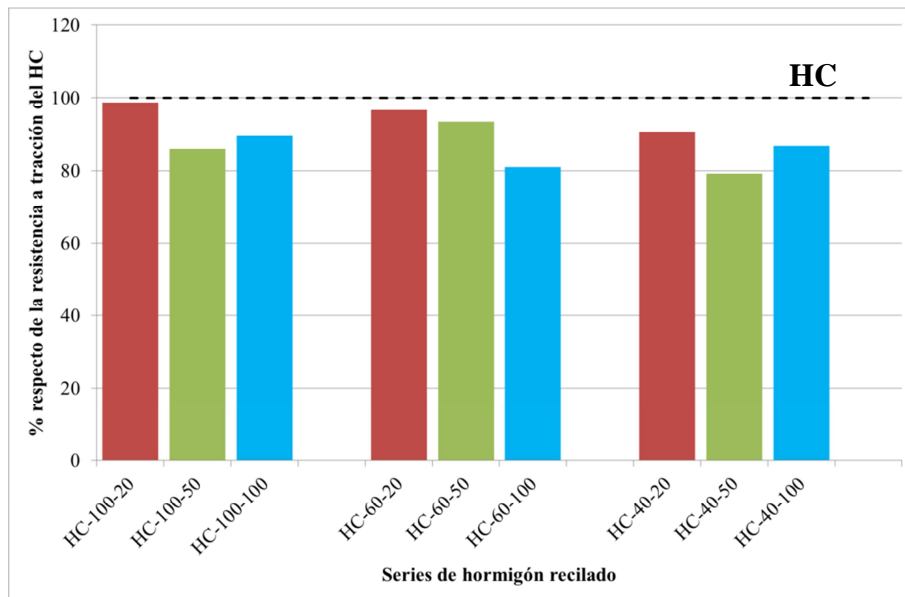


Figura 46. Resistencia a tracción de los diferentes hormigones reciclados, a los 28 días, expresada como porcentaje de la resistencia a tracción del hormigón convencional

La tendencia que se observa es que la resistencia a tracción disminuye con la calidad del árido reciclado. Este era el comportamiento esperado, ya que en otros estudios se observó el mismo comportamiento [2,11, 65]. Los hormigones de la serie HR-100 obtuvieron los mejores resultados para el mismo porcentaje de sustitución, a excepción del hormigón HR-100-50, que alcanzó una resistencia a tracción ligeramente inferior que la del hormigón HR-60-50.

En todos los casos, para la misma calidad de árido, la resistencia a tracción es inferior en los hormigones fabricados con un porcentaje de sustitución del 100% que en los hormigones fabricados con un porcentaje de reemplazo del 20%. Otros estudios también observaron una disminución de la resistencia a medida que aumentaba el porcentaje de sustitución [2, 57, 59, 63]. Sin embargo, esta tendencia no se cumple en las dosificaciones HR-100-50 y HR-40-50.

Todas las dosificaciones, excepto el hormigón HR-40-50, obtuvieron al menos un 80% de la resistencia a tracción del hormigón convencional. Sin embargo, en ningún caso se alcanzó el valor de la resistencia del hormigón convencional. Otros estudios [29,63] presentaron resultados similares.

### 5.1.3 Resistencia de adherencia (pull-out)

Durante la realización del ensayo se rompieron algunas probetas, por lo que los resultados se obtuvieron a partir de la media de los valores consistentes de cada una de las tres probetas que se ensayaron para cada dosificación. La cantidad de probetas que se rompieron aumentó significativamente con la disminución de la resistencia a compresión de los hormigones reciclados. La



ruptura se originó porque la resistencia del hormigón era menor que la resistencia de adherencia entre la barra y el hormigón. En la Tabla 13 se adjuntan los valores de resistencia de adherencia.

Tabla 13. Detalles del ensayo de Pull-out

Hormigones	Máxima resistencia de adherencia (MPa)	Máxima resistencia de adherencia (% respecto a HC)
HC	30.86	100
HR-100-20	29	93.98
HR-100-50	22.95	74.38
HR-100-100	35.36	114.58
HR-60-20	32.32	104.76
HR-60-50	19.89	64.45
HR-60-100	28.21	91.42
HR-40-20	20.13	65.25
HR-40-50	25.95	84.11
HR-40-100	25.94	84.08

Los resultados de la serie HR-100 se representan en la Figura 47. Se puede observar que el único hormigón que alcanzó una resistencia máxima superior a la del hormigón convencional fue el HR-100-100. El hormigón fabricado con un porcentaje de sustitución del 20% obtuvo unos valores máximos superiores al 90% de los del hormigón convencional. La dosificación HR-100-50 alcanzó los valores de resistencia más bajos, situándose un 33% por debajo de los valores obtenidos por el hormigón fabricado con un porcentaje de sustitución del 100%.

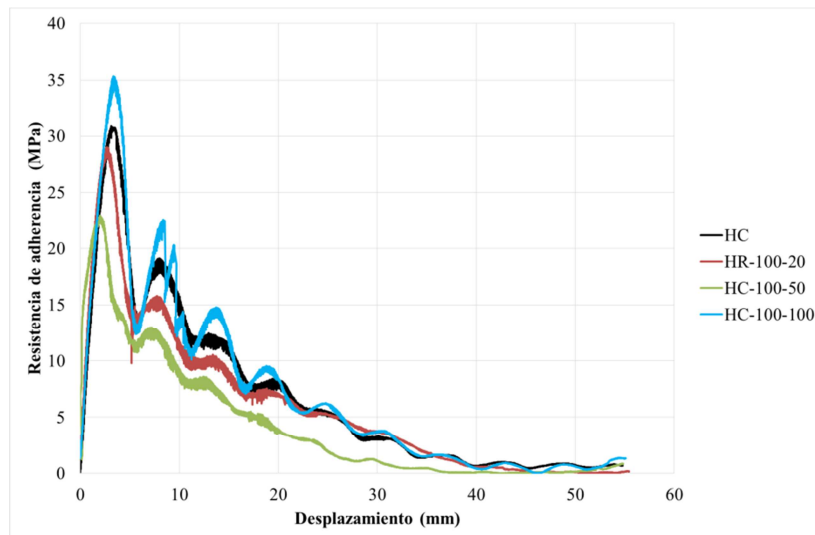


Figura 47. Resistencia de adherencia en función del desplazamiento de la barra para los hormigones de la serie HR-100

Por lo que respecta a la serie HR-60, los hormigones HC, HR-60-20 y HR-60-100 alcanzaron resistencias de adherencia similares, para un desplazamiento distinto, tal y como se representa en la Figura 48. El hormigón convencional fue el que presentó una rotura por adherencia inicial más tardía,

mientras que el hormigón HC-60-50 sólo alcanzó poco más de la mitad de la resistencia del hormigón convencional. Todos los hormigones de la serie HR-60 alcanzaron la resistencia máxima antes de un desplazamiento de barra superior a 1,5mm.

