



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Departament de Construccions Arquitectòniques II
Departament d'Enginyeria de la Construcció

**“REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO
DE HORMIGÓN CON CAUCHO PROCEDENTE DE
NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)”**



AUTORES: Barra Bizinotto, Marilda
Jordana Riba, Francesc
Royano García, Verónica
Vázquez Ramonich, Enric

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR D'EDIFICACIÓ DE BARCELONA

(EPSEB)

Octubre de 2009

PRÓLOGO

El consumo de neumáticos en los países desarrollados es elevado y va en aumento. Los propietarios y usuarios de vehículos, por el hecho de circular con los mismos, somos los responsables del desgaste de los neumáticos que acaban quedando fuera de uso y convirtiéndose en residuo. En la Unión Europea se generaron durante el 2005 cerca de tres millones de toneladas de neumáticos fuera de uso (NFU).

Hasta la implantación de una legislación específica, una vez concluida la rodadura de un neumáticos, sólo un limitado porcentaje se reciclaba y empleaba como materia prima para otras aplicaciones, mientras que el resto se eliminaba en vertederos o simplemente se acumulaba sin ningún tipo de control, donde además de provocar un efecto visual negativo, se producía un riesgo medioambiental derivado de un posible incendio.

La Directiva Europea 1999/31/CE [7] relativa al vertido de residuos regula esta acumulación incontrolada de NFU en vertederos, y determina que a partir del 16 de Julio de 2003, no se admitirán en ningún vertedero los neumáticos usados enteros, y a partir del 16 de Julio de 2006, ni siquiera los neumáticos usados troceados, con exclusión de los neumáticos de bicicleta y de los neumáticos cuyo diámetro sea superior a 140 cm.

El Real Decreto 1619/2005 [12] sobre la gestión de neumáticos fuera de uso establece además el principio de responsabilidad del productor, por el cual se hace responsable a los fabricantes e importadores de neumáticos de la correcta gestión de los NFU que se generan en los talleres, una vez se ha agotado cualquier posibilidad de reutilización para el fin por el que fueron fabricados. A su vez, recae sobre el consumidor el coste del correcto reciclaje de los NFU, ya que en el precio de compra de los neumáticos se incluyen las tasas correspondientes a su gestión.

Para que el ciclo de vida del neumático sea considerado como un modelo de desarrollo sostenible, es necesario fomentar el aprovechamiento del potencial material o energético del mismo tras su vida útil. Los NFU se pueden valorizar con aplicaciones diferentes, que van desde su reutilización tras el recauchutado, hasta la valoración energética o la obtención de caucho pulverizado o granulado para fabricar diferentes productos, como por ejemplo: suelas para la industria del calzado, alfombrillas de automóviles, aplicaciones en betunes asfálticos para carreteras, fabricación de pavimentos elásticos de aplicación en suelos de zonas de recreo infantil, pistas de atletismo, campos de fútbol con césped artificial, etc. Sin embargo, estas soluciones no suponen una alternativa efectiva al importante volumen de neumáticos generados por nuestra sociedad.

De la necesidad de buscar nuevas aplicaciones para este voluminoso residuo, surge la idea de utilizar partículas obtenidas mediante trituración mecánica en los hormigones, sustituyendo parte de los áridos convencionales. Sería interesante que además de eliminar parte de los NFU generados, éstos aportasen alguna mejora en las propiedades del hormigón.

Desde hace poco más de dos décadas se está investigando la viabilidad del hormigón de cemento portland con adición de caucho procedente de NFU. Diversos autores confirmaron mediante ensayos de laboratorio que las mezclas de hormigón con caucho presentan una disminución de la resistencia a compresión, sin embargo, tienen un mayor potencial para deformarse plásticamente antes de la ruptura. Para obtener hormigones de resistencias aceptables, recomiendan que la fracción de caucho incorporada en la mezcla no exceda el 20 % del volumen total de los áridos.

El objetivo de este estudio experimental es determinar la influencia de la incorporación de diferentes porcentajes de partículas de caucho (5, 10 y 15% del volumen de los áridos convencionales) en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón. Para ello, se han elaborado diferentes hormigones utilizando dos tamaños de partículas de NFU: 1-4 mm (NFU-F) y 10-16 mm (NFU-G).

ÍNDICE

1. MÉTODO EXPERIMENTAL	7
1.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	7
1.1.1 ÁRIDOS	7
1.1.4 CAUCHO	11
1.1.5 CEMENTO	13
1.1.6 AGUA	13
1.1.7 ADITIVO	13
1.2 METODOLOGÍA DE FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS	14
1.2.1 DOSIFICACIÓN	14
1.2.2 PREPARACIÓN DE LOS ÁRIDOS	16
1.2.3 PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA MEZCLA	17
1.2.4 PREPARACIÓN DE LOS MOLDES	18
1.2.5 VERTIDO Y COMPACTACIÓN DEL HORMIGÓN	19
1.2.6 CURADO INICIAL DEL HORMIGÓN	20
1.2.7 DESMOLDADO DE LAS PROBETAS	21
1.2.8 CONSERVACIÓN DE LAS PROBETAS - CURADO EN CÁMARA HÚMEDA	22
1.3 NOMENCLATURA DE LAS PROBETAS	23
2. ENSAYOS REALIZADOS	25
2.1 CONSISTENCIA	25
2.1.1 INTRODUCCIÓN	25
2.1.2 EQUIPOS UTILIZADOS	25
2.1.3 PROCESO DE ELABORACIÓN	26
2.1.4 RESULTADOS OBTENIDOS	28
2.2 ABSORCIÓN CAPILAR	29
2.2.1 INTRODUCCIÓN	29
2.2.3 PROCESO DE ELABORACIÓN	30
2.2.4 RESULTADOS OBTENIDOS	32
2.3 DENSIDAD, ABSORCIÓN Y POROSIDAD	34
2.3.1 INTRODUCCIÓN	34
2.3.3 PROCESO DE ELABORACIÓN	35
2.3.4 RESULTADOS OBTENIDOS	37

2.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN	40
2.4.1 INTRODUCCIÓN	40
2.4.3 PROCESO DE ELABORACIÓN	41
2.4.4 RESULTADOS OBTENIDOS	44
2.5 RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA.....	46
2.5.1 INTRODUCCIÓN	46
2.5.3 PROCESO DE ELABORACIÓN	46
2.5.4 RESULTADOS OBTENIDOS	48
2.6 MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	52
2.6.1 INTRODUCCIÓN	52
2.6.3 PROCESO DE ELABORACIÓN	53
2.6.4 RESULTADOS OBTENIDOS	56
2.7 COMPORTAMIENTO AL FUEGO	57
2.7.1 INTRODUCCIÓN	57
2.7.3 PROCESO DE ELABORACIÓN	60
2.7.4 RESULTADOS OBTENIDOS	63
2.8 MICROESTRUCTURA	68
3. CONCLUSIONES.....	71
4. BIBLIOGRAFIA	73
4.1 LIBROS.....	73
4.2 LEGISLACIÓN.....	73
4.3 ARTÍCULOS	75
4.4 PROYECTOS FIN DE CARRERA Y TESISAS	75
4.5 PÁGINAS WEB.....	76

1. MÉTODO EXPERIMENTAL

1.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Los materiales utilizados para la elaboración de hormigón con NFU han sido: áridos, partículas de caucho, cemento, agua y aditivos. A continuación se describen más detalladamente las características físicas de cada material detallando su origen, densidad, absorción y fracción granulométrica.

1.1.1 ÁRIDOS

Lejos de pensar que los áridos son simplemente materiales de relleno para el hormigón, debemos dedicarle especial atención ya que éstos forman prácticamente el 75% del hormigón y son capaces de disminuir el coste por unidad de volumen de hormigón, así como aumentar la resistencia y disminuir las retracciones del hormigón. Para obtener un hormigón estable y económico se debe añadir la mayor cantidad posible de áridos y con el mayor tamaño compatible con los demás requisitos que deba cumplir la mezcla.

Los áridos deben ser materiales granulares limpios e inertes capaces de contribuir a la estabilidad física y química del hormigón, ya que éstas van a influir de forma notable en sus propiedades. Así mismo, los áridos no deben ser activos frente a la pasta de cemento.

Los áridos utilizados en este estudio son de naturaleza caliza y procedente de machaqueo, y han sido clasificados según el tamaño de las partículas que lo componen con el siguiente criterio: arena, gravilla y grava (ordenadas de menor a mayor tamaño).

Manuel Fernández Cánovas [2] destaca que los áridos machacados dan hormigones con mayores resistencias a flexotracción y abrasión que los rodados, siendo, por tanto, muy adecuados para pavimentos. Cabe destacar también, que estos áridos dan lugar a hormigones más cerrados y resistentes física y químicamente.

1.1.1.1 ARENA

La arena utilizada tiene una densidad seca de $2,652 \text{ g/cm}^3$, una absorción del 2,7 % y presenta el aspecto que se muestra en la *Fotografía 1.1*.

La caracterización granulométrica queda reflejada en la *Tabla 1.1* y en el *Gráfico 1.1*, en donde se indica el porcentaje de las fracciones de la arena que pasan por los distintos tamices.

Tabla 1.1: Granulometría arena.

Tamiz (mm)	% que pasa
32	100,0
25	100,0
20	100,0
16	100,0
10	100,0
8	100,0
4	99,8
2	89,4
1	52,7
0,5	32,3
0,25	20,7
0,125	14,4
0,063	11,4



Fotografía 1.1: Muestra de arena.

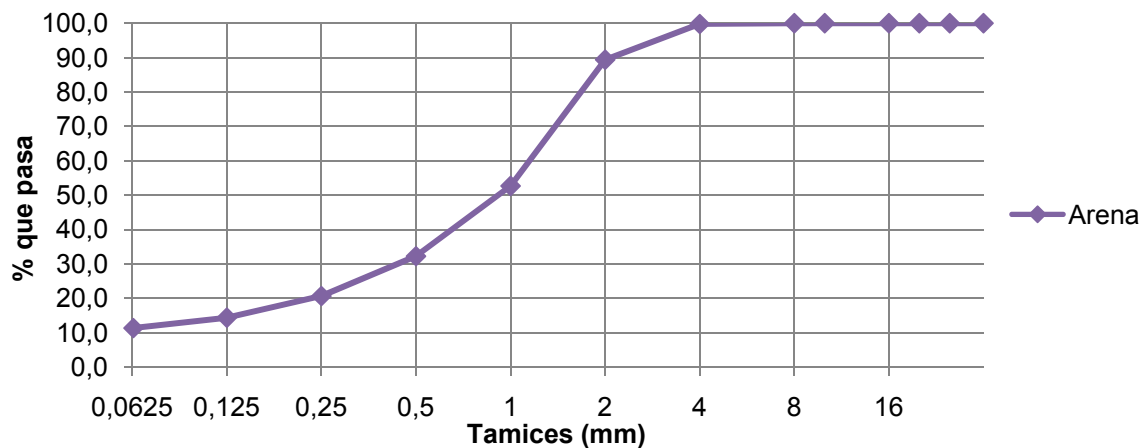


Gráfico 1.1: Curva granulométrica de la arena.

1.1.1.2 GRAVILLA

La gravilla utilizada tiene una densidad seca de $2,547 \text{ g/cm}^3$, una absorción del 1,88 % y presenta el aspecto que se muestra en la *Fotografía 1.2*.

La caracterización granulométrica queda reflejada en la *Tabla 1.2* y en el *Gráfico 1.2*. en donde se indica el porcentaje de las fracciones de la gravilla que pasan por los distintos tamices.

Tabla 1.2: Granulometría gravilla.

Tamiz (mm)	% que pasa
32	100,0
25	100,0
20	100,0
16	100,0
10	87,0
8	79,0
4	48,0
2	31,0
1	20,0
0,5	14,0
0,25	8,0
0,125	4,0
0,063	0,0



Fotografía 1.2: Muestra de gravilla.

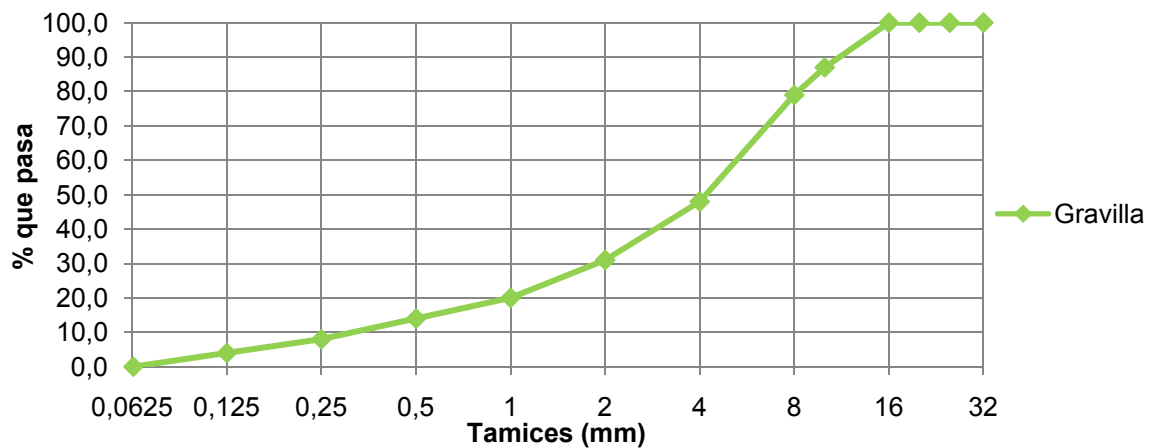


Gráfico 1.2: Curva granulométrica de la gravilla.

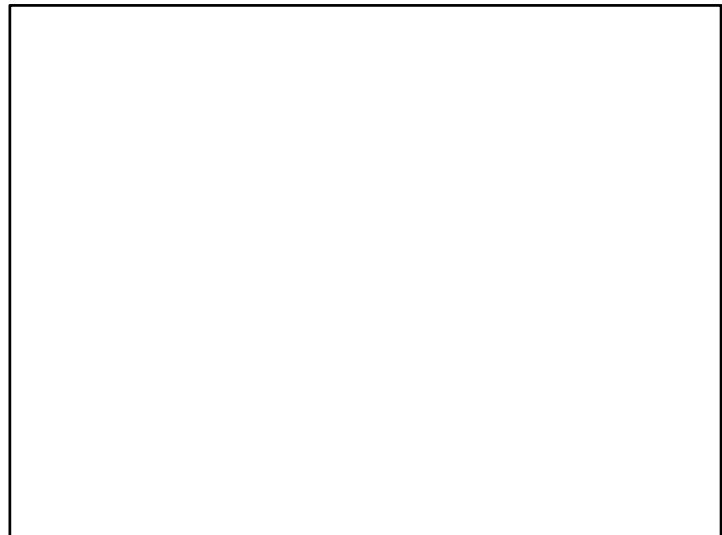
1.1.1.3 GRAVA

La grava utilizada tiene una densidad seca de $2,610 \text{ g/cm}^3$, una absorción del $1,42 \%$ y presenta el aspecto que se muestra en la *Fotografía 1.3*.

La caracterización granulométrica queda reflejada en la *Tabla 1.3* y en el *Gráfico 1.3*, en donde se indica el porcentaje de las fracciones de la grava que pasan por los distintos tamices.

Tabla 1.3: Granulometría grava.

Tamiz (mm)	% que pasa
32	100,0
25	100,0
20	95,8
16	61,2
10	8,7
8	4,3
4	2,1
2	2,1
1	2,1
0,5	0,0
0,25	0,0
0,125	0,0
0,063	0,0



Fotografía 1.3: Muestra de grava.

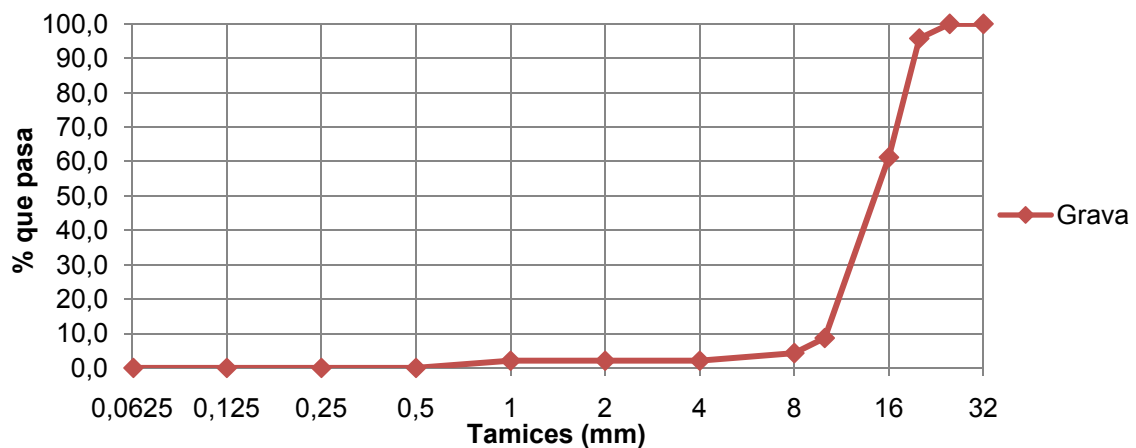


Gráfico 1.3: Curva granulométrica de la grava.

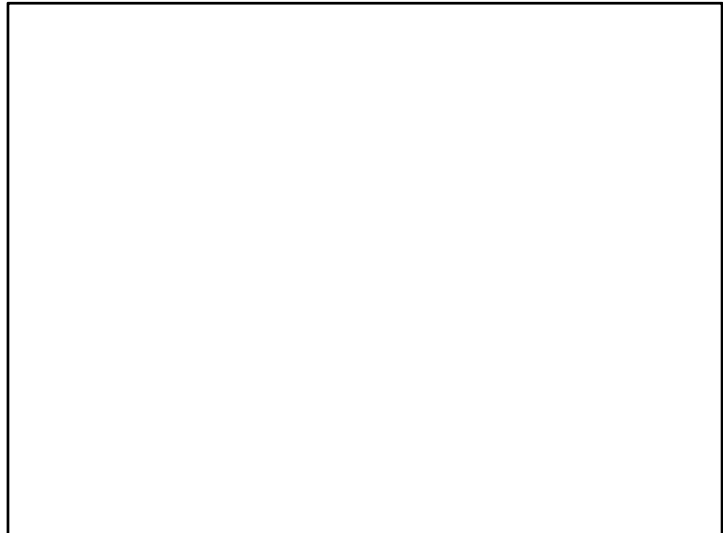
1.1.4 CAUCHO

El caucho de grano fino utilizado es del tipo SBR con un tamaño de 1-4 mm proveniente de neumáticos fuera de uso y obtenido mediante trituración mecánica, y presenta el aspecto que se muestra en la *Fotografía 1.4*.

La caracterización granulométrica queda reflejada en la *Tabla 1.4* y en el *Gráfico 1.4*, en donde se indica el porcentaje de las fracciones del caucho fino que pasan por los distintos tamices.

Tabla 1.4: Granulometría NFU-F.

Tamiz (mm)	% que pasa
32	100,0
25	100,0
20	100,0
16	100,0
10	100,0
8	100,0
4	94,3
2	1,1
1	0,0
0,5	0,0
0,25	0,0
0,125	0,0
0,063	0,0



Fotografía 1.4: Muestra de NFU-F.

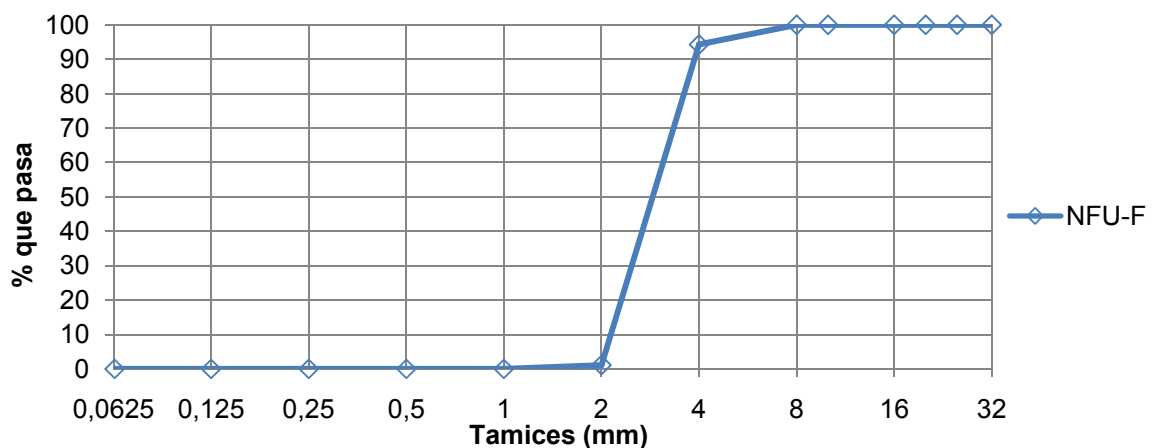


Gráfico 1.4: Curva granulométrica del NFU-F.

El caucho de grano grueso utilizado es del tipo SBR con un tamaño de 10-16 mm procedente de neumáticos fuera de uso y obtenido mediante trituración mecánica, y presenta el aspecto que se muestra en la *Fotografía 1.5*.

La caracterización granulométrica queda reflejada en la *Tabla 1.5* y en el *Gráfico 1.5*, en donde se indica el porcentaje de las fracciones del caucho grueso que pasan por los distintos tamices.

Tabla 1.5: Granulometría NFU-G.

Tamiz (mm)	% que pasa
32	100
25	100
20	100
16	100
10	0,0
8	0,0
4	0,0
2	0,0
1	0,0
0,5	0,0
0,25	0,0
0,125	0,0
0,063	0,0



Fotografía 1.5: Muestra de NFU-G.