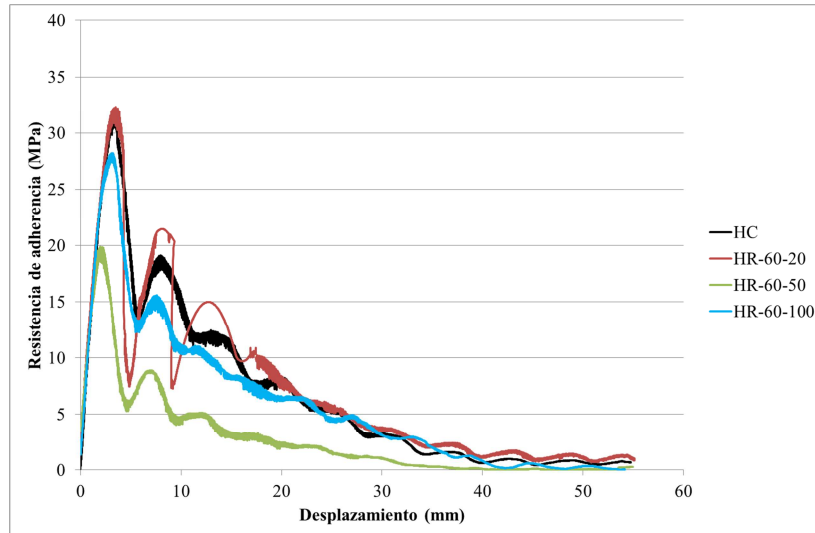


Figura 48. Resistencia de adherencia en función del desplazamiento de la barra para los hormigones de la serie HR-60

Los valores de resistencia obtenidos por los hormigones de la serie HR-40 se representan en la Figura 49. La dosificación HR-40-100 alcanzó una resistencia máxima superior a la del hormigón convencional, mientras que las dosificaciones HR-40-50 y HR-40-20 presentaron resistencias más bajas. La tendencia que se observa es que la resistencia de adherencia aumenta con el incremento del porcentaje de sustitución.

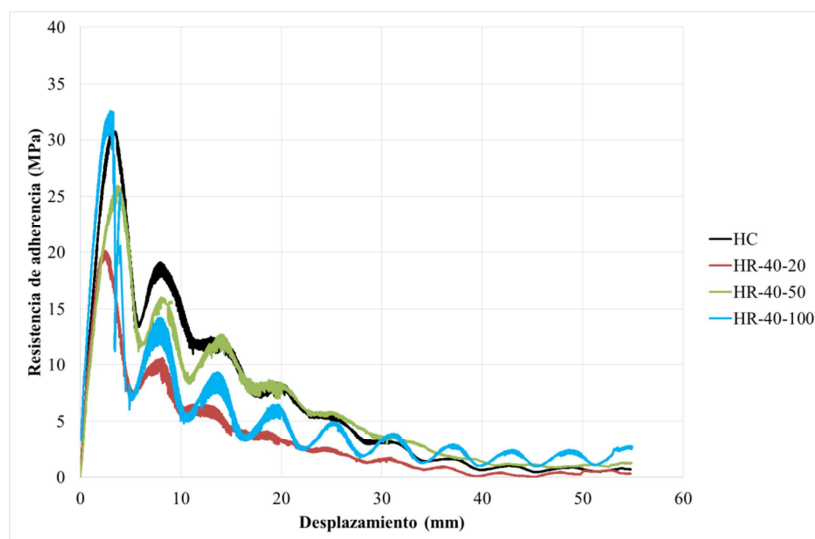


Figura 49. Resistencia de adherencia en función del desplazamiento de la barra para los hormigones de la serie HR-40

## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA FABRICADO CON ÁRIDOS RECICLADOS

Todos los hormigones reciclados alcanzaron al menos un 60% del valor de la resistencia de adherencia del hormigón convencional. Las dosificaciones HR-100-20 y HR-60-100 lograron valores del 90% de la resistencia del hormigón convencional, mientras que los únicos hormigones que obtuvieron resistencias superiores a las del HC fueron el HR-100-100 y el HR-60-20.

En general, se observa que la resistencia de adherencia disminuye con la calidad de los áridos reciclados. Sin embargo, no se observan tendencias claras relacionadas con el aumento del ratio de sustitución. Para la misma calidad de árido, los hormigones fabricados con un 100% de áridos reciclados alcanzaron resistencias de adherencia superiores al resto de hormigones con un porcentaje de reemplazo menor, a excepción de la serie HR-60, donde la resistencia alcanzada por el hormigón HR-60-20 fue ligeramente superior. Resultados parecidos fueron hallados por Xiao y Falkner [28].

En la Figura 50 se representa, para cada dosificación, la adherencia entre el acero y el hormigón en función de la resistencia a compresión. Se ha definido una línea de tendencia con un coeficiente de 0,96 (se debe considerar que los hormigones HR-100-50, HR-60-50 y HR-40-20, representados en rojo, han sido aislados). De todos modos, sería recomendable ensayar más probetas y analizar las medias correspondientes para asegurar esta relación.

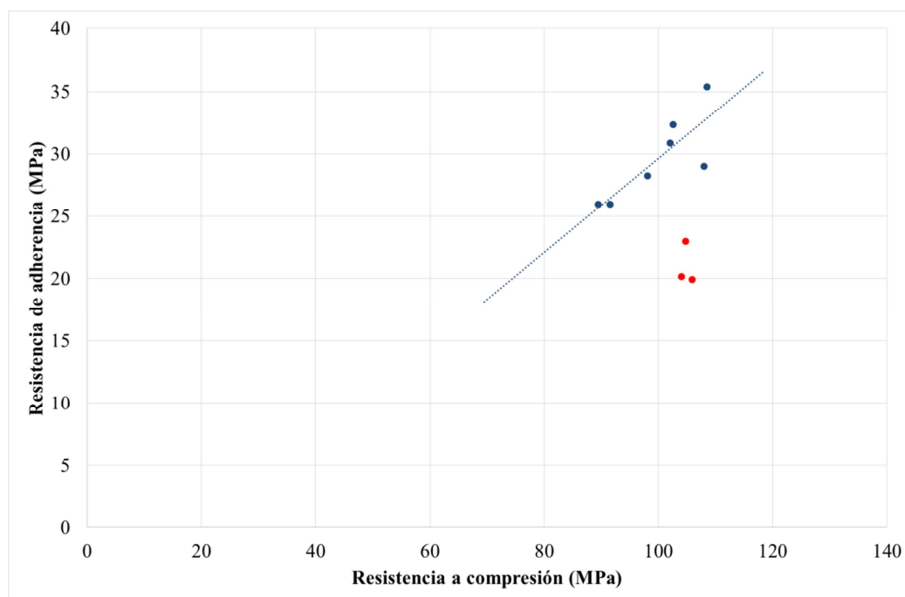


Figura 50. Relación entre la resistencia de adherencia y la resistencia a compresión

### 5.1.4 Retracción por secado

#### 5.1.5.1 Variación de longitud

En este subapartado se expresará la variación de longitud de la probeta en función del tiempo. Los resultados que se representan gráficamente son el promedio de las dos lecturas realizadas para cada una de las tres probetas. Todas las medias fueron consideradas porque no hubo ninguna que presentara dispersiones significativas.

En la Figura 51 se representan los resultados de la retracción por secado de las probetas de la serie HR-100. Como se puede observar, todas las dosificaciones de hormigón reciclado tuvieron mayor retracción que el hormigón convencional. Sin embargo, las cuatro series presentaron una evolución similar a lo largo del tiempo. El hormigón HR-100-100 fue el que alcanzó los valores de retracción más elevados.

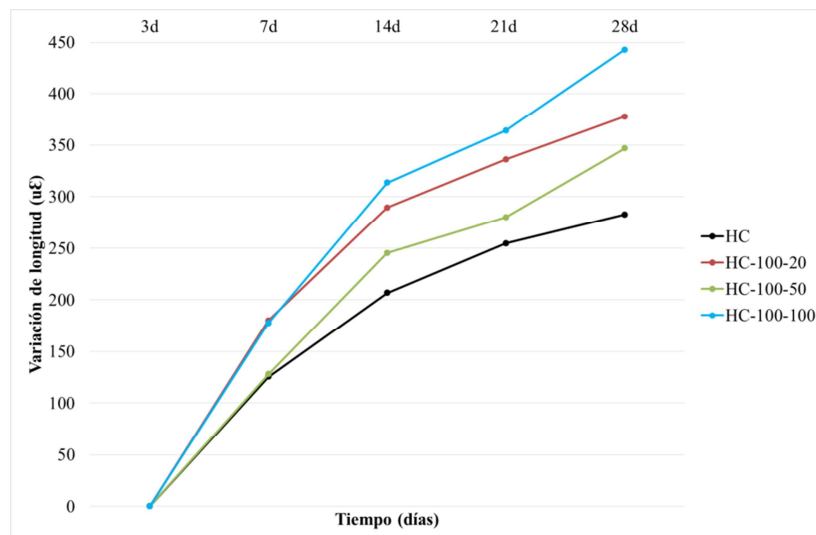


Figura 51. Variación de longitud en función del tiempo para los hormigones de la serie HR-100

Los hormigones de la serie HR-60 presentaron una evolución de la variación de longitud similar a las dosificaciones de la serie HR-100. Las dosificaciones con un porcentaje de sustitución mayor alcanzaron retracciones por secado más elevadas, tal y como se puede observar en la Figura 52. El agua de los áridos reciclados no compensó la pérdida de agua debida al secado, de modo que la retracción experimentada por los hormigones reciclados fue mayor que la del hormigón convencional.

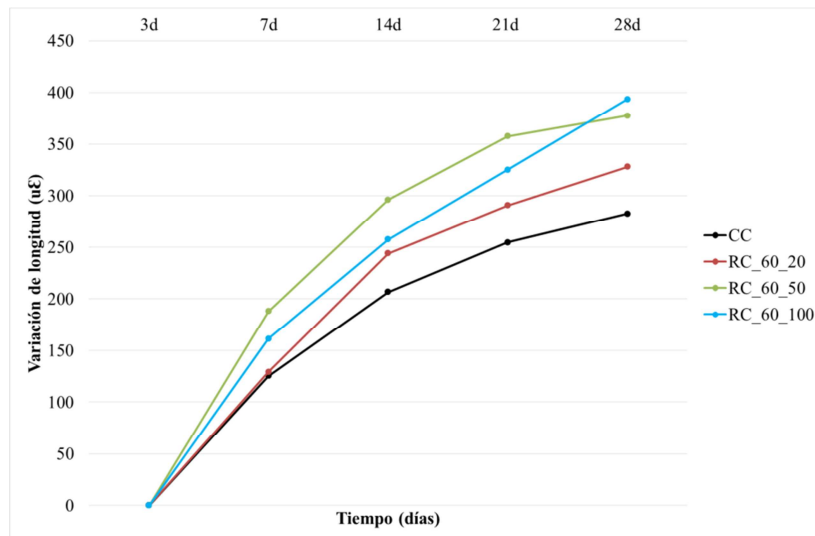


Figura 52. Variación de longitud en función del tiempo para los hormigones de la serie HR-60

Por lo que respecta a la retracción experimentada por los hormigones de la serie HR-40, se observa que los valores de retracción son similares a los del hormigón convencional (Figura 53). Por otro lado, todos los hormigones de la serie HR-40 experimentaron una evolución de la variación de longitud similar. Sin embargo, la retracción por secado fue menor a los 28 días en los hormigones reciclados que en el hormigón convencional, comportamiento especialmente notorio en el hormigón HR-40-50. Este fenómeno se explica partiendo de la base que los áridos reciclados actúan como almacenamiento de agua interno, de modo que el agua absorbida por los áridos reciclados durante el proceso de curado equilibró y compensó la pérdida de agua debida a la evaporación superficial.

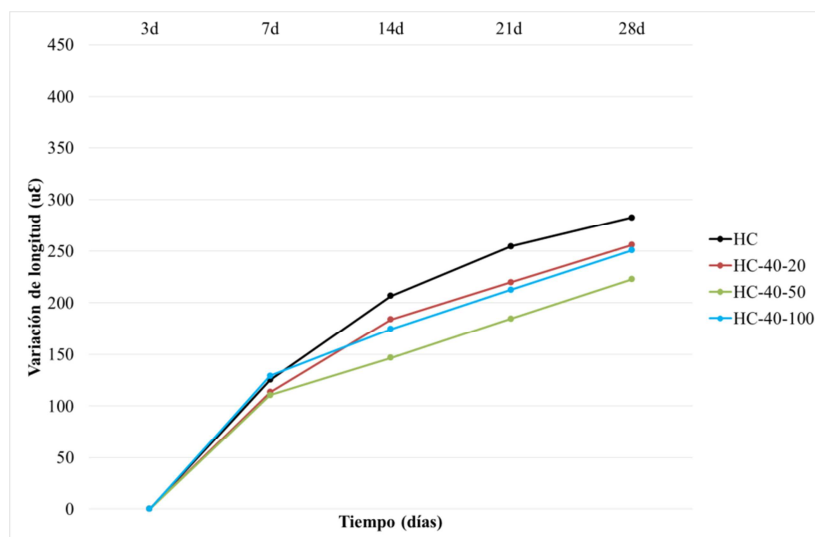


Figura 53. Variación de longitud en función del tiempo para los hormigones de la serie HR-40

### 5.1.5.2 Galgas embebidas

Los resultados obtenidos para este ensayo son la media de las lecturas proporcionadas por las galgas embebidas en el hormigón.

Tal y como se puede observar en los gráficos adjuntos (Figura 54), todas las series de hormigón reciclado presentan una tendencia similar a la del hormigón convencional. En cualquier caso, los hormigones que más se acercan a esa tendencia son el HR-100-50, el HR-60-50, el HR-40-50 y el HR-40-20. Los hormigones que experimentaron una retracción por secado ligeramente menor a la del hormigón convencional, a los 28 días, fueron el HR-60-50 y el HR-40-20.

Por otro lado, cuando la relación de sustitución se fijó en un 50%, la retracción por secado fue la más baja para cada una de las series. En general, la retracción disminuye con la calidad del árido, aunque esta tendencia no se cumple en la serie HR-60. Se observan algunas diferencias entre estos resultados y los obtenidos durante el registro manual de la variación de longitud.

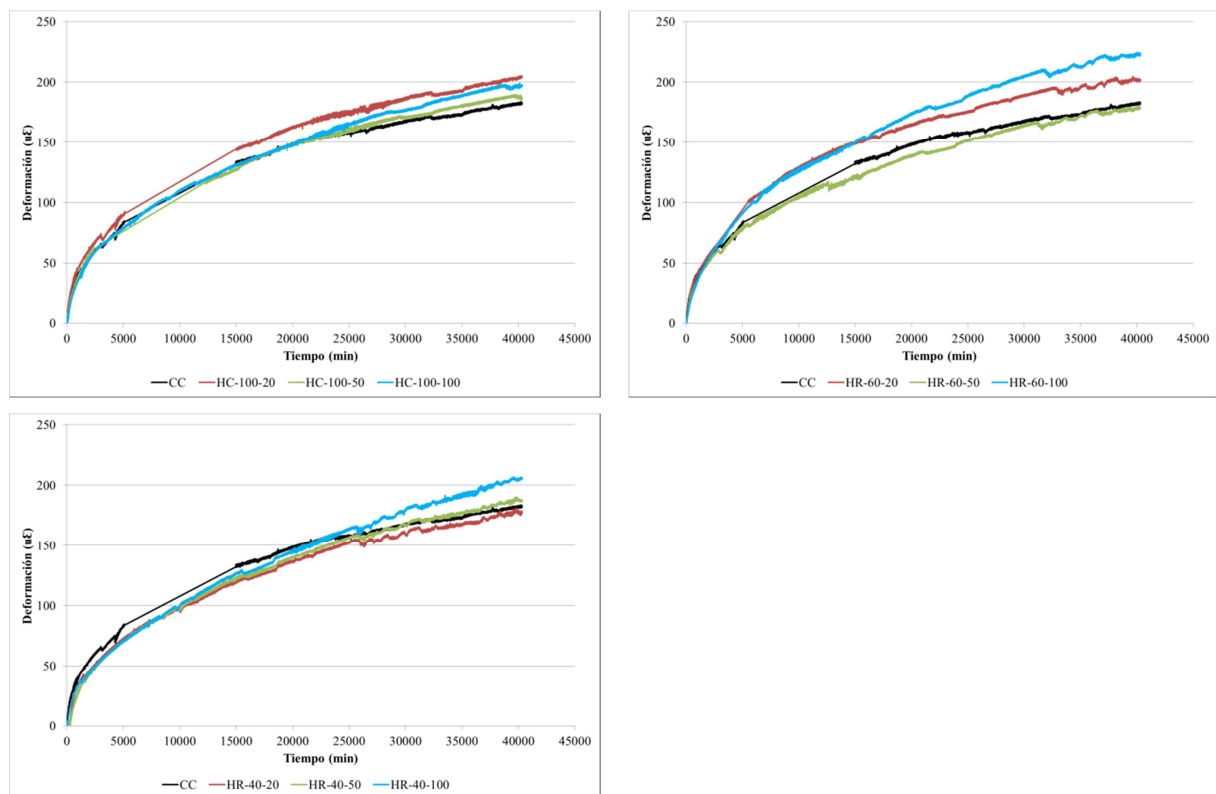


Figura 54. Retracción por secado en función del tiempo; a) HR-100 (superior-izquierdo); b) HR-60 (superior-derechos), c) HR-40 (inferior-izquierdo)