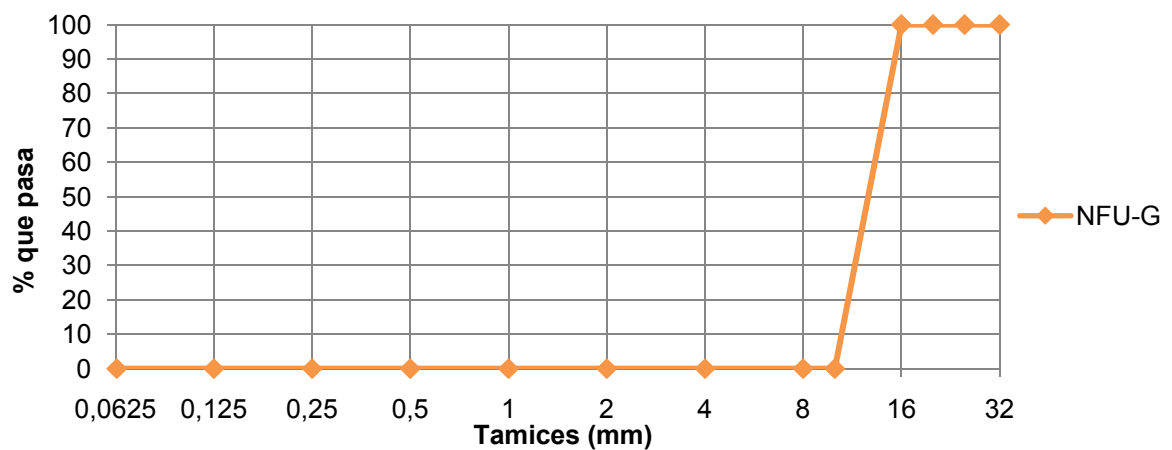


Gráfico 1.5: Curva granulométrica del NFU-G.

1.1.5 CEMENTO

El cemento es un conglomerante hidráulico formado por materiales que reaccionan con el agua proporcionando un producto sólido resistente y estable.

En este estudio se ha utilizado un cemento portland CEM II (*Fotografía 1.6*) con una resistencia inicial normal de 42,5 N/mm² de acuerdo a la Instrucción para la recepción de cementos RC-97 [13].



Fotografía 1.6: Muestra de cemento portland.

1.1.6 AGUA

La misión principal del agua de amasado es la de hidratar los componentes activos del cemento a la vez que hace posible que la masa fresca de hormigón sea trabajable.

De acuerdo a la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) [8] el agua utilizada para la fabricación del hormigón debe ser limpia y libre de un contenido de impurezas tal que pueda producir alteraciones en la hidratación del cemento, retrasos en su fraguado y endurecimiento, reducciones en sus resistencias, ni peligros en su durabilidad. Así mismo, las aguas adecuadas para el amasado lo son también para el curado.

Para la fabricación y el curado de los distintos hormigones ensayados se ha utilizado agua de la red de abastecimiento general.

1.1.7 ADITIVO

Con el objetivo principal de mejorar la trabajabilidad del hormigón, se ha añadido aditivo SIKAMENT 500 HE superplastificante exento de cloruros en una proporción del 0,7 % respecto a la masa del cemento. Éste se caracteriza por aportar altas resistencias iniciales y disminuir la segregación y exudación del hormigón.

1.2 METODOLOGÍA DE FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

1.2.1 DOSIFICACIÓN

Para poder llevar a cabo el método experimental, se hizo una aproximación del volumen de cada hormigón necesario para realizar los diferentes ensayos. Se calcularon los volúmenes de las probetas y se multiplicaron por el número de probetas necesarias para cada ensayo. De este modo se supo que para cada tipo de hormigón había que fabricar 19,35 litros, por tanto, las dosificaciones se calcularon para amasadas de 24 litros.

A la hora de determinar una dosificación para el hormigón de referencia, se ha optado por utilizar una dosificación dada por una casa comercial para un hormigón H25 de endurecimiento normal y una relación agua/cemento de 0,65.

La dosificación del hormigón de referencia queda detallada en la *Tabla 1.6*:

Tabla 1.6: Dosificación HS/C (referencia).

Componente	Peso/m ³	Peso/amasada
cemento	275,00 Kg	6,60 Kg
agua	133,42 Kg	3,202 Kg
arena	837,33 Kg	20,096 Kg
grava	755,42 Kg	18,13 Kg
gravilla	230,00 Kg	5,52 Kg
aditivo	1566,67 gr	37,60 gr
caucho	-	-

En este proyecto se han comparado las características físicas y mecánicas entre un hormigón de referencia convencional y hormigones con NFU. Para poder llevar a cabo el método experimental se han diseñado seis mezclas de hormigón con adición de caucho a partir de una dosificación estándar para un hormigón de referencia sin alterar la relación agua/cemento.

Para la confección de los hormigones con NFU fino, se ha sustituido el 5%, 10% y 15% del volumen de la arena del hormigón de referencia por caucho. La designación de estos hormigones es H5%-NFU-F, H10%-NFU-F y H15%-NFU-F, respectivamente.

Siguiendo el mismo criterio, en la elaboración de los hormigones con NFU grueso, se han utilizado los mismos porcentajes, pero en este caso, se ha sustituido el volumen de la grava por partículas de caucho, obteniendo los hormigones H5%-NFU-G, H10%-NFU-G y H15%-NFU-G.

Es importante destacar que en la dosificación de estos seis hormigones con caucho se ha mantenido constante, variando únicamente la cantidad de NFU introducida.

En el caso del H5%-NFU-F se le ha restado el 5% al peso total de la arena:

$$837,33 \text{ Kg} \times 0,05 = 41,87 \text{ Kg}$$

$$837,33 \text{ Kg} - 41,87 \text{ Kg} = 795,46 \text{ Kg (peso final de la arena)}$$

Para poder calcular el volumen de arena sustituido se ha considerado que la densidad de la arena era $2,65 \text{ gr/m}^3$ y que la del caucho era 1 gr/m^3 :

$$\text{Densidad (D)} = \text{Peso (P)} / \text{Volumen (V)}$$

$$2,65 \text{ gr/m}^3 = 41870 \text{ gr} / V; V = 15800 \text{ m}^3$$

15,8 Kg de caucho sustituyen a 41,87 Kg de arena

En la *Tabla 1.7* se describen las distintas dosificaciones de los hormigones con NFU:

Tabla 1.7: Nomenclatura de las probetas.

Mezclas	Cemento [Kg/m ³]	Áridos convencionales [Kg/m ³]			Partículas caucho [Kg/m ³]		Agua [Kg/m ³]	Aditivo [g/m ³]
		Arena (1-4mm)	Gravilla (4-10mm)	Grava (10-16mm)	Fino (1-4mm)	Grueso (10-16mm)		
S/C	275	837	230	755	-	-	133	1567
5%-NFU-F	275	795	230	755	16	-	133	1567
10%-NFU-F	275	754	230	755	32	-	133	1567
15%-NFU-F	275	712	230	755	47	-	133	1567
5%-NFU-G	275	837	230	718	-	16	133	1567
10%-NFU-G	275	837	230	680	-	32	133	1567
15%-NFU-G	275	837	230	642	-	47	133	1567

1.2.2 PREPARACIÓN DE LOS ÁRIDOS

Debido a la gran demanda de utilización del laboratorio, ha sido imposible conservar los áridos en su interior durante todo el proceso de hormigonado, quedando de este modo desprotegidos de la intemperie y de los agentes atmosféricos.

Para corregir las posibles alteraciones de humedad en los áridos, se realizaba el siguiente proceso: 16 horas antes de hormigonar, se almacenaban todos los áridos necesarios para su fabricación (véase *Fotografía 1.7*) y se separaba una muestra representativa de la arena, grava y gravilla. Seguidamente, se pesaban las muestras y se colocaban en la estufa a una temperatura comprendida entre 105 y 110 °C. Instantes antes de fabricar el hormigón, se sacaban las muestras de la estufa y se volvían a pesar.

El porcentaje de humedad que contenían los áridos se determinaba a partir de la siguiente expresión:

$$H = ((Ph - Ps) / Ps) \cdot 100$$

Siendo: H el porcentaje de humedad contenido en los áridos;
Ph el peso húmedo del árido de la muestra;
Ps el peso seco del árido de la muestra.

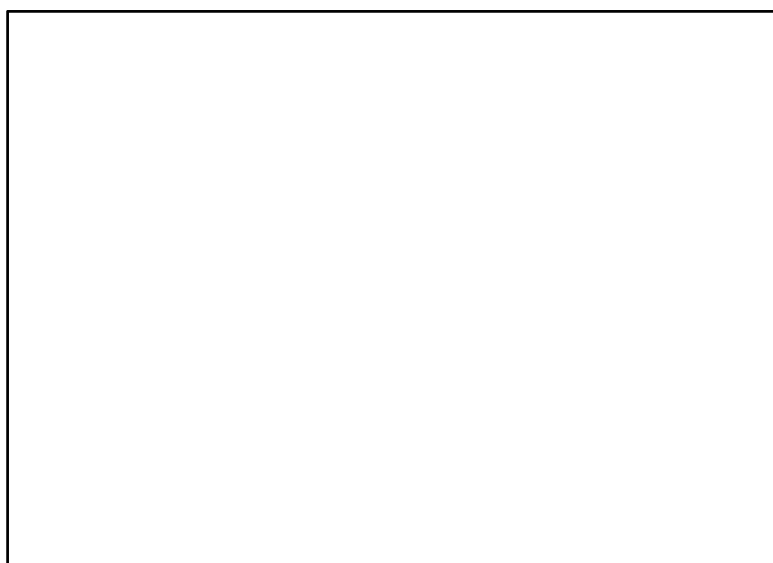
A continuación, se incrementaba este porcentaje de humedad al peso seco del árido definido en la dosificación, de la siguiente forma:

$$Pw = Pd ((100 + H) / 100)$$

Siendo: Pw el peso húmedo del árido dosificado;
Pd el peso seco del árido dosificado.

La diferencia entre el peso húmedo y el peso seco correspondía al contenido de agua, y dicha cantidad se restaba al peso del agua dosificada.

$$\Delta H_2O = Pw - Pd$$



Fotografía 1.7: Áridos almacenados dentro del laboratorio para hormigonar.

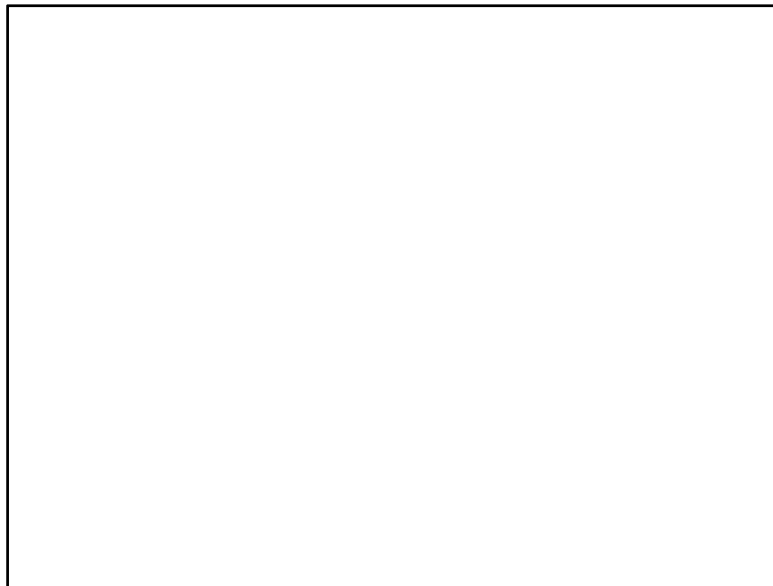
1.2.3 PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA MEZCLA

Una vez pesados todos los componentes, se procedió a su mezcla. Para su fabricación se ha utilizado una hormigonera de eje vertical y con capacidad para 42 litros, de la marca Collomatic modelo 90/2 K-3 tal y como muestra la *Fotografía 1.8*. En primer lugar se puso aproximadamente $\frac{3}{4}$ del peso total del agua y todo el cemento, y se dejó amasar hasta conseguir una mezcla homogénea.

A continuación se añadió la arena, la gravilla, la grava y el resto del agua. Dependiendo de la dosificación se añadió el caucho justo después de la arena o de la grava, según su granulometría, ya que siempre se ha seguido la secuencia de más fino a más grueso. El NFU fino se incorporó después de la arena, y el NFU grueso justo después de la grava.

Mientras se acaban de mezclar todos los componentes del hormigón, se vertió el aditivo superplastificante y se dejó amasar durante 2 minutos aproximadamente.

Antes de verter el hormigón en los moldes se mezcló la masa manualmente con una paleta para comprobar la homogeneidad de la mezcla.



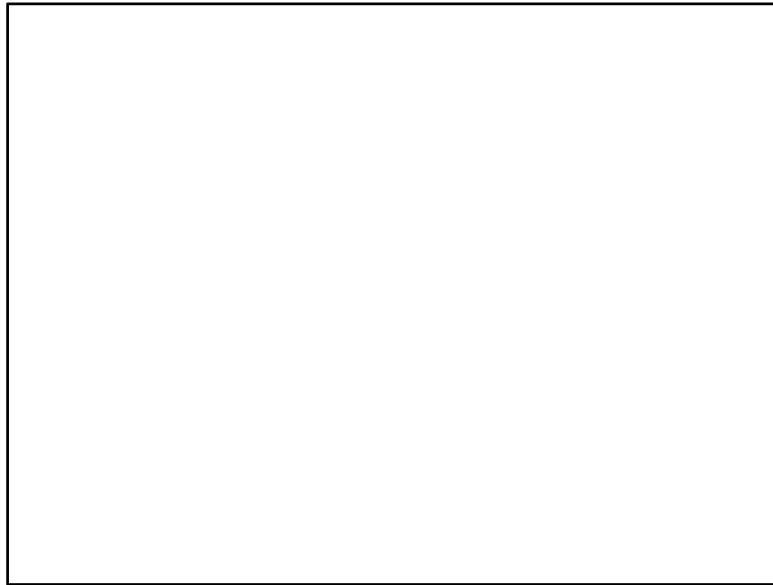
Fotografía 1.8: Hormigonera de eje vertical utilizada en la confección del hormigón.

1.2.4 PREPARACIÓN DE LOS MOLDES

Para la realización de los ensayos se han utilizado probetas cilíndricas de 10 x 20 cm de acero y de 4,5 x 7 cm de PVC.

Los moldes debían estar limpios y con la superficie interior totalmente lisa. Antes del vertido se cubrió la parte interior del molde con una película de desencofrante no reactivo para evitar que el hormigón se pudiera adherir al molde. A la hora del llenado de las probetas, los moldes estaban dispuestos sobre el pavimento y fuera de la zona de paso para evitar cualquier golpe durante el vertido del hormigón (véase *Fotografía 1.9*).

La preparación de los moldes se ha realizado siguiendo la UNE EN 12390-2:2000 [19].



Fotografía 1.9: Disposición de los moldes antes de hormigonar.

1.2.5 VERTIDO Y COMPACTACIÓN DEL HORMIGÓN

Para el llenado de los moldes se vertió el hormigón en tres tongadas, cada una de aproximadamente $\frac{1}{3}$ de la altura del molde y nunca superior a 100 mm de espesor.

Inmediatamente después del vertido del hormigón de cada tongada se efectuó la compactación, penetrando ligeramente en la capa inferior para asegurar la homogeneidad entre capas (cosido) con el objetivo de eliminar las burbujas de aire atrapado en la masa, tanto exteriores como interiores. En este proyecto se ha utilizado la compactación manual realizada con barra compactadora. Se sometió el hormigón al menos a 25 golpes por capa y después se golpeó lateralmente el recipiente, de forma cuidadosa, con el mazo hasta que las burbujas de aire mayores desaparecieron de la superficie y se eliminaron las depresiones dejadas por la barra de compactar.

El llenado de la tercera capa se hizo con exceso de hormigón como se observa en la *Fotografía 1.10*. El hormigón residual depositado sobre el borde superior del molde se retiró con la ayuda de una espátula metálica mediante una acción de vaivén, y posteriormente se niveló la superficie hasta conseguir una cara perfectamente plana y lisa.

El vertido y la compactación del hormigón se han realizado siguiendo la UNE EN 12390-2:2000 [19].



Fotografía 1.10: Vertido de la tercera capa de hormigón.

1.2.6 CURADO INICIAL DEL HORMIGÓN

El curado inicial del hormigón tiene por finalidad impedir la pérdida de agua por evaporación de la mezcla y controlar la temperatura de la misma durante el proceso inicial de hidratación de los componentes activos del cemento, para que el hormigón pueda alcanzar su máxima resistencia y durabilidad.

Mantener el contenido de humedad en el hormigón es fundamental, y se garantizó mediante sacos de esparto mojados con la misma agua que se utilizó en el amasado, y colocados sobre las probetas cubriendo la totalidad de la superficie (véase *Fotografía 1.11*). Este método se utilizó durante las primeras 24 horas en el laboratorio a una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Durante este tiempo las probetas estuvieron protegidas de impactos y vibraciones.

El curado inicial del hormigón se ha realizado siguiendo la UNE EN 12390-2:2000 [19].



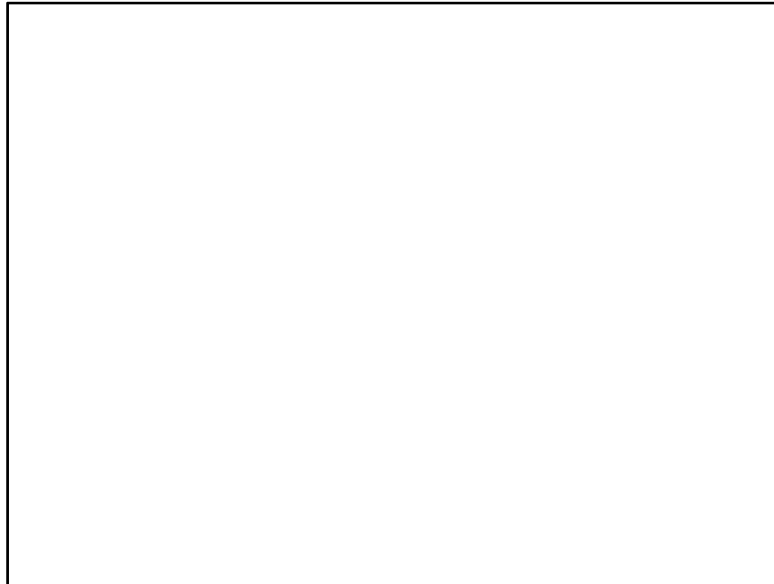
Fotografía 1.11: Probetas cubiertas con sacos de esparto mojados durante las primeras 24 horas.

1.2.7 DESMOLDADO DE LAS PROBETAS

Transcurridas 24 horas desde el hormigonado, se procedió a desmoldar las probetas cilíndricas, y para ello se aflojaban las tuercas del molde con una llave de carraca como la que se muestra en la *Fotografía 1.12*, primero las de la base y luego las de la altura. A continuación se extrajeron las probetas levantando verticalmente los moldes con cuidado para no dañarlas.

Para poder marcar las probetas era necesario limpiar la superficie simplemente con papel, y escribir su designación con un rotulador permanente.

Para finalizar se dejaban los moldes limpios y preparados para su próxima utilización, y para ello se rascaba con una espátula metálica la superficie eliminando los restos de hormigón y se pulía con un cepillo de púas de acero.



Fotografía 1.12: Llave de carraca con la que se aflojaban las tuercas del molde.

1.2.8 CONSERVACIÓN DE LAS PROBETAS - CURADO EN CÁMARA HÚMEDA

Una vez desmoldadas las probetas, se transportaban evitando los golpes a una estancia con las condiciones ambientales normalizadas para continuar así su proceso de curado. Para la conservación de las probetas de hormigón se colocaron en una cámara húmeda con una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa $\geq 95\%$ procurando que no se tocaran entre sí y con el fin de continuar con el proceso de curado.

Las probetas permanecieron en la cámara húmeda hasta el momento de ser utilizadas para realizar su correspondiente ensayo (véase *Fotografía 1.13*).

La conservación y el curado de las probetas se han realizado siguiendo la UNE EN 12390-2:2000 [19].



Fotografía 1.13: Probetas conservadas en la cámara húmeda.

1.3 NOMENCLATURA DE LAS PROBETAS

Para poder mantener un adecuado registro de las probetas, se ha establecido la codificación que se detalla en la tabla siguiente:

Tabla 1.8: Nomenclatura de las probetas.

Código	Designación
HS/C	Hormigón sin caucho (referencia).
H5%-NFU-F	Hormigón con el 5% del peso de la arena sustituido por caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU).
H10%-NFU-F	Hormigón con el 10% del peso de la arena sustituido por caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU).
H15%-NFU-F	Hormigón con el 15% del peso de la arena sustituido por caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU).
H5%-NFU-G	Hormigón con el 5% del peso de la grava sustituido por caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU).
H10%-NFU-G	Hormigón con el 10% del peso de la grava sustituido por caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU).
H15%-NFU-G	Hormigón con el 15% del peso de la grava sustituido por caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU).

En primer lugar se ha diferenciado el hormigón en función de su composición: hormigón de referencia y hormigones con caucho procedente de NFU. La codificación de estos últimos está dividida en tres partes: en la primera se determina el porcentaje del volumen del árido que ha sido sustituido por caucho (5%, 10%, 15%), en la segunda se indica que el caucho es procedente de neumáticos fuera de uso, y en la tercera se define el grosor del grano del caucho (F: fino, G: grueso).

Con el fin de llevar un correcto control de la fabricación de las probetas se registró la fecha de confección de los diferentes hormigones en cada una de ellas.



Fotografía 1.14: Nomenclatura de las probetas.