## 5.2 ENSAYOS DE LA TRAVIESA

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados en las traviesas. Las dosificaciones que se emplearon en la fase experimental fueron,

- Dosificación HC: Hormigón convencional
- Dosificación HR-100-100: Hormigón de la serie de 100MPa con un porcentaje de sustitución del 100%
- Dosificación HR-100-50: Hormigón de la serie de 100MPa con un porcentaje de sustitución del 50%

### 5.4.1 Ensayo flexión positiva en sección central

La condición que se debe satisfacer es,

○  $F_{c_r} > F_{c_0}$

Los valores de carga obtenidos se muestran en la Tabla 14,

Tabla 14. Resultados ensayo flexión positiva en sección central

	$F_{c_0}$	$F_{c_r}$	$F_{c_B}$
<b>Dosificación HC</b>	30	70	140
<b>Dosificación HR-100-50</b>	30	67	140
<b>Dosificación HR-100-100</b>	30	72	142

En todos los casos la carga que produce la primera fisura en el centro de la traviesa ( $F_{c_r}$ ) es superior a la carga de referencia inicial ( $F_{c_0}$ ), por lo que las tres dosificaciones satisfacen la condición especificada en la norma. Por otro lado, los resultados obtenidos para el hormigón convencional y el fabricado con un porcentaje de áridos reciclados del 100% presentan unos valores muy parecidos. Del mismo modo, el hormigón fabricado con porcentaje de sustitución de áridos naturales del 50% también presenta unos valores muy favorables. A su vez, estos resultados coinciden con los hallados en la resistencia a compresión a los 28 días, donde el hormigón HR-100-100 presenta unos valores muy similares a los del HR-100-50.

Todos los hormigones presentan resistencias ampliamente superiores a la prescrita, inclusive los hormigones reciclados. Esto se debe a la alta calidad del hormigón original del que se obtuvo el árido reciclado y la buena adherencia mortero-árido del árido reciclado.

En el gráfico adjunto (Figura 55), en el que se representan los valores registrados por las galgas extensiométricas colocadas en las armaduras de las traviesas, puede observarse como el pendiente en la zona elástica de los hormigones reciclados no difiere del hormigón convencional Sin embargo, las dosificaciones de hormigón reciclado mostraron límites elásticos inferiores a los del hormigón convencional, especialmente la dosificación del 50%. En la rama plástica las deformaciones de los hormigones reciclados fueron menores.

Por otro lado, se observa que tanto el hormigón convencional como el hormigón fabricado con un porcentaje de sustitución del 100% presentan una meseta de fluencia mayor que el hormigón fabricado con un porcentaje de reemplazo del 50%, lo que significa que estos hormigones se deforman bajo una tensión constante durante mayor tiempo.

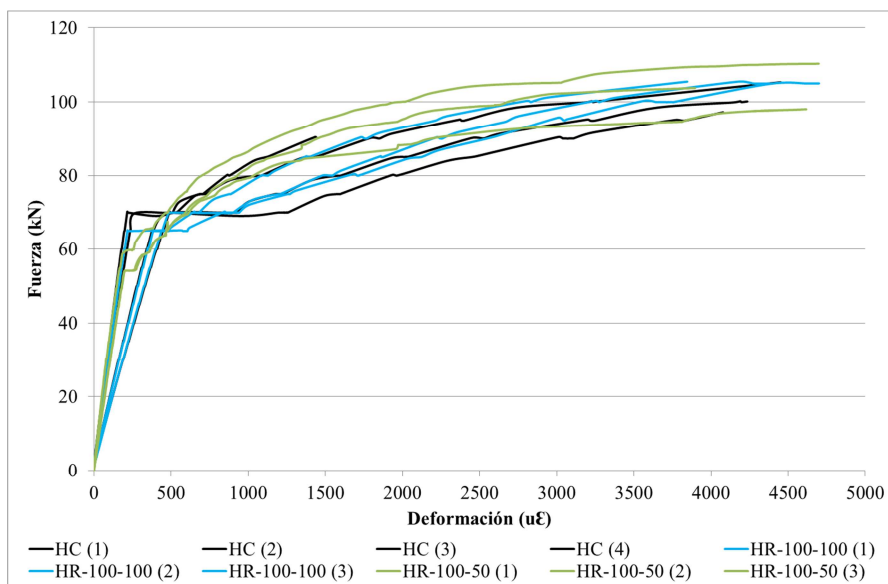


Figura 55. Gráfico fuerza-deformación medido por galgas extensiométricas en las barras de acero para el ensayo estático de flexión positiva en sección central

#### 5.4.2 Ensayo flexión negativa en sección central

Se debe satisfacer la siguiente condición para la validación del ensayo

○  $F_{c_r} > F_{c_0}$



En la Tabla 15 se muestran los valores de carga obtenidos

Tabla 15. Resultados ensayo flexión negativa en sección central

	$F_{c_0}$	$F_{c_r}$	$F_{c_B}$
<b>Dosificación HC</b>	42,5	42,5	112,5
<b>Dosificación HR-100-50</b>	42,5	51	111
<b>Dosificación HR-100-100</b>	42,5	42,5	116

El ensayo de flexión negativa en sección central fue el ensayo más crítico, ya que tan sólo algunas traviesas de la dosificación HR-100-50 superaron el valor de la fuerza de referencia inicial de 42,5kN. Todas las traviesas de HC o HR-100-100 fisuraron antes de superar la carga de referencia. Sin embargo, puede afirmarse que el uso de árido reciclado no propició ninguna disminución en la resistencia del hormigón reciclado respecto del convencional, por lo que cabe esperar que el incumplimiento de este ensayo se deba a criterios técnicos como el diseño de la traviesa.

Los resultados obtenidos a partir de los valores registrados por las galgas extensiométricas (Figura 56), muestran un comportamiento muy parecido al observado en el ensayo de flexión positiva en sección central. Todos los hormigones presentan un pendiente elástico similar, aunque tanto el hormigón HR-100-100 como el HR-100-50 empiezan a plastificar al alcanzar una carga menor que el hormigón convencional. El hormigón HR-100-50 es el que presenta una mayor meseta de fluencia. A diferencia que en el ensayo anterior, las deformaciones en estado plástico fueron inferiores en el hormigón convencional, aunque debe considerarse que el hormigón convencional es el que presenta una mayor dispersión en los resultados.

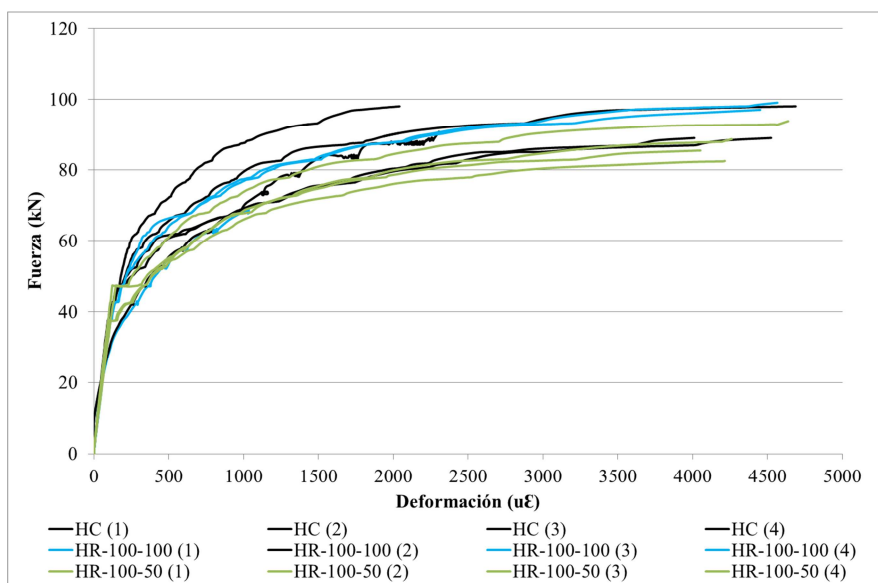


Figura 56. Gráfico fuerza-deformación medido por galgas extensiométricas en las barras de acero para el ensayo estático de flexión negativa en sección central

### 5.4.3 Ensayo flexión positiva en sección bajo carril

Las condiciones que se deben satisfacer son,

- $F_{r_t} > F_{r_0}$
- $F_{r_{0,05}} > K_{1s} \cdot F_{r_0} > 280,8 \text{ kN}$
- $F_{r_B} > K_{2s} \cdot F_{r_0} > 390 \text{ kN}$

Los valores de carga que se obtuvieron se muestran en la Tabla 16,

Tabla 16. Resultados ensayo flexión positiva en sección bajo carril

	$F_{r_0}$	$F_{r_t}$	$F_{r_{0,05}}$	$F_{r_B}$
<b>Dosificación HC</b>	156	221	396	486
<b>Dosificación HR-100-50</b>	156	226	381	460
<b>Dosificación HR-100-100</b>	156	219	385	451

Según se observa en la tabla, todos los valores cumplen los parámetros exigidos para este ensayo.

En todas las dosificaciones, la carga que produce la primera fisura en la fibra inferior de la sección bajo carril ( $F_{r_t}$ ) es superior a la carga de referencia inicial ( $F_{r_0}$ ). También se da la condición que la carga de rotura para la sección bajo carril ( $F_{r_B}$ ) es superior a 390kN, mientras que la carga que provoca una fisura remanente de 0,05mm de abertura en la fibra inferior de la sección bajo carril ( $F_{r_{0,05}}$ ) aparece una vez superados los 280,8kN.

En líneas generales, el hormigón convencional mostró un mejor comportamiento que los hormigones reciclados, ya que alcanzó valores superiores de carga por lo respecta a la aparición de una fisura remanente de 0.05mm y rotura. En este caso, la influencia del porcentaje de sustitución de árido natural por árido reciclado no siguió una tendencia definida. Los valores más altos con respecto a la aparición de la primera fisura y rotura se produjeron para el caso de HR-100-50, mientras que en relación con la aparición de una fisura remanente 0.05mm el hormigón HR-100-100 obtuvo valores de carga más altos.

En la Figura 57 se representa el comportamiento de las armaduras de acero. Puede observarse que los hormigones reciclados presentan pendientes y límites elásticos muy similares al registrado en el hormigón convencional. A pesar de que sólo se tiene registro de los primeros ciclos de carga del HR-100-100, puede observarse que los hormigones reciclados mostraron un mejor comportamiento ante la carga-descarga. Las deformaciones residuales en descarga fueron menores cuando se usó árido

reciclado. Sin embargo, las deformaciones en la rama plástica durante los primeros ciclos fueron inferiores para el hormigón convencional.

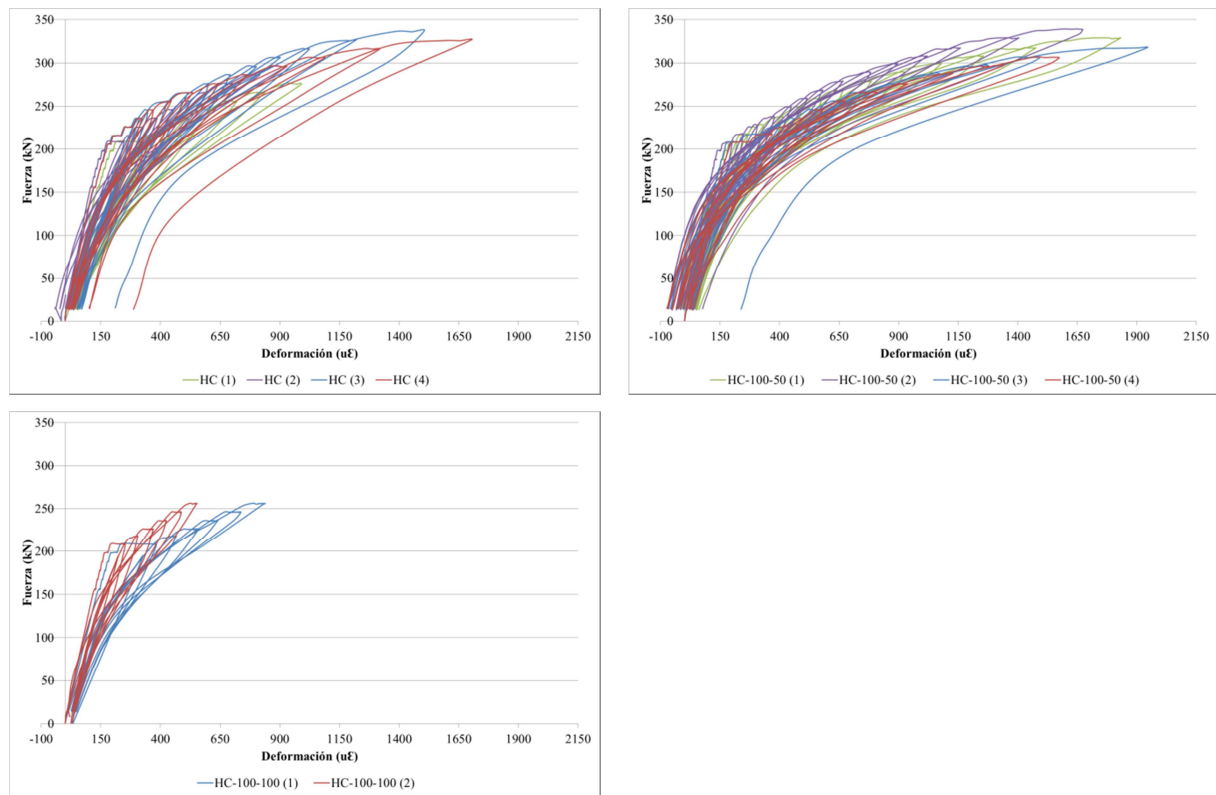


Figura 57. Gráficos fuerza-deformación medidos por galgas extensiométricas en las barras de acero para el ensayo estático flexión positiva en sección bajo carril; a) HC (superior-izquierdo); b) HR-100-50 (superior-derecho), c) HR-100-100 (inferior-izquierdo)

#### 5.4.4 Ensayo dinámico en sección bajo carril

Se deben cumplir las siguiente condiciones para la validación del ensayo,

- $Fr_{0,05} > K_{1d} \cdot Fr_0 > 234 \text{ kN}$
- $Fr_B > K_{2d} \cdot Fr_0 > 343,2 \text{ kN}$  o bien  $Fr_{0,5} > K_{2d} \cdot Fr_0 > 343,2 \text{ kN}$

Los valores de carga obtenidos se adjuntan en la Tabla 17.