2. ENSAYOS REALIZADOS

Una vez explicada la metodología de fabricación de las probetas se detallan los ensayos realizados con el fin de determinar la influencia de la adición de caucho en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón.

2.1 CONSISTENCIA

2.1.1 INTRODUCCIÓN

El ensayo de consistencia se realiza para determinar la oposición que presenta el hormigón fresco a experimentar deformaciones. Se ha decidido utilizar el Cono de Abrams como método de ensayo de asentamiento, ya que es un sistema muy sencillo y no requiere equipos costosos.

El ensayo de consistencia se ha realizado siguiendo la UNE EN 12350-2:2006 [18].

2.1.2 EQUIPOS UTILIZADOS

Tolva de llenado: recipiente provisto de un collarín que permite acoplarse a la parte superior del molde para facilitar su vertido dentro del mismo.

Cogedor: cogedor curvo de acero.

Molde: molde metálico troncocónico de 30 cm de altura, 10 cm de diámetro superior y 20 cm de diámetro inferior.

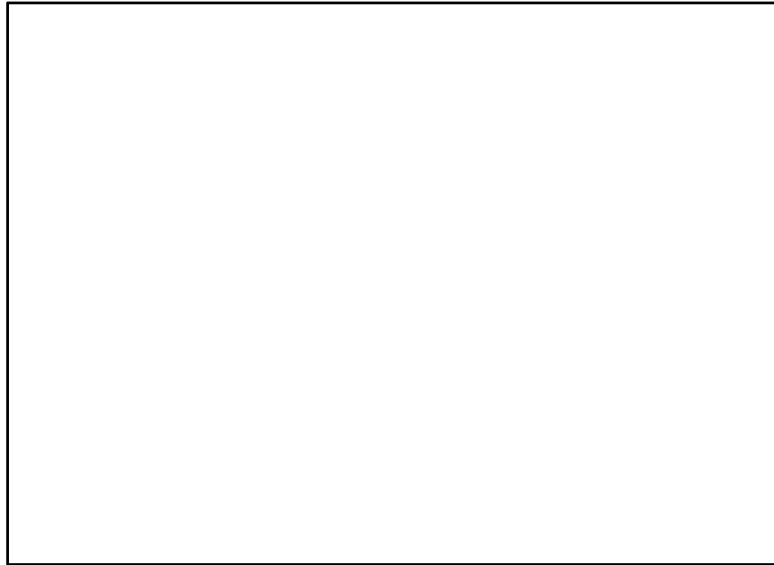
Espátula: espátula metálica de 250 mm de longitud.

Chapa base: placa rígida metálica sobre la cual se fija el molde.

Regla: regla metálica graduada en centímetros y milímetros.

Barra compactadora: barra de acero de sección transversal circular, recta, con un diámetro de 16 mm y una longitud de 600 mm, con sus extremos redondeados.

Los distintos equipos utilizados en el ensayo de consistencia quedan recogidos en la *Fotografía 2.1*.



Fotografía 2.1: Aparatos utilizados para el ensayo del cono de Abrams.

2.1.3 PROCESO DE ELABORACIÓN

Para realizar el ensayo se humedeció el molde y la chapa base para evitar el rozamiento del hormigón con la superficie y, a continuación, se fijó el molde sobre la chapa base anclándolo con dos soportes para evitar cualquier movimiento del molde y la pérdida de material por su parte inferior.

Se llenó el molde en tres tongadas, de modo que cada capa ocupaba aproximadamente $\frac{1}{3}$ de la altura del molde una vez compactado el hormigón. En la *Fotografía 2.2* se muestra el vertido de la primera tongada de hormigón.



Fotografía 2.2: Vertido del hormigón en el Cono de Abrams.

La compactación de cada capa se efectuó realizando 25 golpes con la barra compactadora y distribuyendo uniformemente los golpes en la sección transversal de cada capa. A la hora de compactar la segunda y la última capa, se tuvo en cuenta que, aparte de compactar toda su altura, había que penetrar con la barra ligeramente en la capa inferior para lograr una homogeneidad entre capas. En el llenado de la última capa, se procuró que el hormigón rebosase antes de comenzar el proceso de compactado.

Después de compactar la última capa, se retiró el hormigón sobrante con la ayuda de una espátula metálica, dejando la superficie enrasada con la parte superior del molde.

Se retiró el molde levantándolo con precaución en dirección vertical, en un tiempo de 5 a 10 segundos, de una manera uniforme y sin causar al hormigón ningún movimiento lateral o de torsión. La operación completa, desde el comienzo del llenado del molde hasta la retirada del mismo, se realizó sin interrupción y se completó en un tiempo inferior a 150 segundos.








Inmediatamente después de retirar el molde, se midió y registró el asentamiento determinando la diferencia entre la altura del molde y la del punto más alto de la probeta de hormigón asentada. Para poder determinar este descenso, se colocó la barra compactadora sobre la parte superior del molde totalmente horizontal, y se tomó la medida sobre la probeta con la regla perpendicular a la barra tal y como se aprecia en la *Fotografía 2.3*. Por último, se registró el asentamiento redondeando a los 10 mm.



Fotografía 2.3: Medición del asentamiento del hormigón en estado fresco.

2.1.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla 2.1: Resultados del ensayo de consistencia.

Tipo de hormigón	Fecha del ensayo	Asentamiento	Aspecto del hormigón
HS/C	20 – III – 07	8 cm	
H5%-NFU-F	20 – III – 07	8 cm	
H10%-NFU-F	27 – III – 07	12 cm	
H15%-NFU-F	27 – III – 07	11 cm	
H5%-NFU-G	03 – III – 07	9 cm	
H10%-NFU-G	03 – III – 07	10 cm	
H15%-NFU-G	17 – IV – 07	9 cm	

A la vista de los resultados detallados en la *Tabla 2.1*, se confirma lo esperado: el hormigón con caucho experimenta un asentamiento mayor que el hormigón convencional debido a la baja porosidad del caucho si se compara con la del árido. También se puede afirmar que el hormigón con NFU fino es más fluido que el hormigón con NFU grueso. Esto se debe a que el NFU grueso tiene una geometría mucho más angulosa y laminar que la grava, dificultando el desplazamiento entre partículas dentro de la mezcla.

2.2 ABSORCIÓN CAPILAR

2.2.1 INTRODUCCIÓN

El ensayo establece el procedimiento para medir la velocidad de absorción capilar de agua del hormigón. Esta propiedad física consiste en el transporte inducido por la tensión superficial del agua que actúa sobre los capilares del hormigón y, se determina registrando las variaciones de peso de unas muestras de hormigón que se encuentran en contacto con el agua en una de sus caras.

No se ha encontrado ninguna norma española que desarrolle este ensayo y, por este motivo, se ha utilizado una metodología interna del laboratorio.

2.2.2 EQUIPOS UTILIZADOS

Recipiente: recipiente de plástico totalmente estanco, provisto de una tapa.

Base de apoyo: cuadrícula de plástico flexible con las mismas dimensiones que la base del recipiente y un espesor de 4 mm.

Pie de rey: calibrador con una regla metálica capaz de medir pequeños espesores.

Cronómetro: reloj de gran precisión.

Balanza: instrumento para medir las masas de las probetas.

Los distintos equipos utilizados en el ensayo de absorción capilar quedan recogidos en la *Fotografía 2.4*.



Fotografía 2.4: Aparatos utilizados para el ensayo de absorción capilar.

2.2.3 PROCESO DE ELABORACIÓN

Se han utilizado tres probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 50 mm de espesor de cada hormigón. Las muestras se han obtenido de la parte central de tres probetas cilíndricas de 10 x 20 cm mediante corte, desechando los extremos de las mismas ya que son las zonas con más riesgo de quedar heterogéneas.

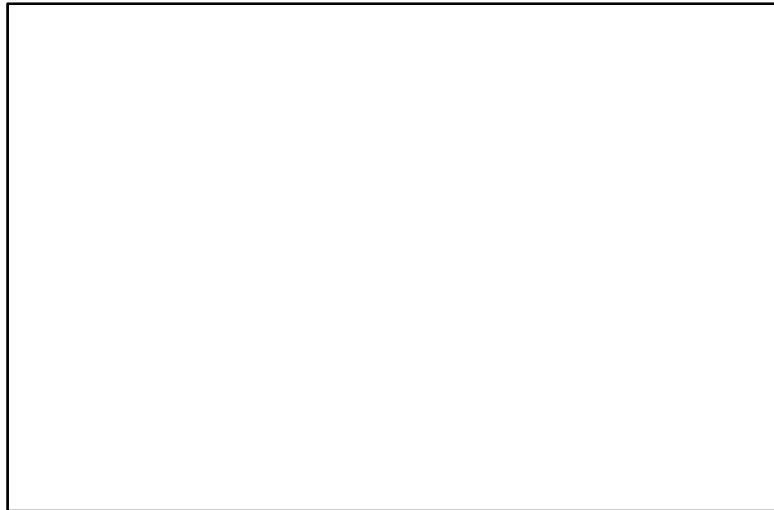
Las muestras se secaron en una estufa a 50 ± 2 °C durante 48 horas. Transcurrido este tiempo se sacaron de la estufa que se muestra en la *Fotografía 2.5* y se dejaron enfriar. A continuación se pesaron las muestras determinando la masa seca (M_{si}), y se introdujeron en el recipiente sobre la base de apoyo con una altura de agua de 3 ± 1 mm respecto a la base de apoyo (véase *Fotografía 2.6*).

Durante todo el ensayo se han mantenido las probetas sumergidas a esta altura, a una temperatura de 20 ± 2 °C y a una humedad ≥ 95 %, que se garantizó tapando el recipiente. El instante en el que las probetas tuvieron contacto con el agua, se registró como tiempo inicial del ensayo ($t=0$).



Fotografía 2.5: Estufa utilizada para secar las probetas.

En los tiempos de $t = 5$ min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 24 h y 48 h, se retiraron cuidadosamente cada una de las probetas, se secaron con un paño por la base de absorción y por la superficie lateral y se pesaron determinando la masa húmeda (M_{hit}).



Fotografía 2.6: Probetas colocadas en el recipiente en contacto con el agua.

Para cada probeta (i) en el instante de lectura (t) se determinó el incremento de masa por unidad de área (C_{it}), mediante la fórmula siguiente:

$$C_{it} = \frac{M_{nit} - M_{si}}{A_i}$$

Siendo:

- C_{it} el incremento de masa por unidad de área de la sección transversal de la probeta (i) en el instante de lectura (t) (g/cm^2);
- M_{nit} la masa húmeda de la probeta (i) en el instante de lectura (t) (g);
- M_{si} la masa seca de la probeta (i) (g);
- A_i el área de la sección transversal de la probeta (i) (cm^2).

El *Gráfico 2.1* muestra la curva del incremento de masa por unidad de área (C_{it}) de las probetas en función del tiempo (h). La velocidad de absorción capilar (absortividad) es la pendiente de la recta obtenida de la curva del incremento de masa en función de \sqrt{t} .

2.2.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla 2.2: Resultados del ensayo de absorción capilar.

HS/C	t = 0	t = 5'	t = 10'	t = 15'	t = 30'	t = 1 h	t = 2 h	t = 3 h	t = 24 h	t = 48 h
valor medio (g)	0,000	0,019	0,028	0,031	0,037	0,045	0,056	0,062	0,131	0,163
dispersión (%)	0,00	13,33	13,64	16,67	17,24	11,43	12,21	11,72	3,25	1,30

H5%-NFU-F	t = 0	t = 5'	t = 10'	t = 15'	t = 30'	t = 1 h	t = 2 h	t = 3 h	t = 24 h	t = 48 h
valor medio (g)	0,000	0,022	0,030	0,034	0,041	0,048	0,056	0,060	0,124	0,156
dispersión (%)	0,00	23,53	22,86	24,05	25,00	22,32	20,45	19,72	12,67	10,33

H10%-NFU-F	t = 0	t = 5'	t = 10'	t = 15'	t = 30'	t = 1 h	t = 2 h	t = 3 h	t = 24 h	t = 48 h
valor medio (g)	0,000	0,024	0,032	0,036	0,044	0,053	0,063	0,068	0,153	0,194
dispersión (%)	0,00	30,36	28,00	32,94	27,88	27,42	27,52	26,87	19,17	18,12

H15%-NFU-F	t = 0	t = 5'	t = 10'	t = 15'	t = 30'	t = 1 h	t = 2 h	t = 3 h	t = 24 h	t = 48 h
valor medio (g)	0,000	0,023	0,029	0,035	0,042	0,051	0,061	0,066	0,145	0,183
dispersión (%)	0,00	23,64	20,59	16,87	16,00	11,76	10,42	9,62	4,11	4,86

H5%-NFU-G	t = 0	t = 5'	t = 10'	t = 15'	t = 30'	t = 1 h	t = 2 h	t = 3 h	t = 24 h	t = 48 h
valor medio (g)	0,000	0,026	0,034	0,039	0,048	0,056	0,073	0,083	0,177	0,213
dispersión (%)	0,00	31,15	28,75	29,03	26,32	30,08	23,70	24,62	24,28	26,04

H10%-NFU-G	t = 0	t = 5'	t = 10'	t = 15'	t = 30'	t = 1 h	t = 2 h	t = 3 h	t = 24 h	t = 48 h
valor medio (g)	0,000	0,036	0,045	0,052	0,062	0,075	0,089	0,097	0,188	0,230
dispersión (%)	0,00	17,86	18,69	16,39	15,75	11,86	12,44	13,16	14,45	14,23

H15%-NFU-G	t = 0	t = 5'	t = 10'	t = 15'	t = 30'	t = 1 h	t = 2 h	t = 3 h	t = 24 h	t = 48 h
valor medio (g)	0,000	0,047	0,059	0,067	0,080	0,095	0,112	0,125	0,230	0,272
dispersión (%)	0,00	5,40	5,76	6,33	7,94	7,14	6,42	5,76	3,70	3,74

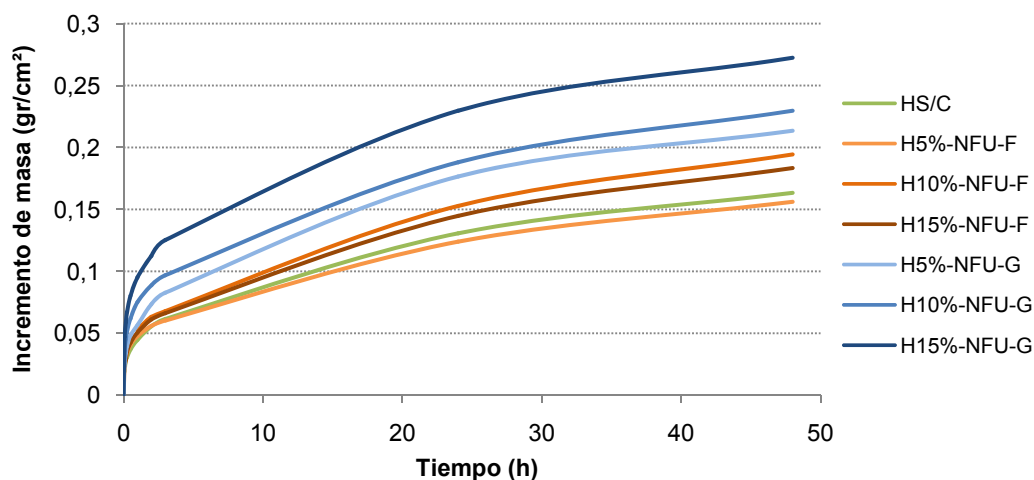


Gráfico 2.1: Resultados del ensayo de absorción capilar

En los datos anteriores (*Tabla 2.2 y Gráfico 2.1*) se observa como la absorción capilar aumenta en los hormigones fabricados con NFU y es mayor cuanto mayor es el diámetro de las partículas de caucho. Esto puede ser debido a la acción de dos factores: por un lado a la baja adherencia entre el caucho y la pasta de cemento, quedando huecos entre ambos por donde puede circular el agua con mayor facilidad y, por otro lado, a las fisuras producidas por el corte de las probetas, ya que ya el caucho es un material elástico que al someterse a la acción de corte daña la pasta de cemento que lo envuelve provocando fisuras.

A continuación se muestran los datos de la velocidad de absorción (absortividad) de los hormigones fabricados.

Tabla 2.3: Velocidad de absorción (absortividad).

Tipo de hormigón	Absortividad (g/cm²√t)
HS/C	0,022
H5%-NFU-F	0,020
H10%-NFU-F	0,026
H15%-NFU-F	0,024
H5%-NFU-G	0,029
H10%-NFU-G	0,030
H15%-NFU-G	0,035

Los datos de la *Tabla 2.3* revelan que las absortividades están un rango que va de 0,020 g/cm²√t a 0,035 g/cm²√t. Se puede observar que el hormigón de referencia tiene un valor menor con respecto a los hormigones con NFU y que éste aumenta a medida que aumenta el contenido de caucho, siendo mayor en los hormigones con NFU-G.

2.3 DENSIDAD, ABSORCIÓN Y POROSIDAD

2.3.1 INTRODUCCIÓN

El ensayo describe un método para la determinación de la densidad, porcentaje de absorción y, porcentaje de huecos en el hormigón endurecido. Para ello, es necesario someter tres muestras de cada tipo de hormigón a inmersión durante 24 horas y, a continuación, a secado en una estufa a una temperatura entre 100 y 110 °C durante 24 horas más. Con este procedimiento se obtiene la masa aparente en el agua, la masa saturada superficie seca y la masa seca, respectivamente, datos necesarios para poder determinar la densidad, absorción y porosidad del hormigón endurecido.

El ensayo de resistencia densidad, porosidad y absorción se ha realizado siguiendo la UNE EN 12390-7:2000 [22] y la metodología interna del laboratorio.

2.3.2 EQUIPOS UTILIZADOS

Recipiente: recipiente de plástico totalmente estanco, provisto de una tapa.

Balanza: instrumento equipado con un estribo para poder pesar la probeta tanto en el aire como en el agua.

Los distintos equipos utilizados en el ensayo de absorción capilar quedan recogidos en la *Fotografía 2.7*.

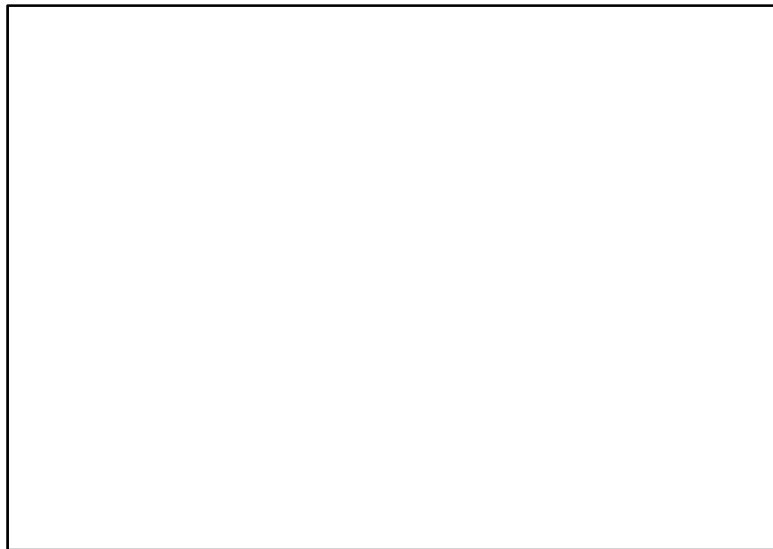


Fotografía 2.7: Balanza equipada con un estribo.

2.3.3 PROCESO DE ELABORACIÓN

Las muestras de hormigón necesarias para llevar a cabo este ensayo pueden ser secciones de probetas cilíndricas con una masa aproximada de 800 g y, por ello, se han utilizado las mismas probetas que en el ensayo de absorción capilar una vez finalizado el mismo.

En primer lugar se colocaron tres muestras de cada hormigón en un recipiente totalmente estanco y se fueron saturando lentamente para conseguir llenar todos los poros de agua sin dejar huecos y permanecieron sumergidas en agua durante 24 horas (véase *Fotografía 2.8*).



Fotografía 2.8: Probetas colocadas en el recipiente y sumergidas en agua.

Transcurrido este tiempo, la probeta se colocó mediante un estribo en una cesta metálica dentro del tanque de agua situado bajo la balanza y, se midió la masa aparente en el agua.

Seguidamente se sacó del tanque de agua, se quitó la humedad superficial con una toalla y se volvió a pesar, obteniendo en este caso la masa saturada superficie seca.

Finalmente, se colocaron las muestras en la estufa a una temperatura de 105 ± 5 °C y se dejaron secar durante 24 horas, se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente y se volvieron a pesar para determinar la masa seca.

Una vez determinados estos parámetros, se realizaron los cálculos oportunos.

Volumen:

$$V = \frac{M_{SSS} - M_{AA}}{\rho}$$

Siendo:

V	el volumen de la probeta (cm ³);
M _{SSS}	la masa saturada superficie seca de la probeta (g);
M _{AA}	la masa aparente en el agua (g);
ρ	la densidad del agua = 1 (g/cm ³).

Absorción:

$$Ab = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} \cdot 100$$

Siendo:

Ab	la absorción del hormigón endurecido (%);
M _{SSS}	la masa saturada superficie seca de la probeta (g);
M _s	la masa seca de la probeta (g).

Densidad:

$$Ds = \frac{M_s}{V}$$

Siendo:

Ds	la densidad seca del hormigón endurecido (g/cm ³);
M _s	la masa seca de la probeta (g);
V	el volumen de la probeta (cm ³).

Porosidad:

$$P = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_{SSS} - M_{AA}} \cdot 100$$

Siendo:

P	la porosidad del hormigón endurecido (%);
M _s	la masa seca de la probeta (g);
M _{SSS}	la masa saturada superficie seca de la probeta (g);
M _{AA}	la masa aparente en el agua (g).

2.3.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla 2.4: Resultados del ensayo de densidad, absorción y porosidad.

		M_{AA} (g)	M_{SSS} (g)	M_s (g)	Ab (%)	Ds (g/cm ³)	P (%)
HS/C	A	516,2	888,5	840,4	5,72	2,257	12,92
	B	524,3	897,5	849,5	5,65	2,276	12,86
	C	535,9	909,3	866,5	4,94	2,321	11,46
	media				5,44	2,285	12,42
H5%-NFU-F	A	512,7	881,6	836,2	5,43	2,267	12,31
	B	528,5	908,7	862,5	5,36	2,269	12,15
	C	529,1	906,8	861,0	5,32	2,280	12,13
	media				5,37	2,272	12,19
H10%-NFU-F	A	510,8	889,5	836,8	6,30	2,210	13,92
	B	513,1	890,0	840,8	5,85	2,231	13,05
	C	507,4	882,3	831,1	6,16	2,217	13,66
	media	-	-	-	6,10	2,219	13,56
H15%-NFU-F	A	504,7	883,0	830,1	6,37	2,194	13,98
	B	503,5	881,0	831,3	5,98	2,202	13,17
	C	507,8	885,5	835,9	5,93	2,213	13,13
	media	-	-	-	6,10	2,203	13,44
H5%-NFU-G	A	556,1	951,3	896,4	6,12	2,268	13,89
	B	551,3	940,7	891,5	5,52	2,289	12,63
	C	545,8	932,0	879,4	5,98	2,277	13,62
	media	-	-	-	5,87	2,279	13,38
H10%-NFU-G	A	530,2	922,9	862,8	6,97	2,197	15,30
	B	538,5	931,1	877,0	6,17	2,234	13,78
	C	533,7	929,4	873,4	6,41	2,207	14,15
	media	-	-	-	6,52	2,213	14,40
H15%-NFU-G	A	510,9	894,2	840,2	6,43	2,192	14,09
	B	507,0	890,4	840,2	5,97	2,191	13,09
	C	507,8	894,8	840,6	6,45	2,172	14,01
	media	-	-	-	6,28	2,185	13,73

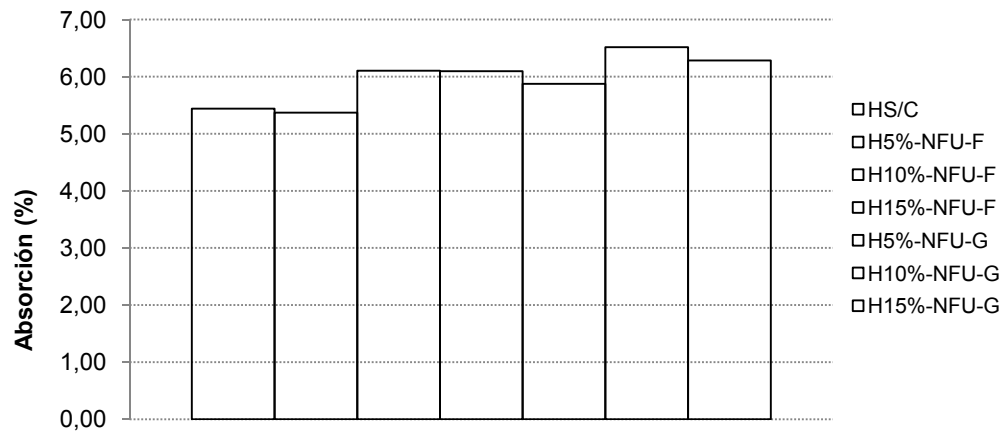


Gráfico 2.2: Resultados del ensayo de absorción

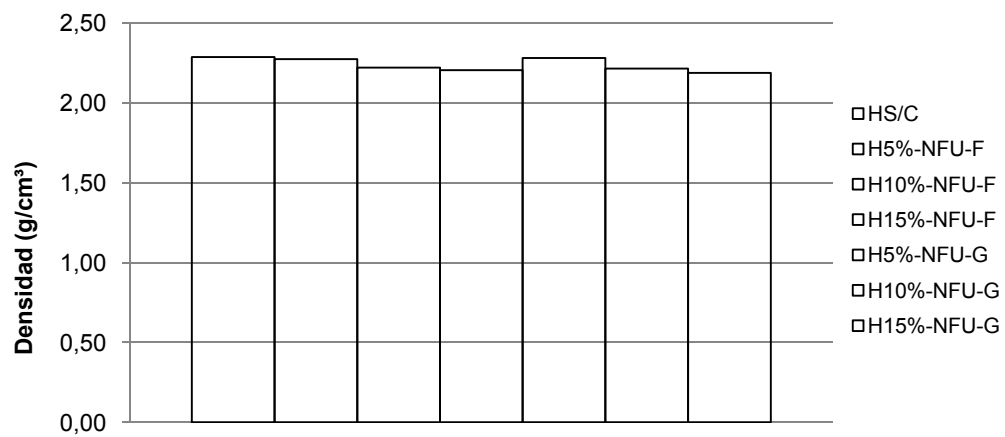


Gráfico 2.3: Resultados del ensayo de densidad

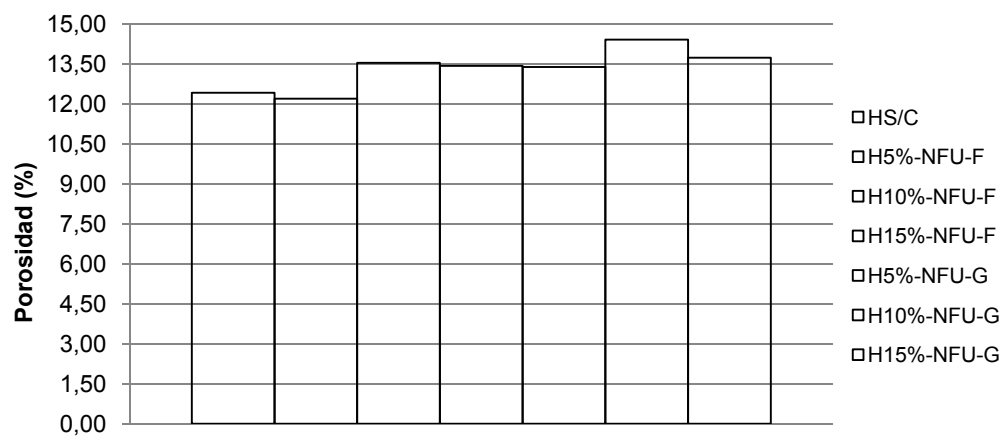


Gráfico 2.4: Resultados del ensayo de porosidad

A partir de los resultados de la *Tabla 2.4* se han elaborado los siguientes gráficos (*Gráficos 2.2, 2.3 y 2.4*) en los que se representa la variación de absorción, densidad y porosidad de los diferentes hormigones.

La incorporación de NFU favorece la aparición de aire en el estado fresco del hormigón debido a la baja adherencia entre el caucho y la pasta de cemento. Como consecuencia directa de esto, los hormigones fabricados con NFU ofrecen una mayor absorción y porosidad, aumentando éstas con el tamaño del caucho. Este incremento de huecos en la mezcla, junto con la baja densidad del caucho en relación a la del árido convencional, son factores que influyen en la disminución de la densidad del hormigón endurecido.

El hormigón H5%-NFU-F presenta la misma capacidad de absorción, porosidad y densidad que el hormigón convencional. Sin embargo, el H10%-NFU-G contiene más cantidad de huecos siendo un material mucho más poroso.

2.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

2.4.1 INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material que resiste solicitaciones de tracción y flexión, aunque destaca por su elevada resistencia a compresión. Determinar esta propiedad del hormigón es el objetivo principal en prácticamente todos los estudios, dado que en la mayor parte de sus aplicaciones se hace uso de esta capacidad resistente frente a esfuerzos de compresión.

El ensayo de resistencia a compresión se ha realizado siguiendo la UNE EN 12390-3:2001 [20].

2.4.2 EQUIPOS UTILIZADOS

Máquina de ensayos a compresión: la máquina debe estar provista de un sistema de regulación de cargas y disponer de dos platos de acero en las caras de contacto con las probetas (véase *Fotografía 2.9*). El plato inferior tendrá marcas que sirvan de guía para un correcto centrado de la probeta. El elemento de lectura de cargas deberá disponer de un indicador de la carga máxima alcanzada.



Fotografía 2.9: Máquina de ensayo a compresión.

2.4.3 PROCESO DE ELABORACIÓN

Para realizar el ensayo de resistencia a compresión se han utilizado tres probetas cilíndricas con un diámetro de 10 cm y una altura de 20 cm de cada tipo de hormigón. Todas las probetas fueron ensayadas 28 días después de su fabricación.

Antes de comenzar con el ensayo propiamente dicho, se refrentaron las caras superiores de las probetas para lograr una superficie totalmente plana. El refrentado debe ser tan fino como sea posible y no debe tener más de 5 mm de grosor. El material de refrentado consistió en una mezcla compuesta en partes iguales en peso de azufre y arena silíceo fina. La mezcla se calentaba a una temperatura tal, que mientras se removía continuamente se alcanzaba la consistencia requerida. El proceso de calentamiento de la mezcla se puede observar en la *Fotografía 2.10*. A continuación, se cogía parte de la mezcla y se colocaba en el marco de colocación. Inmediatamente después, se colocaba la probeta presionando hacia abajo para obtener una capa lo más delgada posible. Se dejaba enfriar aproximadamente durante un minuto, y se retiraba con cuidado.



Fotografía 2.10: Proceso de calentamiento de la mezcla de azufre y arena.

Para llevar a cabo el ensayo, las probetas refrentadas se colocaban centradas respecto al plato inferior de la máquina. Seguidamente, se giraban las manetas haciendo descender el eje del pistón hasta que el plato superior tenía contacto completo con la cara refrentada de la probeta (véase *Fotografía 2.11*).

Una vez ajustada la probeta se le aplicaba una carga a una velocidad constante comprendida entre 0,2 MPa/s y 1,0 MPa/s, y se incrementaba continuamente $\pm 10\%$ hasta que la probeta no podía soportar más carga.



Fotografía 2.11: Probeta colocada en la máquina de ensayo a compresión.

Por último se registraba la carga máxima indicada por el elemento de lectura y se calculaba la resistencia a compresión del hormigón mediante la fórmula siguiente:

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

Siendo:

- f_c la resistencia a compresión (N/mm²), y su valor se redondea al 0,5 N/mm² más cercano;
- F la carga máxima en rotura (N);
- A_c el área transversal de la probeta sobre la que actúa la fuerza de compresión (mm²).

Como el ensayo se ha efectuado sobre probetas de 10 x 20 cm, ha sido necesario utilizar un coeficiente de conversión (0,97) para obtener los valores correspondientes a las condiciones tipo de las probetas cilíndricas de 15 x 30 cm, según la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) [8]. De este modo, todos los valores registrados en el este ensayo han sido multiplicados por 0,97 obteniendo los resultados de resistencia media del hormigón a compresión que en la *Tabla 2.5* se detallan.

Por tanto, se puede definir la resistencia media del hormigón (f_{cm}), como el valor correspondiente a la media aritmética de una serie de tres resultados de ensayos a 28 días.

La resistencia característica de proyecto (f_{ck}), es el valor que se adopta en el proyecto para la resistencia a compresión, como base de los cálculos.

La resistencia media a 28 días (f_{cm}), deberá superar la resistencia de proyecto (f_{ck}), con margen suficiente para que sea razonable esperar que, con la dispersión que introduce la ejecución en obra, sobrepase también a la de proyecto. Si se consideran unas condiciones de ejecución de obra medias (la más desfavorable), la resistencia media necesaria en laboratorio (f_{cm}) debería cumplir la siguiente relación:

$$f_{cm} = 1,50 f_{ck} + 2,0 \text{ N/mm}^2$$

Siendo:

f_{cm} la resistencia media del hormigón a compresión (N/mm^2);
 f_{ck} la resistencia característica del hormigón de proyecto (N/mm^2).

Los resultados correspondientes a la f_{ck} de cada hormigón quedan registrados en la *Tabla 2.6*.

2.4.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla 2.5: Resultados del ensayo de resistencia a compresión.

Tipo de hormigón	Probeta A (N/mm ²)	Probeta B (N/mm ²)	Probeta C (N/mm ²)	Resistencia media (f_{cm}) (N/mm ²)	Valor relativo (%)
HS/C	40	40	39	40	100,0
H5%-NFU-F	31	33	31	32	80,0
H10%-NFU-F	25	27	27	26	65,0
H15%-NFU-F	27	27	25	26	65,0
H5%-NFU-G	28	29	25 ⁽¹⁾	29	72,5
H10%-NFU-G	24	23	19 ⁽¹⁾	24	60,0
H15%-NFU-G	25	24	27	25	62,5

- (1) Estos valores no se han tenido en cuenta a la hora de calcular la media aritmética de los tres valores obtenidos, ya que presentan una variación superior al 10% respecto a las otras dos probetas y se presupone que ha habido algún error en el vertido y compactación de la probeta.

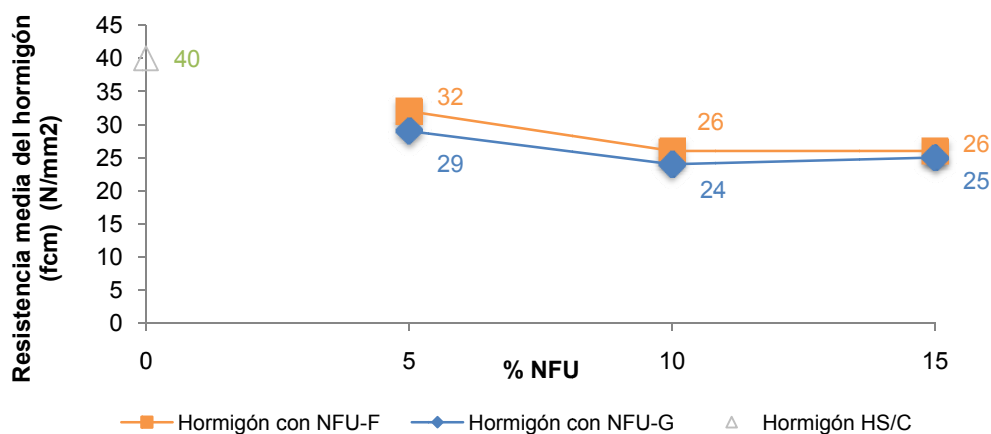


Gráfico 2.5: Resultados del ensayo de resistencia a compresión

A la vista de los datos reflejados en el Gráfico 2.5 se puede afirmar que la incorporación de caucho en el hormigón disminuye su resistencia a compresión. Sin embargo, la reducción de la resistencia no es proporcional, ya que las resistencias de los hormigones con 10 % y 15 % de NFU son muy similares. Esta reducción se ve favorecida por el tamaño del caucho, es decir, a medida que éste aumenta, disminuye la resistencia del hormigón.

Tabla 2.6: Resultados la resistencia característica de proyecto.

Tipo de hormigón	f_{cm} (N/mm ²)	f_{ck} (N/mm ²)	Designación
HS/C	40	25	H - 25
H5%-NFU-F	32	20	H - 20
H10%-NFU-F	26	15	-
H15%-NFU-F	26	15	-
H5%-NFU-G	29	17	-
H10%-NFU-G	24	14	-
H15%-NFU-G	25	15	-

Como se puede observar en la *Tabla 2.6*, los resultados de la determinación de la f_{ck} para esta dosificación muestran que únicamente el hormigón H5%-NFU-F cumple con la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) [8] y solo se podría emplear en hormigones en masa. Si se trabaja con otras dosificaciones se pueden obtener resultados diferentes.

La disminución de la resistencia mecánica observada en los hormigones con NFU puede ser debida a varios factores. Existen variaciones a consecuencia del incremento de la cantidad de agua en la pasta dado que el caucho tiene una absorción inferior a la del árido.

Un efecto importante en la reducción de la resistencia a compresión puede ser el comportamiento tan diferente de dos materiales que deben estar adheridos y trabajar solidariamente (el caucho y la pasta de cemento). El caucho sometido a unas determinadas cargas tiende a deformarse por sus propiedades elásticas, sin embargo, la pasta que lo envuelve no reacciona del mismo modo. Esto produce unas tensiones internas dentro del hormigón que facilita la aparición de fisuras en el contorno del caucho debilitando al elemento frente a sollicitaciones de compresión.

2.5 RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA

2.5.1 INTRODUCCIÓN

El hormigón presenta un comportamiento muy bueno frente a esfuerzos de compresión pero, sin embargo, su resistencia a tracción es diez veces inferior. La determinación de la resistencia a tracción pura del hormigón es muy difícil de llevar a cabo debido a las tensiones secundarias que se suelen producir al realizar los ensayos. Por ese motivo, normalmente se opta por utilizar ensayos alternativos que permiten aproximarse bastante a su valor. En este proyecto se ha decidido utilizar el ensayo de resistencia a tracción indirecta o “ensayo brasileño”, ya que es un método muy sencillo y práctico.

El ensayo de resistencia a tracción indirecta se ha realizado siguiendo la UNE EN 12390-6:2001 [21].

2.5.2 EQUIPOS UTILIZADOS

Máquina de ensayos a tracción indirecta: se ha utilizado la misma prensa utilizada en el ensayo de resistencia a compresión.

2.5.3 PROCESO DE ELABORACIÓN

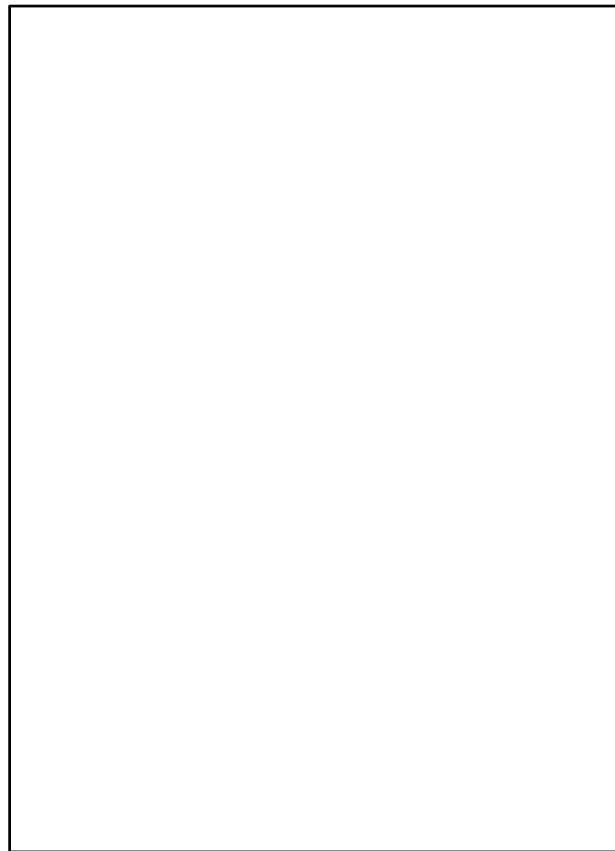
Para realizar el ensayo de resistencia a tracción indirecta se han utilizado dos probetas cilíndricas con un diámetro de 10 cm y una altura de 20 cm de cada tipo de hormigón. Todas las probetas fueron ensayadas 28 días después de su confección.

A diferencia del ensayo a compresión, las probetas se colocaban centradas con su eje principal horizontal sobre el plato inferior de la prensa. Mediante soportes temporales se aseguró que cada una de las probetas permaneciera centrada mientras descendía el eje del pistón y hasta que el plato superior de la prensa hacía contacto con la misma (véase *Fotografía 2.12*).

A continuación se le aplicaba una carga a una velocidad constante comprendida entre 0,04 MPa/s y 0,06 MPa/s, y se incrementaba continuamente $\pm 1\%$ hasta que la probeta no podía soportar más carga y rompía por su plano diametral.

En el ensayo a tracción indirecta las probetas cilíndricas han estado sometidas a una carga de compresión sobre un plano diametral. Debido al estado tensional del cilindro, la rotura se produce por tracción cuando las tensiones que aparecen en el plano de aplicación de las cargas alcanzan el valor de la resistencia a tracción del material. En ese instante el material comienza su fractura y ésta se propaga a lo largo del plano diametral mencionado. Sin embargo, el estado tensional no es uniaxial como se puede observar en las *Figuras 2.1* y *2.2*, y el material soporta tensiones de compresión (σ_c) que son normales a las tensiones de tracción (σ_t), con valores absolutos que sobrepasan en más de tres veces la resistencia a tracción en el momento de la fractura. Como el hormigón es un material con una relación de resistencia a compresión/tracción alta, la fractura es

debida a las tensiones de tracción mientras que se asume que las tensiones de compresión no producen daño alguno.



Fotografía 2.12: Rotura a tracción indirecta de una probeta cilíndrica.

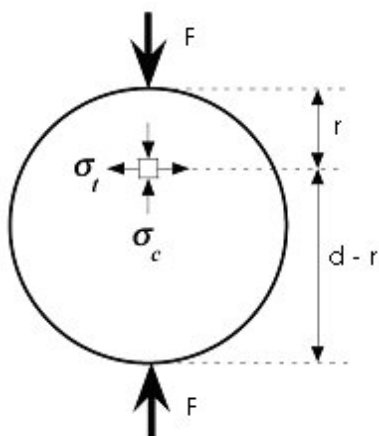


Figura 2.1: Tensiones aplicadas en el ensayo brasileño.