Tabla 17. Resultados ensayo dinámico en sección bajo carril

	$Fr_0$	$Fr_r$	$Fr_{0,05}$	$Fr_B$
<b>Dosificación HR</b>	156	244	353	413
<b>Dosificación HR-100-50</b>	156	225	348	423
<b>Dosificación HR-100-100</b>	156	218	348	420

Tal y como se puede observar en la tabla, las tres dosificaciones satisfacen las especificaciones prescritas para este ensayo.

En todos los casos, la carga de ensayo que provoca una fisura remanente de 0,05 mm de abertura en la fibra inferior de la sección bajo carril ( $Fr_{0,05}$ ) aparece una vez superados los 234 kN, mientras que la carga de rotura para la sección bajo carril ( $Fr_B$ ) es superior a 343,2 kN.

La aparición de la primera fisura se dio para valores más altos de fuerza en el hormigón convencional, mientras que el hormigón HR-100-100 fisuró para valores de fuerza menores, por lo que existe una relación lineal entre la fuerza en la que aparece la primera fisura y el nivel de sustitución. Sin embargo, este comportamiento no se repite en la aparición de la fisura remanente de 0,05mm ni en la rotura del hormigón, puesto que en ambos casos los hormigones reciclados presentaron unos valores de fuerzas similares o superiores a los mostrados por el hormigón convencional.

#### 5.4.5 Ensayo de fatiga en sección bajo carril

Las condiciones que se deben satisfacer para validación de este ensayo son,

- Ancho de fisura  $\leq 0,1$  mm bajo la carga  $Fr_0$
- Anchura de la fisura  $\leq 0,05$  mm después de la descarga
- $Fr_B > K_{1s} \cdot Fr_0 > 390$  kN

En la Tabla 18 se adjuntan los valores de carga obtenidos,

Tabla 18. Resultados ensayo de fatiga en sección bajo carril

	$Fr_0$	$Fr_r$	$Fr_B$	Ancho fisura 0/156
<b>Dosificación HR</b>	156	206	486	OK
<b>Dosificación HR-100-50</b>	156	256	>506	OK
<b>Dosificación HR-100-100</b>	156	196	466	OK

Según se observa en la tabla, todos los valores satisfacen las especificaciones prescritas para el ensayo de fatiga, ya que en todos los casos el valor de la carga de rotura para la sección bajo carril es superior a 390 kN. Del mismo modo, se cumplen los dos requisitos relativos al tamaño de fisura, bajo carga de referencia y en descarga, para todas las dosificaciones.

Los valores máximos de fisuración y de rotura fueron obtenidos por la dosificación RAC-100-50, mientras que el hormigón convencional y el RAC-100-100 presentaron unos valores muy similares.

Del mismo modo que en los resultados del ensayo, los comportamientos registrados por las galgas extensiométricas colocadas en las barras de pretensado fueron muy similares entre el hormigón convencional y el hormigón con 100% de árido reciclado (Figura 58). Puede verse como el comportamiento de las traviesas es muy similar en las deformaciones máximas (bajo carga máxima) a partir de los 400000 ciclos. Sin embargo, en el registro de las deformaciones mínimas, el hormigón RAC-100-50 mostró una menor influencia a los ciclos de fatiga que el resto de hormigones, lo que pudo propiciar que la carga de rotura fuera mayor.

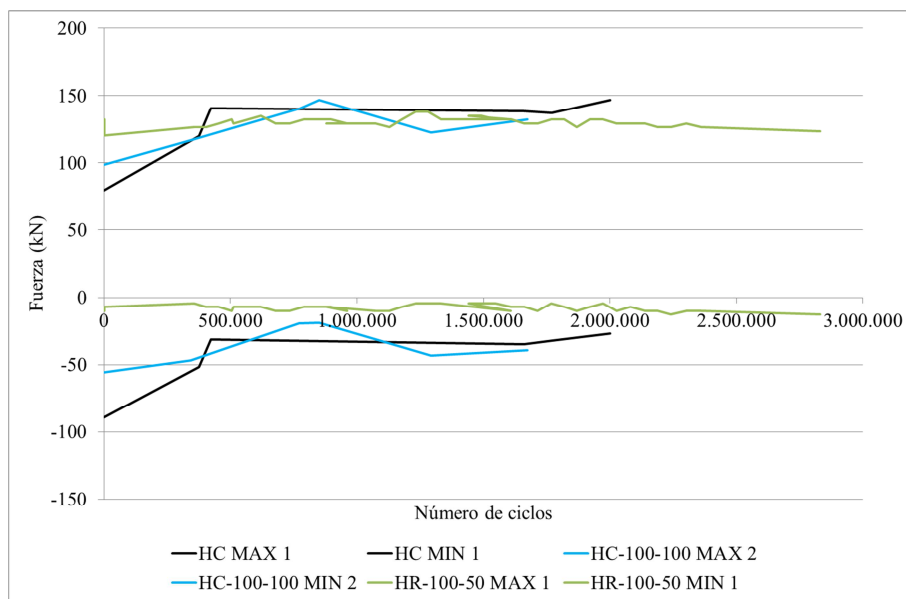


Figura 58. Gráfico de máximas y mínimas deformaciones en función del número de ciclos registrados por galgas extensiométricas en las barras de acero para el ensayo de fatiga en sección bajo carril positivo

## **6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

### **6.1 CONCLUSIONES**

#### **6.1.1 Hormigón endurecido**

##### **6.1.1.1 Resistencia a compresión**

Todos los hormigones reciclados presentaron una elevada resistencia a compresión, y en todos los casos los resultados obtenidos superaron el límite de 60MPa de resistencia mínima a compresión simple a los 28 días establecido en las especificaciones técnicas de ADIF. Los hormigones de la serie HR-100 obtuvieron las resistencias más elevadas, superando el valor de resistencia alcanzado por el hormigón convencional. Esto se debe principalmente a la alta calidad del árido reciclado. Sin embargo, otro factor que puede haber determinado este resultado es que los hormigones fabricados con áridos reciclados presentan una relación a/c menor que la del hormigón convencional en la zona de transición interfacial (ITZ), debido a la elevada capacidad de absorción de los áridos reciclados. Esto se traduce en una ITZ más resistente, lo que comporta obtener hormigones con valores de resistencia a compresión más elevados. En general, se observa que la resistencia disminuye a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de árido natural por árido reciclado, para una misma calidad de árido.

##### **6.1.1.2. Resistencia a tracción**

El hormigón convencional presentó un mejor comportamiento a la rotura por tracción que los hormigones reciclados. En cualquier caso, todos los hormigones fabricados con áridos reciclados presentaron valores de resistencia superiores a 4,50MPa, que es el valor de resistencia media a tracción indirecta a los 28 días requerido según las especificaciones técnicas de ADIF. Los resultados obtenidos permiten determinar una relación entre la calidad del árido reciclado y la resistencia del hormigón, observándose una mayor resistencia para una calidad de árido superior.

Sin embargo, no se advierte una tendencia clara entre la resistencia a tracción y el porcentaje de sustitución de árido natural por árido reciclado. Los únicos resultados que manifiestan un descenso de la resistencia en función del porcentaje de sustitución son los correspondientes a la serie HR-40.

### **6.1.1.3. Resistencia de adherencia**

El hormigón que alcanzó la resistencia más elevada fue el HR-100-100, mientras que la dosificación HR-60-20 presentó el valor de resistencia más bajo. Tanto la dosificación HR-100-100 como el hormigón HR- 60-50 obtuvieron una resistencia de adherencia más elevada que la del hormigón convencional. Esto podría deberse a que el módulo de elasticidad del árido reciclado es similar al de la pasta de cemento del hormigón reciclado.

Los resultados no permiten definir una tendencia entre la resistencia y el porcentaje de sustitución.