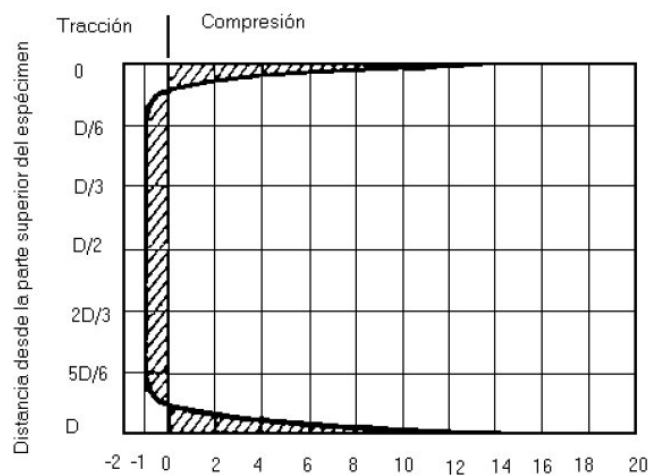


Figura 2.2: Distribución de tensiones en el ensayo brasileño.

La carga máxima indicada por el elemento de lectura de la máquina se registraba y, a continuación, se calculaba la resistencia a tracción indirecta del hormigón mediante la fórmula siguiente:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d}$$

Siendo:

- f_{ct} la resistencia a tracción indirecta (N/mm²), y se expresa con una aproximación de 0,05 N/mm²;
 F la carga máxima soportada (N);
 L la longitud de la línea de contacto de la probeta (mm);
 d la dimensión de la sección transversal de la probeta (mm).

La resistencia a tracción pura se puede obtener a partir de la resistencia a tracción indirecta mediante la expresión definida a continuación:

$$f_{ct} = 0,90 f_{ci}$$

Siendo:

- f_{ct} la resistencia a tracción indirecta (N/mm²), y se expresa con una aproximación de 0,05 N/mm²;
 f_{ci} la resistencia a tracción pura (N/mm²).

Los resultados correspondientes a la f_{ct} y a la f_{ci} de cada hormigón quedan registrados en la *Tabla 2.7*.

2.5.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla 2.7: Resultados del ensayo de resistencia a tracción indirecta.

Tipo de hormigón	Probeta A (N/mm ²)	Probeta B (N/mm ²)	Resistencia a tracción indirecta (f_{ct}) (N/mm ²)	Resistencia a tracción pura (f_{ci}) (N/mm ²)
HS/C	2,34	2,65	2,50	2,78
H5%-NFU-F	2,65	2,50	2,57	2,86
H10%-NFU-F	2,50	2,34	2,42	2,69
H15%-NFU-F	2,03	2,50	2,26	2,51
H5%-NFU-G	2,34	2,81	2,57	2,86
H10%-NFU-G	2,25	2,34	2,29	2,54
H15%-NFU-G	2,18	2,18	2,18	2,42

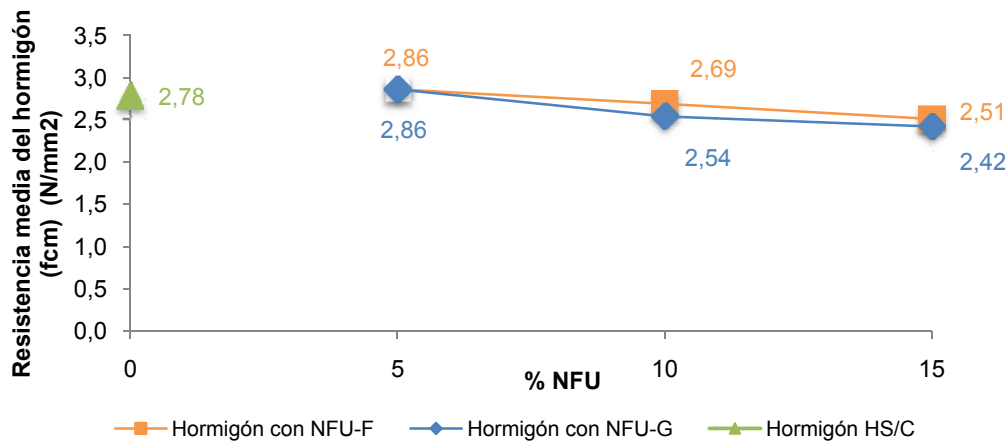


Gráfico 2.6: Resultados del ensayo a tracción pura

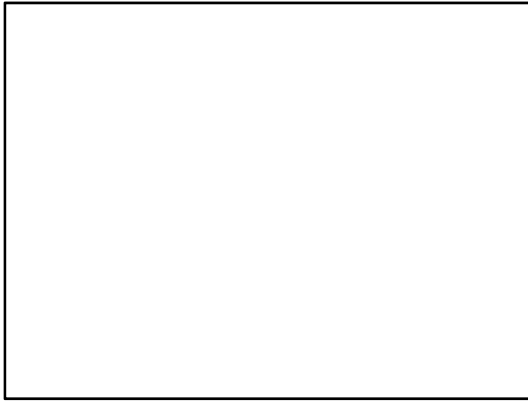
Si se consideran los valores medios, la introducción de caucho en un 5 % del volumen del árido, ya sea fino o grueso, aumenta la resistencia a tracción del hormigón. Esto puede ser debido a que el caucho es un material mucho más dúctil que el árido y, en pequeñas cantidades, puede mejorar las propiedades elásticas del hormigón sin perjudicar la adherencia entre el NFU y la pasta de cemento. Esta elasticidad se ha podido observar en las probetas ensayadas, ya que cuando rompían a tracción se fracturaban a lo largo del plano diametral pero sin llegar a separarse en dos trozos. En el caso de los hormigones con un 10 % y 15 % del volumen del árido sustituido por NFU disminuye la resistencia a tracción respecto al hormigón convencional.

Analizando los datos del Gráfico 2.6 más detenidamente, se puede detectar un pequeño incremento de la resistencia en los hormigones con NFU fino, respecto a los hormigones con NFU grueso. Esto puede ser debido a que el grano fino tiene una mejor adherencia con la pasta ya que tiene una geometría mucho más esférica, consiguiendo un recubrimiento de prácticamente toda su superficie por la pasta, a pesar de no ser tan buena como la adherencia entre el árido y la mezcla.

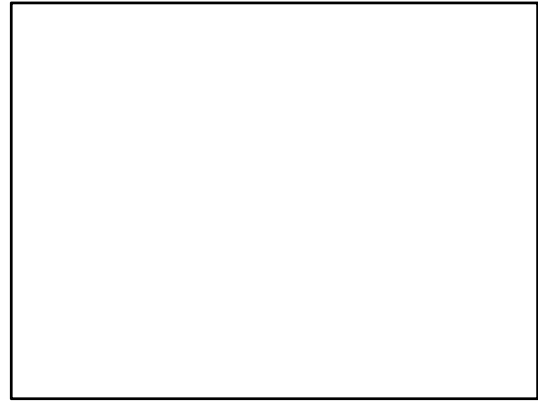
A pesar de que las medias aritméticas de los resultados obtenidos varían un poco entre los diferentes hormigones, se puede considerar que todos ellos tienen el mismo nivel de resistencia y, por tanto, la sustitución del árido por NFU no altera la resistencia a tracción.

A continuación se muestra una secuencia de imágenes de probetas de hormigón con NFU ensayadas a tracción indirecta (Fotografías 2.13 y 2.14). En vista de que ninguna de ellas se separó en dos pedazos después de ser ensayadas, se ha decidido acabar de seccionar las probetas para poder observar su aspecto interior.

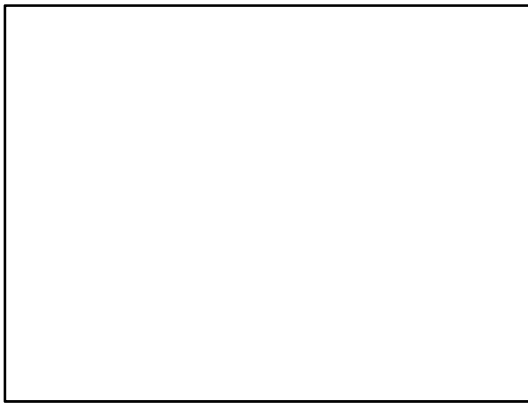
El resultado visual del ensayo determina que el caucho funciona como una fibra de unión entre los componentes de las probetas ensayadas a tracción indirecta facilitando la deformación del hormigón antes que su separación. Los granos de NFU, a diferencia de los áridos convencionales, no se rompieron al fraccionar en dos partes las probetas, sino que se despegaron de la pasta de cemento.



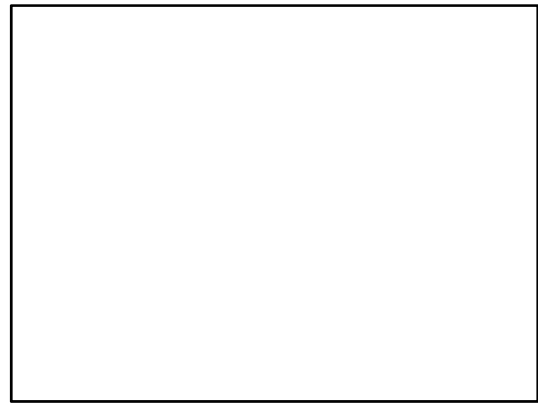
Fotografía 2.13.1



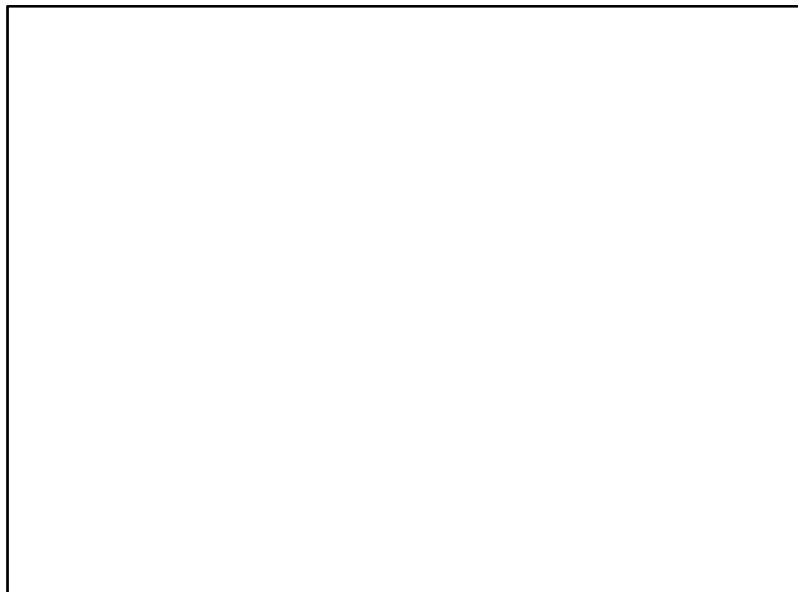
Fotografía 2.13.2



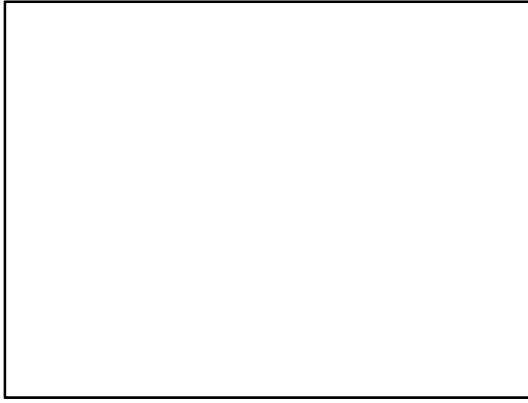
Fotografía 2.13.3



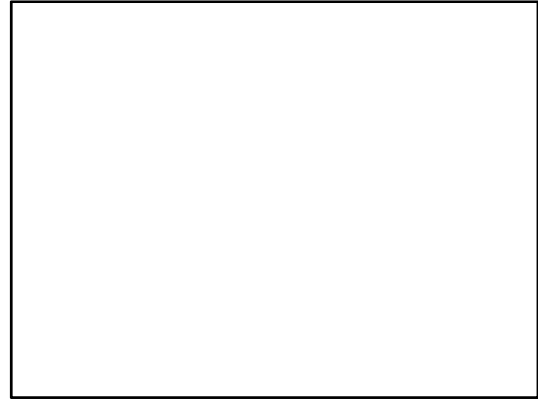
Fotografía 2.13.4



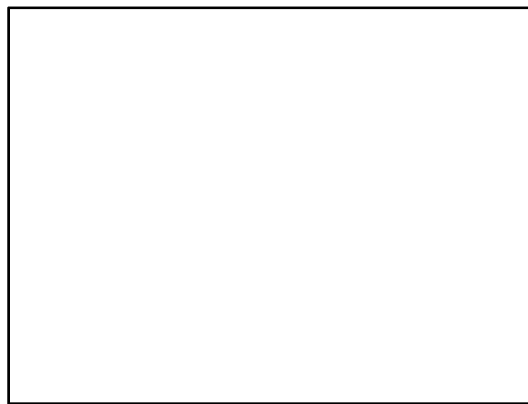
Fotografía 2.13: Probeta de hormigón H15%-NFU-G sometida al ensayo de tracción indirecta.



Fotografía 2.14.1



Fotografía 2.14.2



Fotografía 2.14.3



Fotografía 2.14: Probeta de hormigón H15%-NFU-F sometida al ensayo de tracción indirecta.

2.6 MÓDULO DE ELASTICIDAD

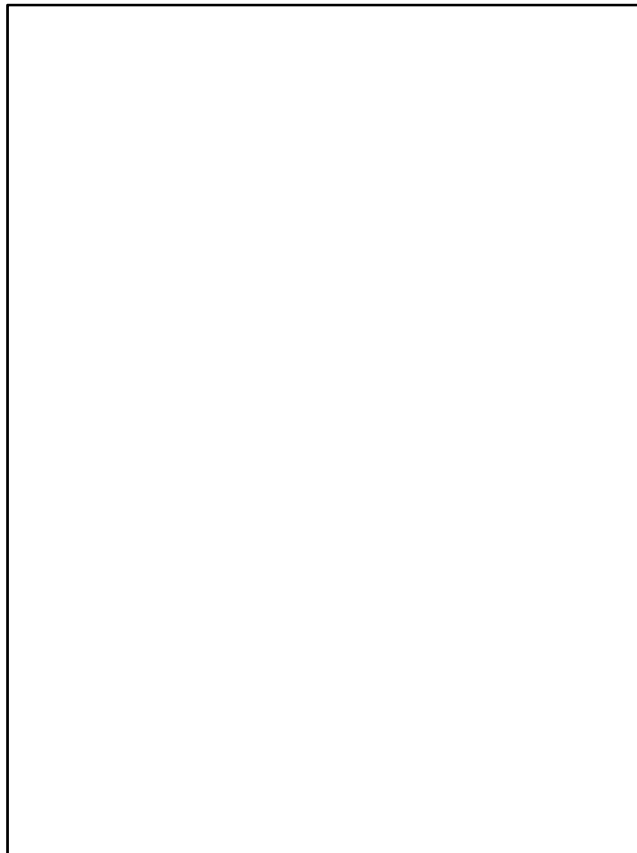
2.6.1 INTRODUCCIÓN

Este ensayo describe un método para la determinación del módulo de elasticidad estático en compresión del hormigón endurecido, más conocido como módulo de Young E, y permite medir la deformación que experimenta el hormigón al recibir una cierta tensión.

El ensayo del módulo de elasticidad se ha realizado siguiendo la UNE 83316:1996 [16].

2.6.2 EQUIPOS UTILIZADOS

Máquina de ensayo: aparato capaz de aplicar la carga de ensayo a la velocidad especificada y de mantenerla en el escalón correspondiente. Está equipada con todos los instrumentos necesarios para medir los cambios de longitud (véase *Fotografía 2.15*), y consta de una base de medida superior a $\frac{2}{3}$ del diámetro de la probeta de ensayo que permite su colocación de modo que los puntos de medida son equidistantes de las bases de la probeta y a una distancia no menor de $\frac{1}{4}$ de la altura de la misma.

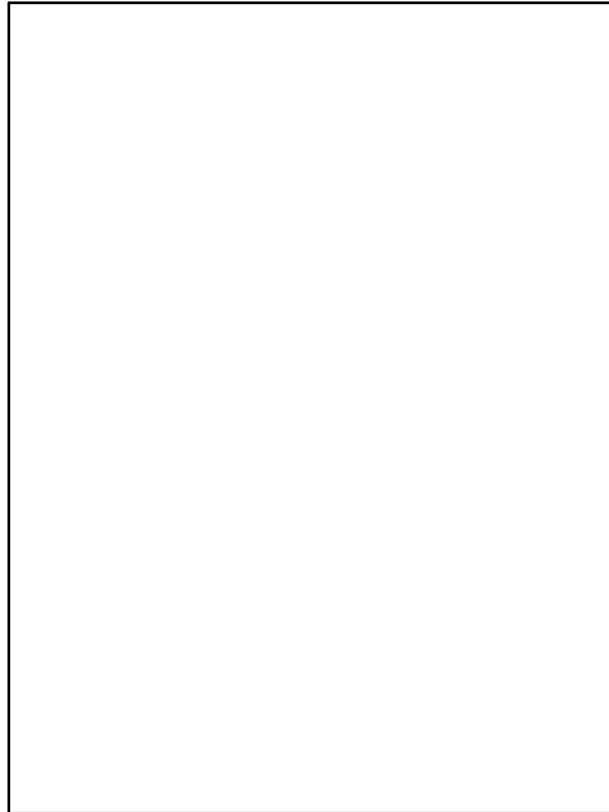


Fotografía 2.15: Máquina de ensayo del módulo de elasticidad.

2.6.3 PROCESO DE ELABORACIÓN

Para realizar el ensayo del módulo de elasticidad se han utilizado tres probetas cilíndricas con un diámetro de 10 cm y una altura de 20 cm de cada tipo de hormigón, con la cara superior refrentada utilizando el mismo método explicado en el ensayo a compresión.

La probeta se situaba centrada en el plato inferior y se colocaba el instrumento de medida de forma que se pudieran realizar lecturas a $\frac{1}{4}$ de la base inferior y a un $\frac{1}{4}$ de la base superior de la misma, como muestra la *Fotografía 2.16*. A continuación se le aplicaba una tensión inicial (σ_b) de 0,5 N/mm².



Fotografía 2.16: Probeta centrada en el plato inferior y con el instrumento de medida colocado.

La tensión se incrementaba a una velocidad de $0,5 \pm 2$ N/mm² por segundo hasta que la tensión alcanzaba $\frac{1}{3}$ de la resistencia a compresión del hormigón.

$$\sigma_a = f_c/3$$

Siendo:

σ_a la tensión máxima aplicada (N/mm²);
 f_c la resistencia a compresión (N/mm²).

Esta carga se mantenía durante 60 segundos y se registraba la deformación medida, tomando lecturas de cada línea de medida con intervalos de 30 segundos. Después se reducía la carga, a la misma velocidad que durante el proceso de carga, hasta el nivel de tensión inicial (0,5 N/mm²). Se realizaron dos ciclos más de carga-descarga, utilizando las mismas velocidades, y se mantuvieron las tensiones (σ_a y σ_b) constantes durante 60 segundos. Después de terminar el último ciclo y de esperar un período de 60 segundos

manteniendo la tensión $\sigma_b = 0,5 \text{ N/mm}^2$, se registraban las lecturas de las deformaciones (ϵ_b) tomadas al cabo de 30 segundos. Para finalizar, se volvía a cargar la probeta hasta la tensión σ_a , a la velocidad especificada, y se registraban en este caso las lecturas de las deformaciones relativas (ϵ_a) tomadas también a los 30 segundos.

Al someter la probeta de hormigón a una sollicitación de compresión hasta una tensión inferior a la de rotura, se pueden determinar los acortamientos unitarios que experimenta en función de las tensiones a que está sometida, obteniendo la curva del módulo de elasticidad del hormigón tal y como muestra la *Figura 2.3*:

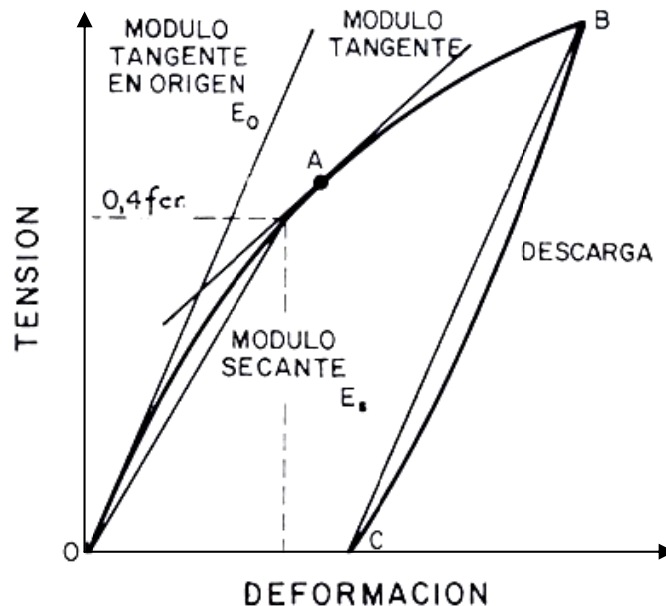


Figura 2.3: Módulos de elasticidad del hormigón.

Fuente: "Hormigón", de Manuel Fernández Cánovas [2].

La deformación del hormigón no cumple la ley de Hooke y el valor del módulo de Young E depende de las consideraciones que se hagan en su determinación, de tal manera que se pueden señalar tres módulos para una misma curva de tensión/deformación:

1. Módulo tangente en el origen (E_0).
2. Módulo tangente en un punto cualquiera de la curva correspondiente a una tensión $f_c A$.
3. Módulo secante (E_s) definido por la recta que une el origen con el punto que corresponde a una fracción de la tensión de rotura.

En este ensayo se ha aplicado una tensión σ_a hasta alcanzar el punto B y posteriormente se descargaba de forma lenta obteniendo la curva descendente BC, en la que se ve que la pieza no recupera su longitud inicial quedando, por tanto, con una deformación remanente OC. El módulo de elasticidad tangente en el origen (E_0) se puede determinar a partir de la pendiente de la recta BC.

Por último, se colocaba la probeta en la máquina de ensayo a compresión y se le aplicaba la carga máxima que era capaz de soportar hasta llegar a la rotura, para comprobar que estas probetas no tuvieran una resistencia a compresión muy variable

respecto a la f_c . Para considerar los valores obtenidos en este ensayo como fiables, los resultados de resistencia a compresión de las probetas ensayadas en el módulo de elasticidad deben diferir en menos del 20 % del valor de la f_c . En este proyecto todos los resultados obtenidos en este ensayo entraban dentro de ese rango.

Para determinar el módulo de elasticidad se han utilizado las medias aritméticas de los valores σ y ε de las tres probetas ensayadas de cada hormigón, y se calculaba la siguiente ecuación:

$$E_c = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b}$$

Siendo:

- E_c el módulo elástico estático en compresión (N/mm^2), para valores superiores a 10.000 N/mm^2 se redondea a 500 N/mm^2 , y para valores por debajo de 10.000 N/mm^2 se redondea a 100 N/mm^2 ;
- σ_a la tensión en el escalón correspondiente a $\sigma_a = f_c/3$ (N/mm^2);
- σ_b la tensión inicial ($0,5 \text{ N/mm}^2$);
- ε_a la deformación media bajo el nivel de carga máxima (mm);
- ε_b la deformación media bajo el nivel de esfuerzo base de carga (mm).

Los componentes del hormigón, considerados aisladamente, tienen módulos de elasticidad muy diferentes, siendo el de los áridos el más elevado dependiendo de la naturaleza de éste, mientras que el de la pasta de cemento es más bajo, de acuerdo con la *Figura 2.4*. El comportamiento del conjunto está muy influenciado por las microfisuras que aparecen en la interfase pasta-árido al someter el hormigón a una carga y que hacen que la curva deje de ser lineal. Esto significa que la forma de los áridos y su textura superficial también afectan al módulo de elasticidad debido a su influencia en la formación de microfisuras.

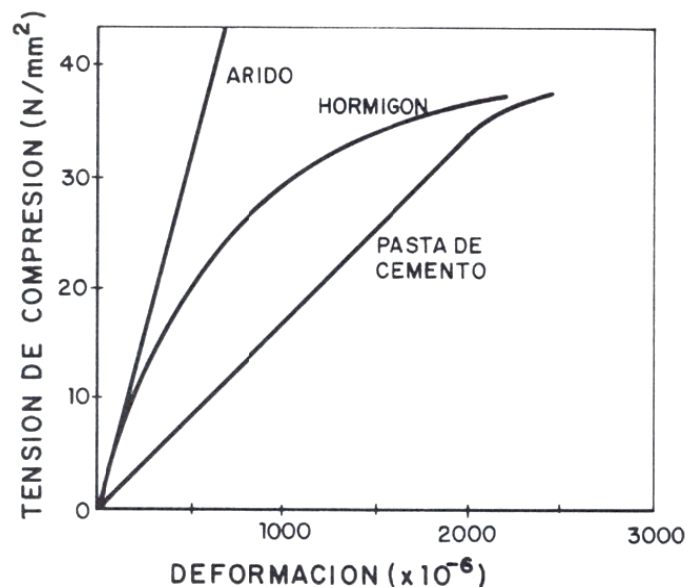


Figura 2.4: Módulos de elasticidad de los diferentes componentes del hormigón.

Fuente: "Hormigón", de Manuel Fernández Cánovas [2].

2.6.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla 2.8: Resultados del ensayo del módulo de elasticidad.

Tipo de hormigón	Módulo - E (N/mm ²)	Valor relativo (%)
HS/C	34309,03	100
H5%-NFU-F	31278,74	91,17
H10%-NFU-F	31381,26	91,47
H15%-NFU-F	29963,34	87,33
H5%-NFU-G	33933,75	98,91
H10%-NFU-G	30073,15	87,65
H15%-NFU-G	29429,67	85,79

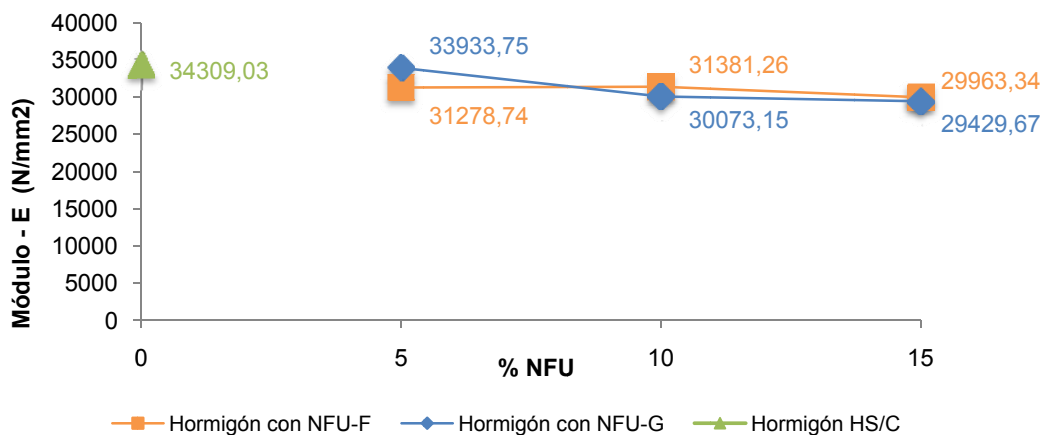


Gráfico 2.15: Resultados del ensayo de módulo de elasticidad

Los hormigones con NFU tienden a disminuir su módulo de elasticidad a medida que aumenta el contenido de éste. Como se ha visto antes, el árido tiene un módulo de elasticidad superior al de la pasta de cemento. Al sustituir parte del volumen de este árido por un material mucho más elástico como es el caucho, disminuye su módulo de Young E. El hormigón con NFU tiene una gran facilidad para deformarse en presencia de una sollicitación de compresión, creando unas tensiones internas dentro de la pasta de cemento que favorecen la aparición de microfisuras entre el árido y la pasta.

En los resultados obtenidos en la *Tabla 2.8* y representados en el *Gráfico 2.15*, no se aprecia ninguna variación del módulo de elasticidad relacionada con el tamaño del NFU sustituido.

2.7 COMPORTAMIENTO AL FUEGO

2.7.1 INTRODUCCIÓN

Debido a la naturaleza del material reciclado se considera oportuno el conocimiento del comportamiento de estos hormigones sometidos a altas temperaturas. De acuerdo con lo expuesto por Büthe et al. en el artículo “Productos de combustión del caucho” [25], los incendios de caucho son extremadamente fuertes y emiten gran cantidad de humo y de productos peligrosos. En este proyecto se ha realizado una primera aproximación para poder determinar las cualidades de combustibilidad del hormigón con NFU, sin embargo, se recomienda profundizar sobre el tema en próximos estudios.

El ensayo de reacción al fuego se ha realizado siguiendo la UNE-EN ISO 1182:2002 [17].

2.7.2 EQUIPOS UTILIZADOS

Horno: (1) horno compuesto esencialmente por un tubo refractario rodeado de un arrollamiento calefactor y de un aislamiento. En la base del horno se fija un estabilizador de caudal de aire de forma cónica, que está fabricado a partir de una chapa de acero de 1 mm de espesor, con la superficie interior lisa.

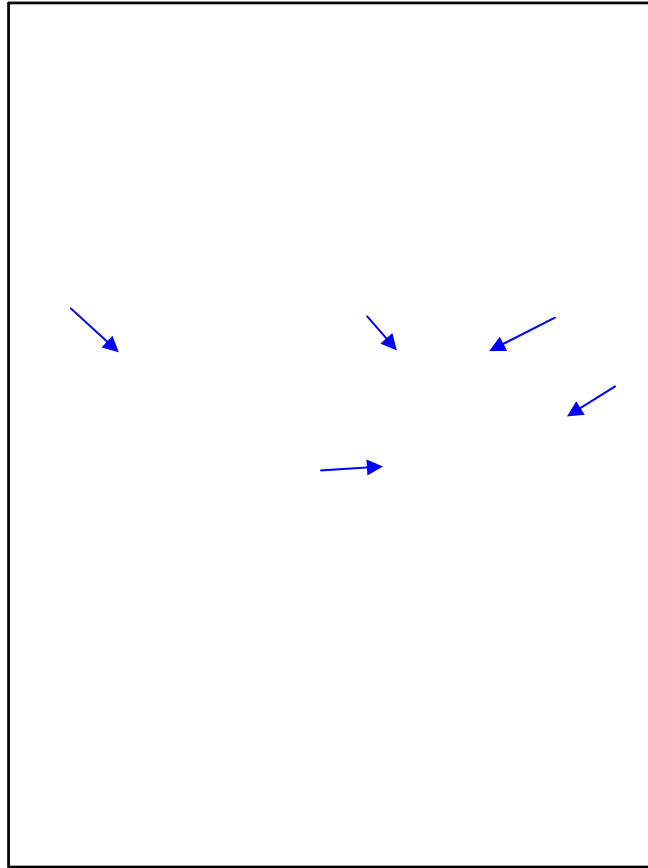
Porta-probetas: (2) recipiente fabricado con hilo de acero refractario cilíndrico de 45 mm de diámetro y 50 mm de altura. En su parte inferior se sitúa una rejilla de hilo de acero fino refractario. Está provisto de un dispositivo de introducción apropiado que permite el descenso en el eje del horno con precisión y sin choques, de forma que la probeta queda situada rígidamente en el centro geométrico del horno durante el ensayo.

Termopares: (3) se utilizan tres termopares blindados con acero inoxidable, para poder registrar de forma continua las diferentes temperaturas, dependiendo de su colocación. Se colocará un termopar en el centro de la probeta a una profundidad de 25 mm para registrar la temperatura interior de la misma (1), otro en la superficie de la probeta para determinar la temperatura superficial de ésta (2), y el tercer termopar indicará la temperatura interior del horno colocado a una altura que corresponda al centro del tubo del horno (3).

Registrador de temperatura: (4) aparato digital provisto de tres canales capaz de registrar de forma continua la tensión de salida de los tres termopares con una aproximación de 1 °C.

Controlador de temperatura: (5) aparato diseñado para regular las velocidades de calentamiento y enfriamiento y, para determinar la temperatura máxima deseada en el interior del horno. Es capaz de controlar la temperatura gracias a un cuarto termopar que va introducido en el interior del horno. Se pueden programar hasta cuatro rampas de diferentes temperaturas y duraciones, de esta forma, es posible establecer subidas de temperatura con una duración determinada, estabilizarse en esta temperatura y descender en el tiempo deseado.

Los distintos equipos utilizados en el ensayo de absorción capilar quedan recogidos en las *Fotografías 2.17 y 2.18*, así como en las *Figuras 2.5 y 2.6*.



Fotografía 2.17: Aparatos utilizados para el ensayo de reacción al fuego.

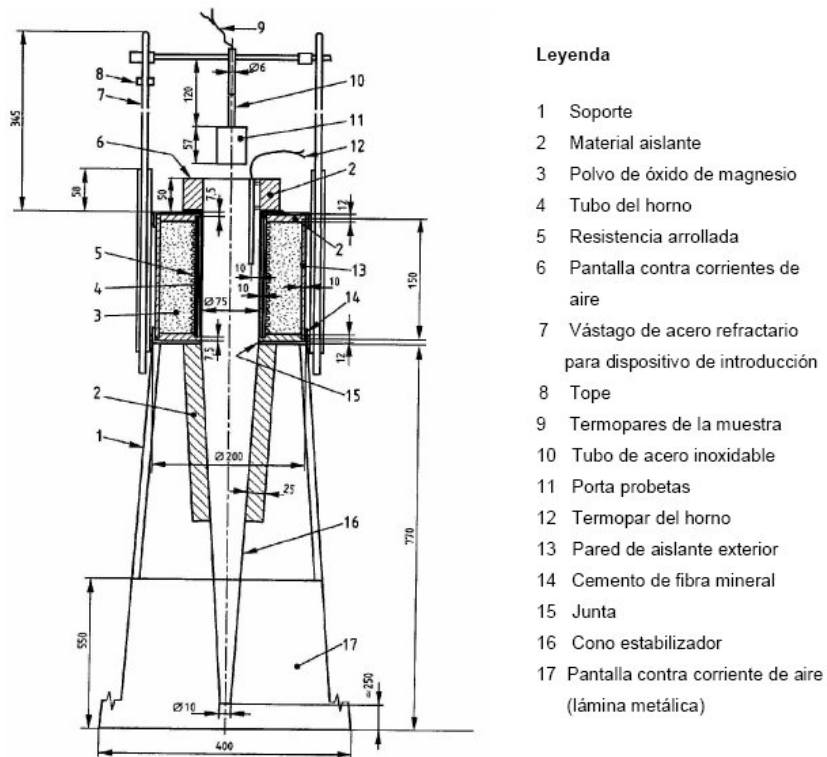
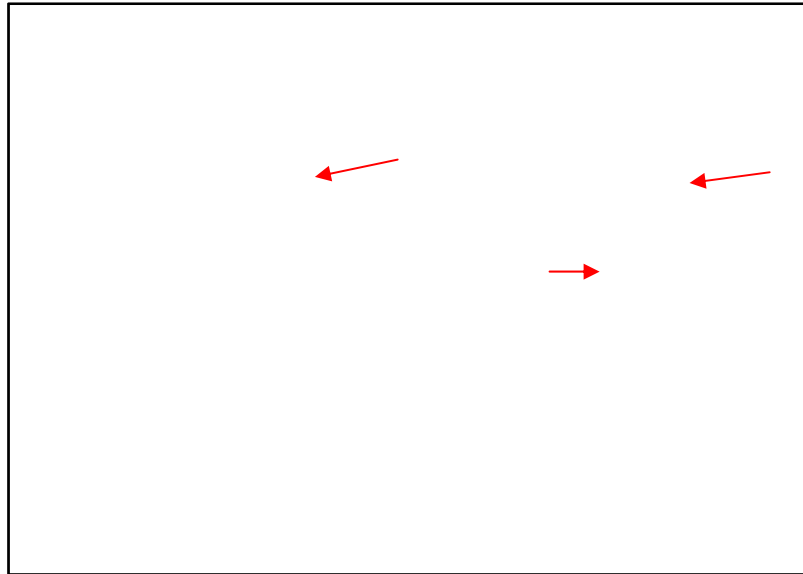


Figura 2.5: Esquema del horno según la UNE-EN ISO 1182:2002 [17].



Fotografía 2.18: Identificación de los termopares utilizados.

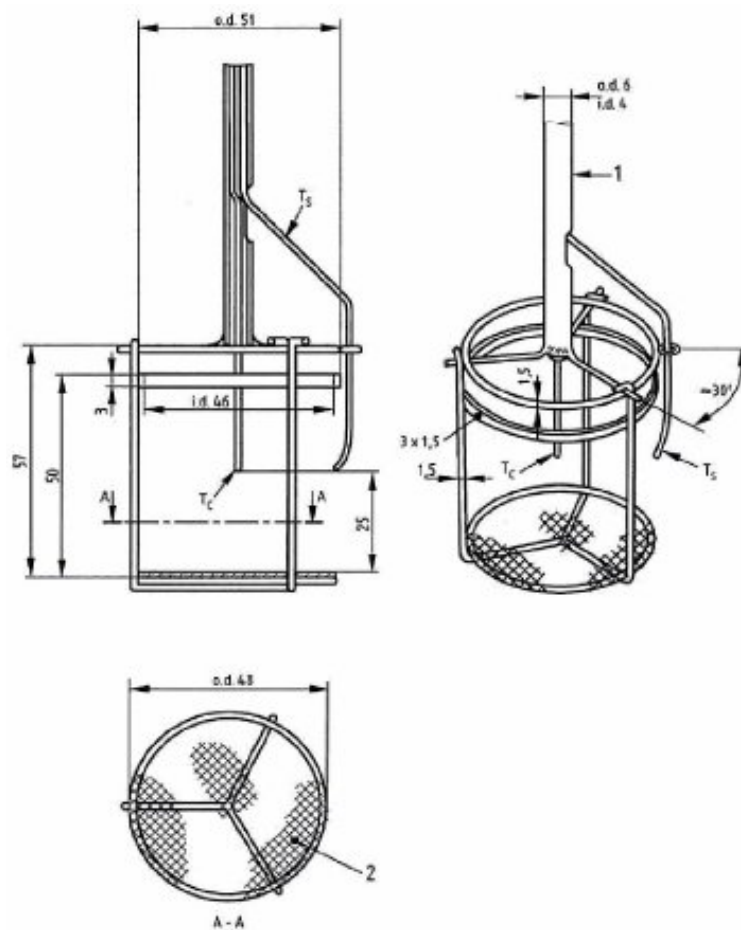


Figura 2.6: Esquema del porta-probetas según la UNE-EN ISO 1182:2002 [17].

2.7.3 PROCESO DE ELABORACIÓN

Se realizó un ensayo previo para comprobar si realmente era adecuado utilizar el ensayo de no combustibilidad para determinar el comportamiento al fuego de los hormigones fabricados. Para ello, se cortaron tres muestras cuadradas del hormigón H-5%-NFU-F de 7 x 7 cm y 2 cm de espesor y, se utilizó el equipo de goteo según la UNE 23-725-90 [23]. Éste consta básicamente de un radiador eléctrico colocado horizontalmente hacia abajo y, un porta-probetas cuya distancia al radiador se puede regular (véase *Figura 2.7*). Sobre la probeta se instalaron dos termopares para medir la temperatura en la superficie de la misma y poder determinar la temperatura de ignición en caso de que ésta se produjera. El ensayo duró aproximadamente 30 minutos y se alcanzó una temperatura máxima de 570 °C. Durante ese tiempo se pudo observar una dilatación de la masa del caucho y olor a goma quemada. En ningún momento aparecieron humos ni llamas. En vista de los resultados del ensayo previo, se optó por realizar el ensayo de no combustibilidad que a continuación se detalla.

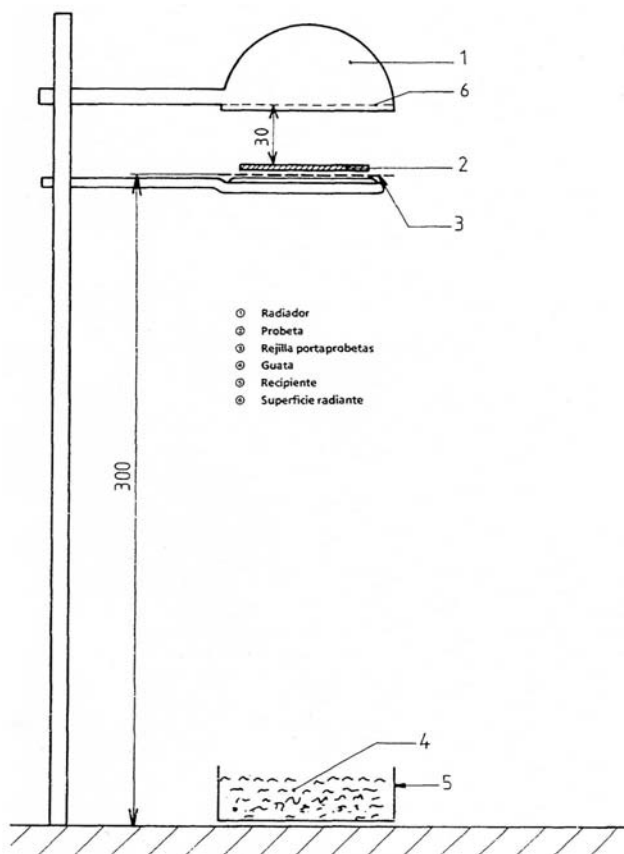


Figura 2.7: Esquema del equipo de goteo según la UNE 23-725-90 [23].

Para realizar el ensayo se han utilizado cinco probetas cilíndricas con un diámetro de 4,5 cm y una altura de 7 cm de cada tipo de hormigón. Antes de comenzar el ensayo se adaptaron las probetas fabricadas en función de las dimensiones del porta-probetas 4,5 cm de diámetro y 5 cm de altura, y se hizo un taladro en el centro de cada probeta con una profundidad aproximada de 2,5 cm.

Una vez preparadas las probetas, se colocaron una tras otra en el porta-probetas asegurándose de que los tres termopares estuvieran correctamente colocados. A

continuación, se situaba el porta-probetas centrado dentro del horno con la ayuda de un dispositivo indicado para su introducción.

En este proyecto, se ha querido estudiar el comportamiento del hormigón con NFU en relación al del hormigón convencional sometido a altas temperaturas y, para ello, se han establecido tres puntos relacionados con la reacción al fuego de especial interés:

1. Influencia de la velocidad del incremento de temperatura en las probetas ensayadas.
2. Afectación del hormigón sometido a altas temperaturas en su resistencia a compresión.
3. Pérdida de peso de los hormigones debido al aumento de la temperatura.

Para determinar el primer aspecto, se ensayaron dos probetas de cada hormigón. A una de ellas se le aplicaba una subida de temperatura constante durante dos horas, alcanzando al cabo de las dos horas los 800 °C. Durante 30 minutos permanecía a esta temperatura y después se retiraba la probeta del horno. A este proceso se le denominaba “calentamiento lento”. A continuación, se introducía la segunda probeta con el horno caliente a 800 °C y permanecía en su interior durante 30 minutos. Transcurrido este tiempo, se retiraba también. Este último recibía el nombre de “calentamiento rápido”.

Las probetas ensayadas con hormigón de NFU quedaron muy afectadas por la acción de la temperatura, tanto las sometidas a calentamiento lento como a calentamiento rápido.