Cabe destacar que los resultados de este ensayo no se deben tomar como totalmente concluyentes, ya que durante la realización del ensayo algunas probetas se rompieron antes de que pudieran proporcionar datos útiles de la resistencia de adherencia, por lo que en algunos casos no se obtuvieron medias de los resultados. Por este motivo, sería recomendable repetir el ensayo y analizar los resultados para extraer unas conclusiones más verídicas.

### **6.1.1.4. Retracción por secado (variación de longitud)**

Los resultados del ensayo concluyeron que los hormigones fabricados con áridos reciclados de menor calidad experimentaron una retracción por secado menor en comparación con el resto de hormigones reciclados. Este fenómeno es debido a que los áridos de menor calidad tienen una capacidad de absorción más elevada (la absorción aumenta a medida que decrece la calidad del árido), por lo que el agua absorbida por los áridos reciclados durante el proceso de curado (actuaron como almacenamiento de agua interno) compensó la pérdida de agua debida a la retracción por secado, generándose una influencia positiva en la retracción.

Las retracciones de las dosificaciones de la serie HR-60 fueron menores que las observadas en la serie HR-100, obedeciendo al mismo fenómeno anteriormente descrito. En este caso, la capacidad de absorción de los áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón de resistencia característica de 100MPa no pudo compensar la pérdida de agua debida a la retracción por secado.

En general, se observó que la retracción por secado aumentaba a medida que el porcentaje de sustitución se incrementaba.

#### **6.1.1.5. Retracción por secado (galgas embebidas)**

Todos los hormigones reciclados presentaron una evolución similar a la del hormigón convencional. En líneas generales, el hormigón convencional es el que obtuvo los mejores resultados.

### **6.1.2 Traviesas**

#### **6.1.2.1 Ensayo flexión positiva en sección central**

Todas las dosificaciones presentaron resistencias ampliamente superiores a la prescrita. El hormigón HR-100-100 presentó la carga de rotura más elevada, mientras que la dosificación HR-100-50 alcanzó la misma carga de rotura que el hormigón convencional. Estos buenos resultados se atribuyen a la elevada calidad del árido reciclado. Los datos proporcionados por las galgas extensiométricas indican que los pendientes de los hormigones reciclados en la zona elástica fueron muy similares a los del hormigón convencional. Sin embargo, presentaron un límite elástico inferior. En la rama plástica, las diferencias entre los distintos hormigones no fueron superiores a las propias diferencias observadas entre distintas traviesas de una misma dosificación.

#### **6.1.2.2 Ensayo flexión negativa en sección central**

Los resultados de este ensayo no cumplieron los requisitos de la norma, ya que en la mayoría de casos la aparición de la primera fisura coincidió con la carga de referencia inicial. Sin embargo, el uso de áridos reciclados no propició ninguna disminución de la resistencia en comparación con el hormigón convencional, por lo que cabe esperar que los resultados obtenidos respondan a criterios técnicos de diseño de la traviesa. Los datos registrados por las galgas extensiométricas presentaron unos valores muy similares a los del apartado anterior.

#### **6.1.2.3 Ensayo flexión positiva en sección bajo carril**

Todos los hormigones alcanzaron resistencias superiores a las establecidas en la normativa ADIF. En general, el hormigón convencional presentó un mejor comportamiento, ya que alcanzó valores de carga más elevados para la aparición de una fisura remanente de 0,05mm y para la rotura. La aparición de la primera fisura se dio para un valor de carga más elevado en la dosificación HR-100-50. Los resultados indican, de un modo general, que los valores de carga disminuyen con la calidad del árido reciclado. Sin embargo, todos los hormigones presentaron unos resultados muy satisfactorios. Los



datos obtenidos a partir de las lecturas de las galgas extensiométricas revelaron un mejor comportamiento por lo que respecta a las deformaciones residuales producto de la carga-descarga.

#### **6.1.2.4 Ensayo dinámico en sección bajo carril**

El hormigón convencional es el que presentó los valores de carga más elevados, aunque todas las dosificaciones satisficieron las condiciones requeridas para el uso en traviesas. Se observa que los valores de carga decrecen a medida que la calidad del árido disminuye.

#### **6.1.2.5 Ensayo de fatiga en sección bajo carril**

Los resultados manifestaron que la dosificación HR-100-50 obtuvo los mejores resultados, aunque todos los hormigones cumplen los requisitos establecidos en la normativa. Los datos proporcionados por las galgas extensiométricas indicaron una mayor similitud entre el hormigón convencional y el hormigón HR-100-100. El comportamiento de las traviesas en las deformaciones máximas fue muy similar, mientras que el hormigón HR-100-50 presentó una menor influencia a los ciclos de fatiga que en las deformaciones mínimas, lo que comportó que el valor de carga de rotura de esta dosificación fuera más elevado.

## **6.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

En términos relativos a la presente tesina, sería conveniente que estudios posteriores centraran sus investigaciones en el estudio de las propiedades diferidas del hormigón reciclado como la resistencia de adherencia, ya que todavía se desconocen muchos aspectos relativos a su comportamiento. Sin embargo, se trata de una de las propiedades más importantes que pueden determinar de un modo claro y conciso si los áridos reciclados pueden emplearse en la fabricación de hormigón estructural.

Por lo que respecta a las traviesas fabricadas con hormigón reciclado, una línea de investigación interesante podría ser el análisis de su comportamiento frente a ciclos hielo-deshielo, ya que son elementos que en algunos casos se ven expuestos a temperaturas inferiores a 0°C. La incorporación de cenizas volantes y humo de sílice podrían mejorar sus propiedades de durabilidad, como se extrae de los estudios realizados hasta la fecha y comentados en el estado del arte del presente estudio.

## **7. REFERENCIAS**

- [1]. Ch. Hendriks, A. A. Nijkerk, A.E. van Koppen. *The Building Cycle*. Best, Netherlands: Aeneas, (2000).
- [2] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, M. Barra. *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete*. Cement and Concrete Research, nº 37 (2007).
- [3] M, Martin-Morales, M. Zamorano, A. Ruiz-Moyano, I. Valverde-Espinosa. *Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08*. Construction and Building Materials (2010).
- [4] Ministerio de Fomento. *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*. BOE, nº 203 Suplemento, pp. 1-304 (2008).
- [5] M. Sánchez de Juan, P. Alaejos, V.L. Galdes. *Conclusiones sobre reciclado de residuos de construcción y demolición como áridos para hormigones no estructurales*. Ihobe (2010).
- [6] L. Evangelista, J. de Brito. *Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates*. Cement and Concrete composites (2009).
- [7] M. Sánchez de Juan. *Estudio sobre la utilización de árido reciclado en hormigón estructural*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid (2005).
- [8] M. Etxeberria. *Experimental study on Microstructure and structural behavior of recycled aggregate concrete*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [9] M. Sánchez de Juan, P. Alaejos. *Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate*. Construction and Building Materials, nº 23, pp. 872-877 (2009).
- [10] B. González. *Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante*. Tesis doctoral. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica A Coruña (2002).
- [11] M. Barra. *Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón estructural*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya (1996).
- [12] M. Sánchez de Juan. *Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid (2005).

- [13] M. Sanchez, P. Alaejos. *Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate*. Construction and Building Materials, n° 23 (2009).
- [15] W.Y.V. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam. *Micro-structural analysis of recycled aggregate concrete produced from two stage mixing approach*. Cement and Concrete Research 35 (6). Hong-Kong (2005).
- [16] A. Abdelgadir, F. Gholamreza, O. Burkan, F. Benoit, F. Simon. *Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method*. Cement and Concrete Composites, 31 (8), pp. 555-563 (2009).
- [17] Q. Liu, J. Xiao, Z. Sun. *Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete*. Cement and Concrete Research, 41 (10), pp. 1050-1057 (2011).
- [18] K. Rahal. *Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate*. Building and Environment, 42 (1), pp. 407-415 (2005).
- [19] L. Butler, J.S. West, S.L Tighe. *The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement*. Cement and Concrete Research, 41 (10), pp. 1037-1049 (2011).
- [20] S. C. Kou, C. S. Poon, H. W. Wan. *Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregate*. Construction and Building Materials n°36, pp.881-889 (2012).
- [21] S.W. Tabsh, A.S.Abdelfatah. *Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete*. Construction and Building Materials, 23 (2), pp. 1163-1167 (2008).
- [22] A. Domingo, C. Lázaro, F.L. Gayarre, M.A. Serrano, C. López-Colina. *Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete*. (2009).
- [23] M. Gomes, J. de Brito. *Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance*. Materials and Structures, 42 (5), pp. 663-675 (2008).
- [24] T.Y. Tu, Y.Y. Chen, C.L. Hwang. *Properties of HPC with recycled aggregates*. Cement and Concrete Research, 36(5), 943-950 (2006).
- [25] N. Ho, Y. Lee, W. Lim, T. Zayed, K. Chew, G. Low, S. Ting. *Efficient Utilization of Recycled concrete Aggregate in Structural Concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, 25 (3), pp. 318-327 (2013).
- [26] R.K. Dhir, K.A. Paine, J. de Brito, M. Etxeberria, N.Y. Ho, C.S. Poon, V.W.Y Tam. *Use of recycled and secondary aggregates in concrete: an overview*. New Developments in Concrete Construction. Mumbai (2011).

- [27] S. Seara-Paz, B. González-Fonteboa, J. Eiras-López, M. F. Herrador. *Bond behavior between steel reinforcement and recycled concrete*. Material and structures (2013).
- [28] J. Xiao, H. Falkner. *Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars*. Construction and Building Materials, nº 21, pp. 395-401 (2007).
- [29] S.C. Kou, C.S. Poon, M. Etxeberria. *Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete*. Cement and Concrete Composites, nº 33, pp. 286-291 (2011).
- [30] J.M.V. Gómez-Soberón. *Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. An experimental study*. Cement and Concrete Research, nº 32, pp. 1301-1211 (2002).
- [31] W.H. Khan, M. Ramli, K.J. Kan, M.Z. Sulieman. *Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties*. Construction and Building Materials, 26(1), pp. 565-573 (2012).
- [32] F.T. Olorunsago, N. Padayaoche. *Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes*. Cement and Concrete Research, nº 32, pp 179-185 (2002).
- [33] Y.N. Ghan, G.F. Peng, M. Anson. *Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures*. Cement and Concrete Composites, nº 23-27 (1999).
- [34] D. Dollimore, J.D. Gupta, S. Lerdkanhanaporn, S. Nippani. *A thermal analysis study of recycled portland cement concrete aggregates*. Thermochemica Acta, nº 357-358, pp. 31-40 (2000).
- [35] S.C. Kou, C.S. Poon, D. Chan. *Influence of flyash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete*. Materials and Structures, 41 (7), pp. 1191-1201 (2008).
- [36] A. Buck. *Recycled concrete as a source of aggregate*. ACI journal, 74 (5), pp. 212-219 (1997).
- [37] Y. Kasai, M. Ksake, K. Yanagi. *Durability of concrete using recycled coarse aggregate*. Demolition and Reuse of Concrete and Masonry nº 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete Masonry, pp. 623-632 (1988).
- [38] A. Richardson, K. Coventry, J. Bacon. *Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete*. Journal of Cleaner Production, pp. 272-277 (2011).

- [39] A. Gokce, S. Nagataki, T. Seaki, M. Hisada. *Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete*. Cement Concrete Recycl, n° 37, pp. 23-27 (2002).
- [40] Ch. Hendriks, A. A. Nijkerk, A.E. van Koppen. *The Building Cycle*. Best, Netherlands: Aeneas, (2000).
- [41] D. KwokKaiYuen. *Durability properties of recycled aggregate concrete*. Department of Civil and Structural Engineering. International Community for Composites Engineering. Denver, Colorado (2000).
- [42] H.W. Song, S.J. Kwon. *Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure*. Cement and Concrete Research, 37(6), pp. 909-915 (2007).
- [43] S.C. Kou, C.S Poon. *Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregates*. Construction and Building Materials, n° 35, pp. 69-76 (2012).
- [44] M.C. Limbachiya, T. Leelawat, R.K. Dhir. *RCA Concrete: A study on properties in the fresh state, strength development and durability. Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction*. Ed. Dhir, Henderson y Limbachia, pp. 227-238 (1998)
- [45] D.J. Anstice, C.L. Page, M.M. Page. *The pore solution phase of carbonated pastes*. Cement and Concrete Research (2005).
- [46] K.D. Stanish, R.D. Hooton, M.D.A. Thomas. *Testing the chloride penetrations resistance of concrete: A literature review*. Department of Civil Engineering University of Toronto (1997).
- [47] A. Bentur, S. Diamond, N.S. Berke. *Steel corrosion in concrete*. Modern Concrete Technology, 24-32 (1997).
- [48] A. Domingo-Cabo, C. Lázaro, F. López-Gayarre, M.A. Serrano-López, P. Serna, J.O. Castaño-Tabares. *Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials 23, pp. 2545-2553 (2009).
- [49] N. G. Cuervo. *Tendencias en el diseño de vías de alta velocidad*. Tesina UPC (2003).
- [50] Anglo American Corporation. *Monolithic concretes sleepers for underground use* (1995).
- [51] Government of India. Ministry of Railway. *Indian Railway Standard Specification for Pre-tensioned prestressed concrete Sleepers*. Cuarta revisión (2011).
- [52] Standards Australia International. *Railway track material. Part 14: Prestressed concrete sleepers*. Sydney (2003).

- [53] ADIF. *Especificación técnica. Traviesas monobloque de hormigón pretensado*. Cuarta edición (2009).
- [54] M. Barra, E. Vázquez. *Properties of concrete with recycled aggregates: influence of properties of the aggregates and their interpretation*. Proceeding of the International Symposium on Sustainable Construction: Use of recycled concrete aggregate, London, pp. 19-30 (1998).
- [55] A. González , M. Etxeberria. *Experimental analysis of high performance recycled aggregate concrete properties* (2012). *Construction and Building Materials*, n° 52, pp. 227-235 (2014).
- [56] C. S. Poon, Z. H. Shui, L. Lam. *Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates* n° 18, pp. 461-468 (2004).
- [57] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí. *Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete*. *Magazine of Concete Research*, n°. 10 (2006).
- [58] C. S. Poon, Z. H. Shui, L. Lam, H. Fok, S.-C. Kou. *Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete*. *Cement and Concrete Research*, n°. 34, pp. 31-36 (2004).
- [59] W. B. Fuller, S. E. Thompson. *The laws of proportioning concrete*. *Transaction ASCE*, n° 59, pp. 67-143 (1907).
- [60] AENOR. Norma Española UNE-EN 12390-3. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probeta* (2009).
- [61] UNE 83-306-85. *Ensayos de hormigón: rotura por tracción indirecta: ensayo brasileño*. IRANOR(1985).
- [62] AENOR. Norma Española UNE-EN 10080. Anejo D. *Ensayo de adherencia para el acero corrugado o grafilado para armaduras de hormigón armado. Ensayo de arrancamiento*.
- [63] A. Ajdukiewicz, A. Kliszczewicz. *Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC*. *Cement and Concrete Composites*, n° 24 (2002).
- [64] ADIF. *Especificación técnica. Traviesas monobloque de hormigón pretensado*. Cuarta edición (2009).
- [65] R. K. Dhir, K. A. Paine, J. de Brito, M. Etxeberria, N. Y. Ho, C. S. Poon, V. W. Tam. *Use of recycled and secondary aggregates in concrete: an overview*. Delhi (2011).

[66] J. Xiao, W. Li, Y. Fah, X. Huang. *An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011)*. Construction and Building Materials, nº 31, pp. 364-383 (2012).