A la hora de llevar a cabo el ensayo, éste ha sido adaptado en función de los resultados obtenidos en el laboratorio. Al someter los hormigones con NFU a un calentamiento rápido, las probetas inflamaban tal y como muestra la *Fotografía 2.19* aproximadamente a los dos minutos de ser introducidas dentro del horno, produciendo humos, llamas y olores, que en el caso de los hormigones con alto porcentaje de caucho era insoportable. Por ese motivo, los hormigones con NFU-G no se ensayaron en el calentamiento rápido y, en el caso del hormigón H15%-NFU-G tampoco en el calentamiento lento.

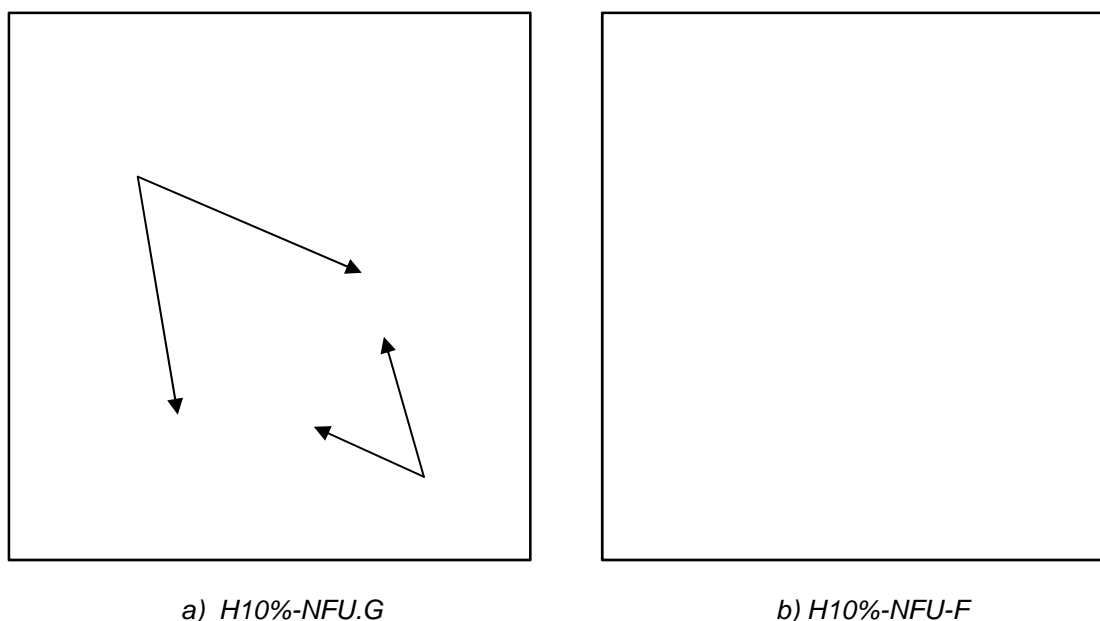


Fotografía 2.19: Probeta de hormigón H15%-NFU-F ensayada a calentamiento rápido a 800 °C.

Al observar detenidamente las probetas de hormigón con NFU-G, se observó la presencia de unos residuos de tonalidad blanca y textura muy fina y, otros de color verdoso, tal y como muestra la *Fotografía 2.20 a)*.

Según Bütthe et al. en el artículo “Productos de combustión del caucho” [25], los efluentes resultantes de la combustión del caucho se pueden distinguir entre: gases altamente volátiles, compuestos semivolátiles, hollín y residuos. Los residuos obtenidos son óxidos metálicos, principalmente óxido de zinc.

A partir de las investigaciones de Bütthe et al. [25] se cree que los residuos detectados al realizar el ensayo, pueden deberse a la aparición de algún óxido.



Fotografía 2.20: Probetas de hormigón ensayadas a calentamiento rápido a 800 °C.

Al ver el efecto destructor de las altas temperaturas en las probetas con NFU, se optó por calentar otras probetas a una temperatura inferior para que el hormigón no estuviera tan dañado, ya que se rompían en el proceso de manipulación para extraerlas del porta-probetas y era imposible realizar el ensayo de resistencia a compresión con ellas. Según el Proyecto Final de Carrera de Óscar Somoza “Estudio experimental sobre los efectos del fuego en el hormigón” [29], los hormigones fabricados con cemento portland y sometidos a una temperatura de 400 °C ofrecen una resistencia a compresión del 80 %. A partir de esta temperatura, la disminución de la resistencia es más significativa, viéndose reducida a la mitad a los 600 °C. En base a los datos anteriores se decidió someter dos probetas de cada hormigón a 400 °C, con el horno preparado a esta temperatura durante 30 minutos (calentamiento rápido). Posteriormente se ensayaron a compresión y se registraron los resultados.

Estas últimas probetas ensayadas a 400 °C fueron las utilizadas también para determinar la pérdida de peso como consecuencia del aumento de la temperatura. Para ello, se

anotaban los pesos de cada una de las probetas instantes antes de someterlas al ensayo de comportamiento al fuego y una hora después de la finalización del mismo.

También hubo reacciones inesperadas cuando se ensayaron las probetas a 400 °C. Los hormigones con NFU-G en este caso no inflamaron, pero quedaron gravemente afectados como se observa en la *Fotografía 2.21*. Las probetas fueron extraídas con mucha dificultad del porta-probetas para no causarles ningún daño, pero todos los intentos fueron inútiles, ya que se fraccionaban por las zonas donde había algún grano de caucho, imposibilitando su posterior pesada y ensayo de resistencia a compresión. A consecuencia de esta degradación del hormigón con NFU, no se han podido determinar las pérdidas de peso de los hormigones con NFU-G debido al aumento de temperatura, ni su influencia en la resistencia a compresión de los mismos.



Fotografía 2.21: Probetas de hormigón NFU-G sometidas a 400 °C (calentamiento rápido).

2.7.4 RESULTADOS OBTENIDOS

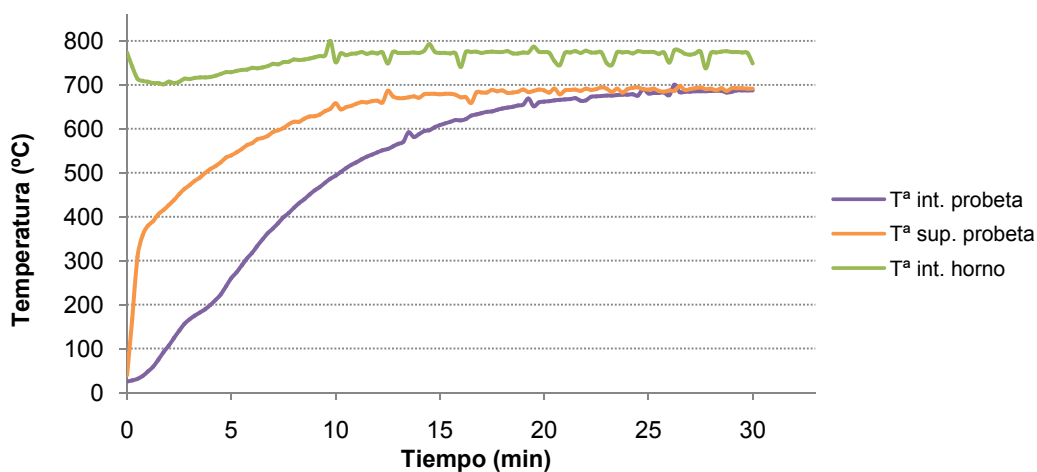


Gráfico 2.8: Comportamiento al fuego de una probeta de hormigón S/C (calentamiento rápido).

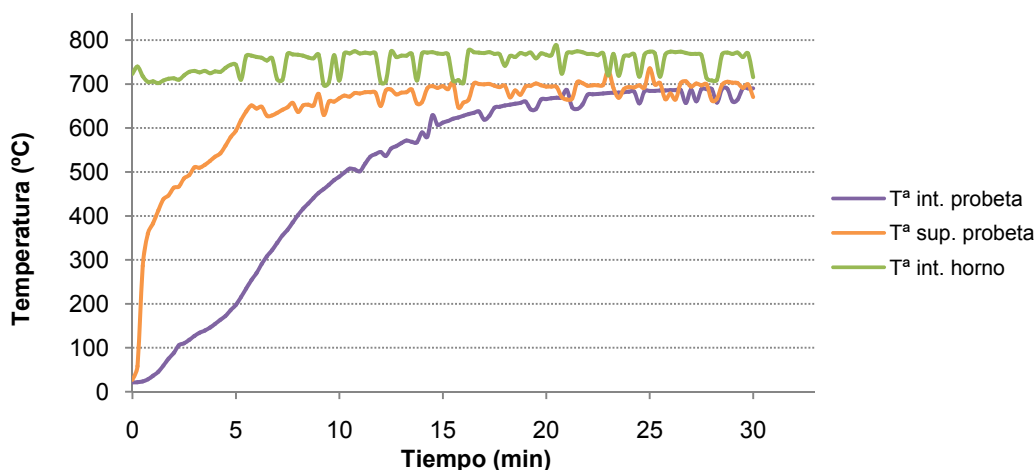


Gráfico 2.9: Comportamiento al fuego de una probeta de hormigón H10%-NFU-F (calentamiento rápido).

En todos los hormigones ensayados a 800 °C mediante el calentamiento rápido se observa que, la temperatura del horno disminuye cuando se introduce la probeta fría en su interior y luego se estabiliza hasta los 800 °C. La temperatura superficial de la probeta aumenta muy rápidamente (en pocos minutos llega a 600 °C), mientras que en el interior de la probeta se tarda más tiempo en alcanzar una temperatura elevada. Este incremento de la temperatura superficial es debido a la inflamación del caucho, alcanzando en tan solo 5 minutos los 600 °C en el caso del hormigón con NFU, mientras que el hormigón de referencia lo hizo en 7 minutos como se puede ver en el *Gráfico 2.8*.

En el *Gráfico 2.9* se observan oscilaciones mayores en las curvas, causadas por la presencia de llamas dentro del horno. La temperatura del horno está fijada a 800 °C y el controlador regulaba la potencia suministrada para poder estabilizar el horno, pero en presencia de llama la temperatura en su interior aumentaba y el controlador debía disminuir la potencia. En el momento en que la llama se extinguió la temperatura interior del horno volvía a disminuir y, en este caso, el controlador debía aumentar la potencia. Estas continuas variaciones de temperatura son las que se muestran en el *Gráfico 2.10*.

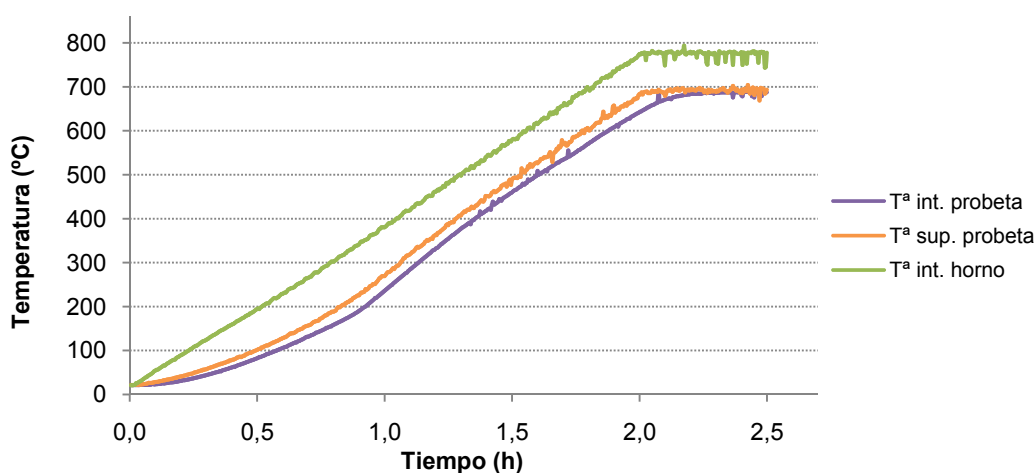


Gráfico 2.10: Comportamiento al fuego de una probeta de hormigón S/C (calentamiento lento).

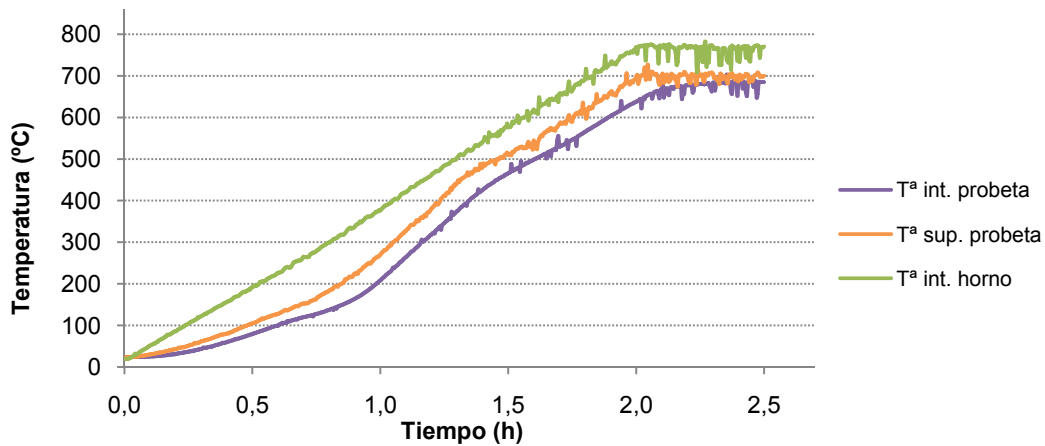


Gráfico 2.11: Comportamiento al fuego de una probeta de hormigón H10%-NFU-F (calentamiento lento).

Los hormigones con NFU ensayados a calentamiento lento muestran un mayor incremento de la temperatura superficial de la probeta respecto al hormigón de referencia. Del mismo modo que ocurría en el calentamiento rápido, la presencia de caucho provoca unas oscilaciones en las temperaturas aunque en este caso son menores, ya que no hay presencia de llama pero sigue existiendo una combustión.

No se aprecian grandes diferencias en la temperatura interior de la probeta de los hormigones con NFU en relación al hormigón convencional. Debido a esto, se ha optado por mostrar en los siguientes gráficos únicamente la temperatura de la superficie de la probeta.

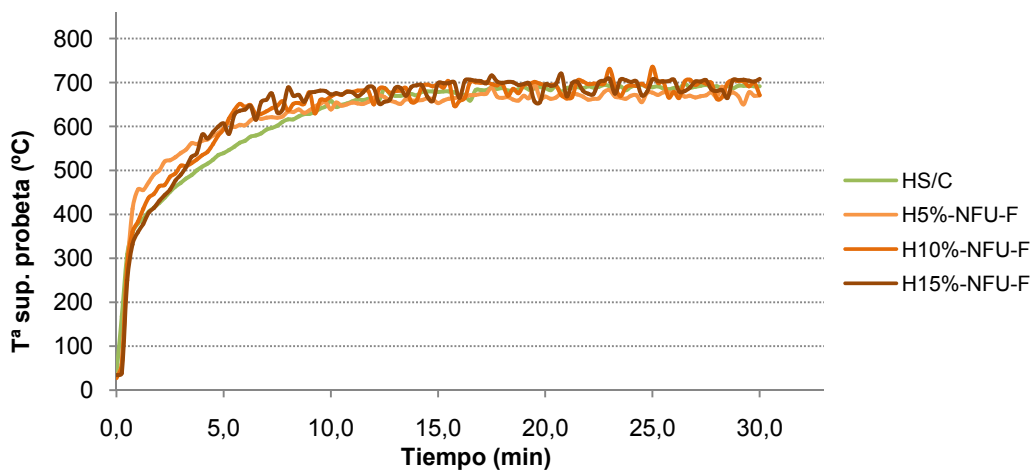


Gráfico 2.12: Comportamiento de todos los hormigones ensayados (calentamiento rápido).

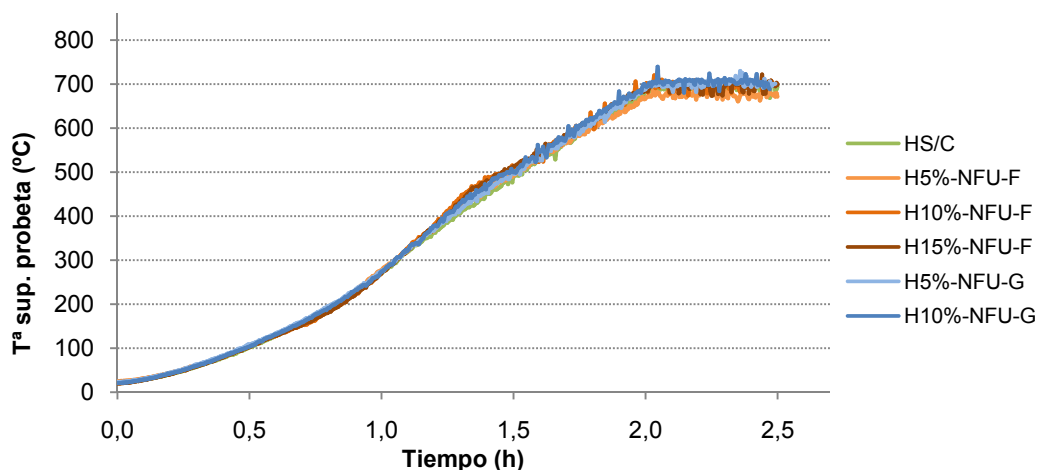


Gráfico 2.13: Comportamiento de todos los hormigones ensayados (calentamiento lento).

En el caso del calentamiento lento, como ya se ha dicho anteriormente no se observaron llamas, aunque se produjo un proceso de combustión del caucho. Las diferencias entre los distintos casos de hormigones no son tan marcadas como en el caso del calentamiento rápido, sin embargo se detecta un aumento de temperatura mayor para las probetas con mayor porcentaje de caucho (véase Gráfico 2.13).

Tabla 2.9: Resultados de pérdida de peso de los hormigones con NFU-F sometidos a 400 °C.

Tipo de hormigón	Probetas	Peso inicial (p_i) (g)	Peso final (p_f) (g)	Pérdida de peso (g)	Pérdida de peso medio (%)
HS/C	A	179,77	176,36	3,41	1,95
	B	181,29	177,58	3,71	
H5%-NFU-F	A	171,79	168,43	3,36	2,07
	B	173,31	169,55	3,76	
H10%-NFU-F	A	172,31	167,35	4,96	2,92
	B	175,77	170,48	5,29	
H15%-NFU-F	A	171,63	166,05	5,58	3,15
	B	169,77	164,57	5,20	

Tal como era de esperar la pérdida de peso es mayor en las probetas con mayor porcentaje de caucho de acuerdo a los resultados recogidos en la Tabla 2.9. Hay que recordar que las probetas con caucho de mayor tamaño, debido a que se rompieron durante su manipulación, no han sido consideradas en este análisis.

Tabla 2.10: Resultados de resistencia a compresión de los hormigones con NFU-F sometidos a 400 °C.

Tipo de hormigón	Probetas	Resistencia a compresión (N/mm ²)
HS/C	A	21,07
	B	28,33
H5%-NFU-F	A	19,34
	B	5,79
H10%-NFU-F	A	5,28
	B	8,62
H15%-NFU-F	A	16,03
	B	21,07

Los resultados obtenidos en la *Tabla 2.10* a primera vista resultan sorprendentes. Una inspección visual de las probetas ensayadas indica claramente que las que tienen un mayor contenido de caucho presentan un aspecto mucho más deteriorado así como una mayor disminución en sus propiedades mecánicas (de hecho es posible romper algunas de las probetas con las manos). Ahora bien, a la hora de cuantificar esta disminución de propiedades mecánicas mediante el ensayo de compresión nos hemos encontrado con dificultades que se reflejan en los resultados contradictorios de la tabla anterior.

Consideramos que los datos obtenidos a partir del ensayo a compresión no son fiables, ya que se ha utilizado el mismo hormigón fabricado en los ensayos anteriores para confeccionar probetas cilíndricas de 4,5 cm de diámetro y 7 cm de altura. De acuerdo con la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) [8] el tamaño máximo del árido (TMA) grueso será menor al 0,25 de la dimensión mínima de la pieza, que en este caso es:

$$\begin{aligned} \text{Dimensiones de la probeta: } & 45 \times 70 \text{ mm} \\ & 0,25 \cdot 45 \text{ mm} = 11,25 \text{ mm} \\ & \text{TMA grueso} < 11,25 \text{ mm} \end{aligned}$$

En este proyecto se ha utilizado grava con un TMA de 20 mm y granos de caucho con un tamaño máximo de 16 mm, por tanto, para la realización de este ensayo no se ha cumplido la norma.

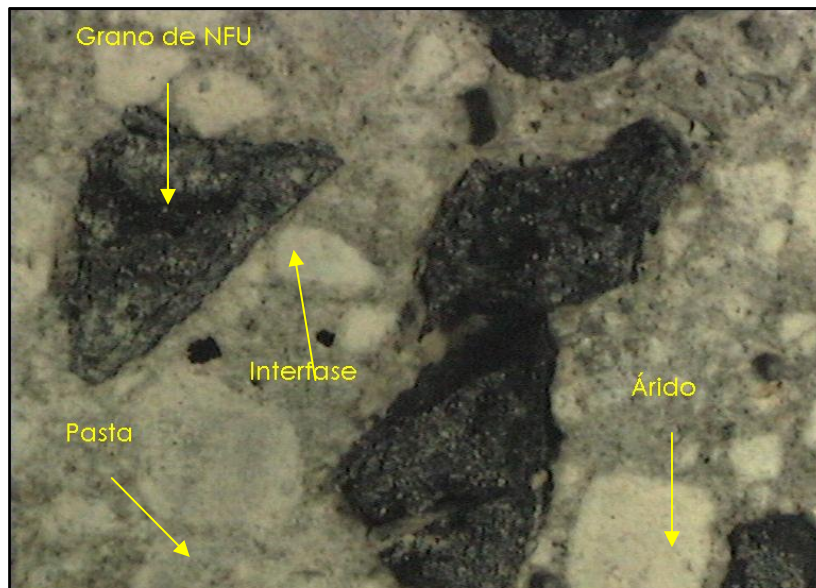
Se recomienda en futuros estudios confeccionar el hormigón para el ensayo de comportamiento al fuego independientemente del resto de hormigones, prestando especial atención al tamaño máximo del árido grueso.

Finalmente, comentar que este estudio de comportamiento al fuego únicamente pretende ser una aproximación al problema. Sería necesario desarrollarlo más ampliamente analizando un número mayor de probetas para obtener una estadística adecuada.

2.8 MICROESTRUCTURA

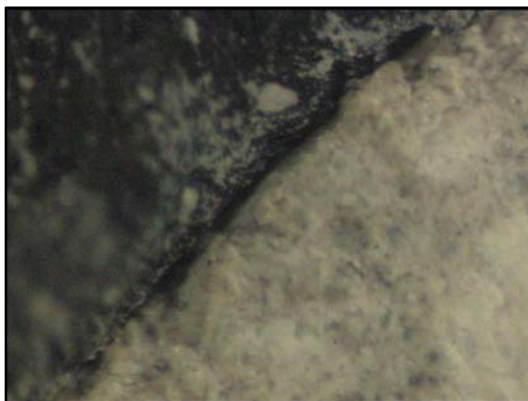
Para poder conocer los parámetros que afectan a las resistencias mecánicas del hormigón es necesario estudiar su microestructura y analizar las uniones de los diferentes componentes.

El hormigón convencional está formado por tres fases principales: los áridos, la pasta de cemento que une a los áridos y, la zona de transición formada por la interfase entre la pasta y el árido.

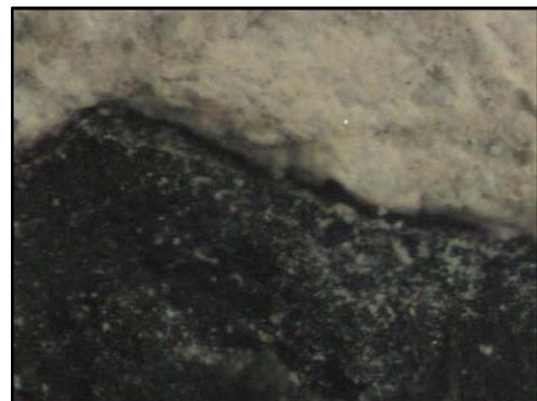


Fotografía 2.22: Fases principales que forman el hormigón con NFU (Aumento x 10).

En el caso del hormigón con NFU la fase de los áridos es heterogénea en cuanto a su naturaleza, ya que está compuesta por áridos calizos convencionales y por granos de caucho, tal y como muestra la *Fotografía 2.22*. Por tanto, la interfase pasta-árido convencional es distinta a la interfase pasta-NFU. Se ha considerado interesante examinar visualmente la unión entre los granos de caucho y la pasta de cemento, ya que presentan comportamientos mecánicos muy diferentes.



a) Aumento x 50



b) Aumento x 40

Fotografía 2.23: Interfase entre el NFU y la pasta de cemento.

Como se observa en la *Fotografía 2.23*, la superficie de los granos de NFU no está en contacto con la pasta de cemento, dando lugar a discontinuidades en el interior de la matriz del hormigón (formada por la pasta y los áridos finos). Esta baja adherencia puede ser la causa principal de la disminución de la resistencia a compresión del hormigón y del incremento de la porosidad del mismo.

Tras someter a las probetas a un tratamiento térmico de 100 °C durante el ensayo de densidad se observaron fisuras en los hormigones con NFU-G, especialmente los fabricados con un elevado porcentaje de caucho. Sin embargo, el hormigón convencional no presentó fisuras aparentes, por ese motivo se quiso analizar la microestructura de los hormigones afectados.



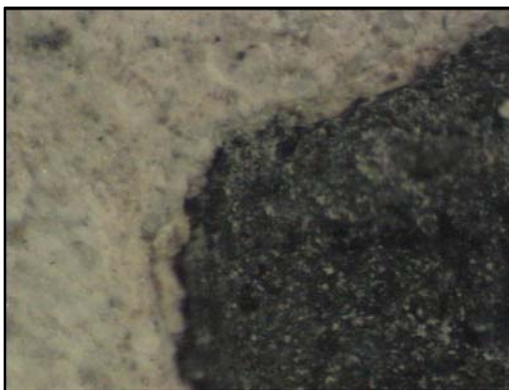
a) Aumento x 10



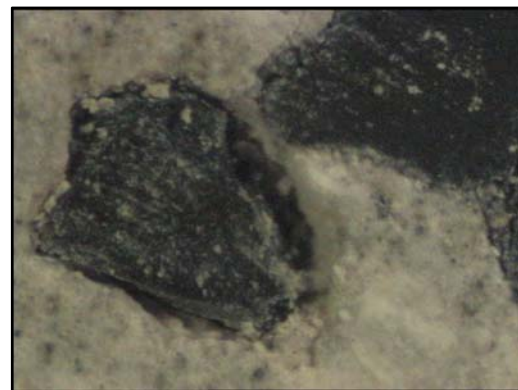
b) Aumento x 10

Fotografía 2.24: Aspecto del hormigón con NFU-G sometido a un tratamiento térmico de 100 °C.

En la *Fotografía 2.24* se confirma esta fisuración entre los granos de NFU-G y la pasta de mortero. La dilatación producida en el caucho a consecuencia del aumento de temperatura genera unas tensiones internas dentro de la matriz del hormigón que la pasta no es capaz de absorber, dando lugar a las mencionadas fisuras en la interfase. Los hormigones fabricados con un alto porcentaje de caucho experimentaban unas tensiones tan fuertes que la pasta se rompía completamente entre los granos de caucho, comunicándolos entre sí a través de las fisuras, tal y como muestra la *Fotografía 2.24 b*).



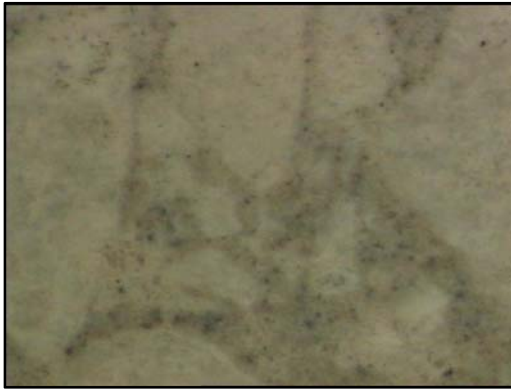
a) Aumento x 40



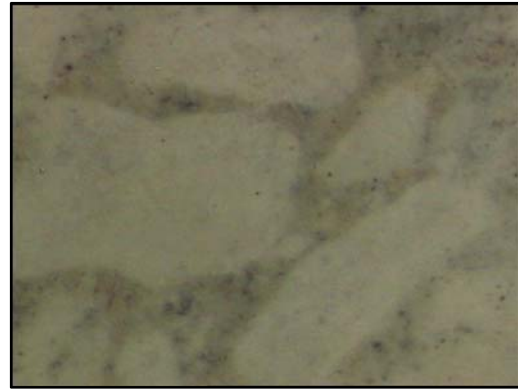
b) Aumento x 40

Fotografía 2.25: Aspecto del hormigón con NFU-F sometido a un tratamiento térmico de 100 °C.

La *Fotografía 2.25* muestra como en los hormigones con NFU-F no se observaron estas fisuras en el mortero, seguramente debido al menor volumen de los granos de caucho y, por tanto, a una concentración de esfuerzos inferior a la del hormigón con grano grueso.



a) Aumento x 25



b) Aumento x 40

Fotografía 2.26: Aspecto del hormigón de referencia sometido a un tratamiento térmico de 100 °C.

En la *Fotografía 2.26* se observa una completa continuidad entre el árido y la pasta de cemento del hormigón de referencia. En este caso el tratamiento térmico no ha afectado negativamente a la microestructura del mortero.

3. CONCLUSIONES

Tras haber realizado una serie de ensayos para evaluar la influencia de la sustitución del árido convencional por árido de NFU en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón, se han extraído las siguientes conclusiones:

Los hormigones con NFU experimentan un descenso mayor en estado fresco que el hormigón convencional, ya que el caucho es un material menos poroso que el árido convencional, obteniendo un producto más fluido a medida que disminuye el tamaño del grano de caucho.

La incorporación de NFU favorece la aparición de aire en el estado fresco del hormigón, debido a la baja adherencia entre los granos de NFU y la pasta de cemento. El caucho de menor tamaño tiene una mejor adherencia con la pasta ya que su geometría es mucho más esférica, a pesar de no ser tan buena como la del árido convencional. Como consecuencia directa de esta baja adherencia, los hormigones fabricados con NFU ofrecen una mayor absorción y porosidad, aumentando éstas con el tamaño del caucho. Lo mismo ocurre en el caso de la absorción capilar. Este incremento de huecos en la mezcla, junto con la baja densidad del caucho en relación a la del árido convencional, son factores que influyen en la disminución de la densidad del hormigón.

La resistencia a compresión del hormigón disminuye con la incorporación de caucho. Esta reducción se ve favorecida por el tamaño del grano de caucho, es decir, a medida que éste aumenta, disminuye la resistencia del hormigón. Sin embargo, esta reducción no es proporcional; los hormigones con 10 y 15 % de NFU ofrecen resistencias muy similares, mientras que para un hormigón con 20 % de NFU se observa un mayor descenso.

La resistencia a tracción del hormigón no se ve alterada por la incorporación de NFU, pero si se analizan los valores medios, se puede considerar que la resistencia a tracción experimenta un descenso mucho más discreto que la resistencia a compresión, incluso aumenta en los hormigones con 5 % de NFU. Las probetas de hormigón con NFU sometidas al ensayo de tracción indirecta, se fracturaron pero no se separaron, como consecuencia de las propiedades dúctiles del caucho.

El módulo de elasticidad disminuye a medida que aumenta el contenido de NFU, ya que se está sustituyendo el árido convencional por un material mucho más elástico. El hormigón con caucho tiene una gran facilidad para deformarse en presencia de una sollicitación de compresión inferior a la resistencia a compresión del hormigón.

En el ensayo de comportamiento al fuego se ha observado que los hormigones con NFU experimentan un proceso de combustión del caucho cuando son sometidos a altas temperaturas (800 °C), hecho que comporta un aumento de la temperatura superficial de las probetas de hormigón con NFU respecto a las de hormigón convencional. Al someter

los hormigones con NFU a un calentamiento rápido de 800 °C, éstos inflamaron produciendo humos, llamas y olores. Las probetas de hormigón con granos gruesos de caucho quedaron muy afectadas por el efecto de las altas temperaturas, hasta el punto de romperse en el proceso de manipulación para extraerlas del porta-probetas. Las probetas de hormigón con NFU sometidas a un calentamiento rápido de 400 °C experimentaron una pérdida de peso mayor que las de hormigón convencional.

En futuros estudios relacionados con el tema que nos ocupa, se recomienda ajustar las cantidades de los materiales utilizados en la fabricación del hormigón en función de la absorción de los mismos, de esta forma se mantendría constante la cantidad de agua de la pasta. También sería interesante realizar el ensayo de absorción capilar con probetas enteras, o si esto no es posible, cortadas por la mitad, pero nunca poner en contacto con el agua la cara de la probeta seccionada, ya que el caucho es un material elástico y al someterle a la acción de corte daña la pasta de cemento que lo envuelve provocando fisuras. Por último, se aconseja para el ensayo de comportamiento al fuego fabricar los hormigones prestando especial atención al tamaño máximo del árido grueso y, ensayar un número de probetas suficiente para obtener una estadística adecuada.

Es necesario un estudio de la durabilidad de los hormigones con NFU, que determine la capacidad que tienen estos hormigones de resistir frente a la acción del ambiente, de los ataques químicos, físicos, biológicos o de cualquier proceso que tienda a deteriorarlos. Estos hormigones tienen un mayor volumen de poros lo cual afectará a los mecanismos de transporte facilitando la penetración de los agentes agresivos, lo que puede traducirse en una disminución de la durabilidad de la pasta de cemento.

Después de hacer un balance de los resultados obtenidos en este proyecto, se determina que el empleo de hormigones con NFU es desaconsejable en elementos estructurales sometidos a solicitaciones de compresión. Sin embargo, podría utilizarse en pavimentos, ya que la incorporación de caucho le proporciona al hormigón ciertas propiedades elásticas, permitiendo su deformación en presencia de esfuerzos por debajo de la resistencia a compresión del hormigón.

Por otra parte, los hormigones con NFU también se podrían utilizar en elementos prefabricados que no estén destinados a soportar cargas excesivas, como barreras de hormigón en las medianas de las autovías y autopistas, adoquines de hormigón para pavimentos en plazas públicas, calles, aparcamientos, etc., bordillos de hormigón para delimitar aceras peatonales o en barreras antirruído de hormigón. La Generalitat de Catalunya apoya esta iniciativa y, ha establecido recientemente la Resolución MAH/1398/2007, por la cual se establecen los criterios ambientales para la otorgación del distintivo de garantía de calidad ambiental a los productos prefabricados de hormigón con materiales reciclados [15], entre ellos el caucho procedente de neumáticos fuera de uso, con la finalidad de contribuir a la reducción de este residuo.

4. BIBLIOGRAFIA

4.1 LIBROS

[ALEAJOS *et. al* 2006]

“UTILIZACIÓN DE ÁRIDO RECICLADO PARA LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL” [1]

COMISIÓN 2, GRUPO DE TRABAJO 2/5 HORMIGÓN RECICLADO

Asociación Científico – Técnica del Hormigón Estructural (ACHE), Madrid, 2006

[FERNÁNDEZ 2004]

“HORMIGÓN” [2]

MANUEL FERNÁNDEZ CÁNOVAS

Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 2004

[JIMÉNEZ *et. al* 2000]

“HORMIGÓN ARMADO” [3]

PEDRO JIMÉNEZ MONTOYA, ÁLVARO GARCÍA MESEGUER Y FRANCISCO MORÁN CABRÉ

Editorial Gustavo Gili SA, Barcelona, 2000

[RUBIO Y MORAGUES 1990]

“DESCRIPTIVA DE POLÍMEROS SINTÉTICOS” [4]

M^a JESUS RUBIO ENCINAS, AMPARO MORAGUES TERRADES

Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1990

[VIDAL 1984]

“CAUCHOS Y ELASTÓMEROS” [5]

MANUEL VIDAL DE CARCER

Díaz de Santos, Barcelona, 1984

4.2 LEGISLACIÓN

“CTE_DB-SI: CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN, DOCUMENTO BÁSICO, SEGURIDAD EN CASO DE INCENDIO” [6]

Real Decreto 314/2006, de 17 de Marzo.

“DIRECTIVA 1999/31/CE DEL CONSEJO, DE 26 DE ABRIL DE 1999, RELATIVA AL VERTIDO DE RESIDUOS” [7]

DOCE n. L182, de 16/7/1999

“EHE-08: INSTRUCCIÓN DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL” [8]

Real Decreto 1247/2008, de 18 de Julio.

“LEY 10/1998, DE 21 DE ABRIL, DE RESIDUOS” [9]

BOE n. 96, de 22/4/1998.

“ORDEN MAM/304/2002, DE 8 DE FEBRERO, POR LA QUE SE PUBLICAN LAS OPERACIONES DE VALORIZACIÓN Y ELIMINACIÓN DE RESIDUOS Y LA LISTA EUROPEA DE RESIDUOS” [10]
BOE n. 43, de 19/2/2002.

“PLAN NACIONAL DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (PNNFU) 2001-2006” [11]
BOE n. 260, de 30/10/2001.

“REAL DECRETO 1619/2005, DE 30 DE DICIEMBRE, SOBRE LA GESTIÓN DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO” [12]
BOE n. 2, de 3/1/2006.

“RC-97 REAL DECRETO 779/1997, DE 30 DE MAYO, SOBRE LA INSTRUCCIÓN PARA LA RECEPCIÓN DE CEMENTOS” [13]
BOE n. 141, de 13/7/1997.

“RESOLUCIÓ MAH/1637/2005, DE 17 DE MAIG, SOBRE ELS CRITERIS AMBIENTALS PER A L'ATORGAMENT DEL DISTINTIU DE GARANTIA DE QUALITAT AMBIENTAL ALS PRODUCTES DE CAUTXÚ RECICLAT” [14]
DOGC n. 4397, de 2/6/2005.

“RESOLUCIÓ MAH/1398/2007, DE 3 DE MAIG, PER LA QUAL S'ESTABLEIXEN ELS CRITERIS AMBIENTALS PER A L'ATORGAMENT DEL DISTINTIU DE GARANTIA DE QUALITAT AMBIENTAL ALS PRODUCTES PREFABRICATS DE FORMIGÓ AMB MATERIAL RECICLAT” [15]
DOCG n. 4884, de 16/5/2007.

“UNE 83316:1996: ENSAYOS DE HORMIGÓN (DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN COMPRESIÓN)” [16]
Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1996.

“UNE EN ISO 1182:2002: ENSAYOS DE REACCIÓN AL FUEGO PARA PRODUCTOS DE CONSTRUCCIÓN (ENSAYO DE NO COMBUSTIBILIDAD)” [17]
Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2002.

“UNE EN 12350-2:2006: ENSAYOS DE HORMIGÓN FRESCO (PARTE 2: ENSAYO DE ASENTAMIENTO)” [18]
Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1990.

“UNE EN 12390-2:2000: ENSAYOS DE HORMIGÓN ENDURECIDO (PARTE 2: FABRICACIÓN Y CURADO DE PROBETAS PARA ENSAYOS DE RESISTENCIA)” [19]
Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2000.

“UNE EN 12390-3:2001: ENSAYOS DE HORMIGÓN ENDURECIDO (PARTE 3: DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS)” [20]
Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2001.

“UNE EN 12390-6:2001: ENSAYOS DE HORMIGÓN ENDURECIDO (PARTE 6: RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA DE PROBETAS)” [21]
Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2001.

“UNE EN 12390-7:2000: ENSAYOS DE HORMIGÓN ENDURECIDO (PARTE 7: DENSIDAD DEL HORMIGÓN ENDURECIDO)” [22]
Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2001.

“UNE 23-725-90: ENSAYO DE GOTEO APLICABLE A LOS MATERIALES FUSIBLES (ENSAYO COMPLEMENTARIO)” [23]

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1990.

4.3 ARTÍCULOS

[BAOSHAN *et al.* 2004]

“INVESTIGATION INTO WASTE TIRE RUBBER-FILLED CONCRETE” [24]

BAOSHAN HUANG, GUOQIANG LI, SU-SENG PANG, AND JOHN EGGERS

Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 16, No. 3.

ASCE, Rolla (United States), 2004

[BÜTHE *et al.* 2000]

“PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN DEL CAUCHO. ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS COMPONENTES E INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN” [25]

N. BÜTHE; U. GIESE; R.H. SCHUSTER; AND G. WÜNSCH

Revista del caucho, N° 472,

Editorial Gallaway Consulting SL, Madrid, 2001

[GALLEGO *et al.* 1999]

“PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NEUMÁTICOS DE DESHECHO. LA OPCIÓN MÁS ECOLÓGICA PARA UN RESIDUO EN AUMENTO” [26]

JUAN GALLEGO MEDINA, RAMÓN TOMÁS RAZ, Y MIGUEL ÁNGEL DEL VAL MELÚS

Residuos: La Revista Técnica de Medio Ambiente, N° 46

Madrid, 1999

[NEIL *et al.* 1993]

“RUBBER-TIRE PARTICLES AS CONCRETE AGGREGATE” [27]

NEIL N. ELDIN AND AHMED B. SENOUCI

Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 5, No. 4.

ASCE, Rolla (United States), 1993

[ZAHER *et al.* 1999]

“RUBBERIZED PORTLAND CEMENT CONCRETE” [28]

ZAHER K. KHATIB AND FOUAD M. BAYOMY

Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 11, No. 3.

ASCE, Rolla (United States), 1999

4.4 PROYECTOS FIN DE CARRERA Y TESISAS

[SOMOZA 2006]

“ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LOS EFECTOS DEL FUEGO EN EL HORMIGÓN” [29]

ÓSCAR SOMOZA BEIRO, TUTORES: ANA LACASTA PALACIO Y LAIA HAURIE IBARRA

Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona, Barcelona, 2006

[VIRGILI 1995]

“FORMIGONS HIDRÀULICS AMB CAUTXÚ EN POLS PROCEDENT DEL RECICLATGE DE NEUMÀTICS” [30]

CRISTINA VIRGILI BERNADÓ, TUTOR: ENRIC VAZQUEZ RAMONICH

Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins Canals i Ports de Barcelona, Barcelona, 1995

4.5 PÁGINAS WEB

"WWW.ARAGON.CCOO.ES" [31]

EL PLAN GIRA: EL PROGRAMA DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO

"WWW.ASCELIBRARY.ORG" [32]

ASCE RESEARCH LIBRARY

"WWW.CALIDADAMBIENTAL.INFO" [33]

MANUAL SECTORIAL DE ECOEFICIENCIA (GESTORES DE RESIDUOS)

"WWW.ETRMA.ORG" [34]

EUROPEAN TYRE & RUBBER MANUFACTURERS' ASSOCIATION

"WWW.GEF.ES" [35]

GRUPO ESPAÑOL DE FRACTURA (SOCIEDAD ESPAÑOLA DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL)

"WWW.JUNTADEANDALUCIA.ES" [36]

LOS RESIDUOS URBANOS Y ASIMILABLES: LOS NEUMÁTICOS FUERA DE USO

"WWW.SIGNUS.ES" [37]

SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN DE NEUMÁTICOS USADOS (SIGNUS ECOVALOR)
