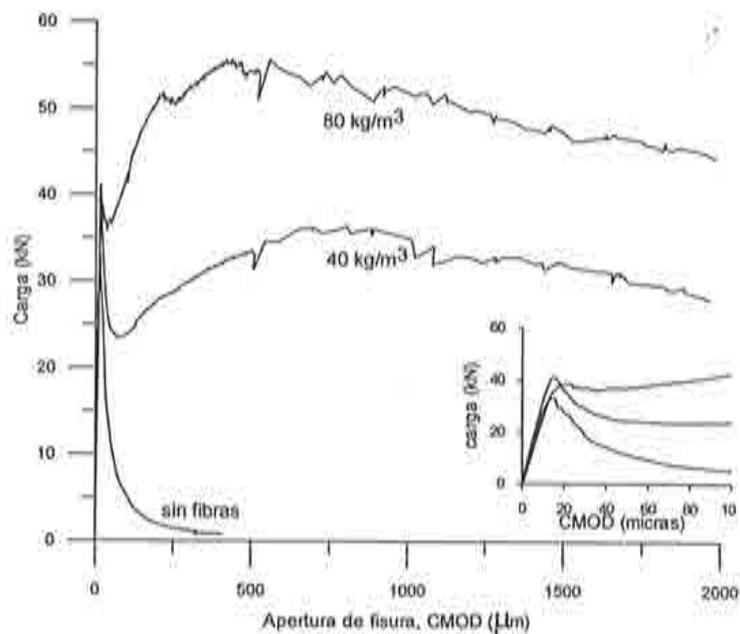


La Tenacidad de Hormigones Reforzados con Fibras de Acero

L. Agulló
R. Gettu
A. Aguado
H. Saldivar



La Tenacidad de Hormigones Reforzados con Fibras de Acero

**L. Agulló
R. Gettu
A. Aguado
H. Saldivar**

Departamento de Ingeniería de la Construcción
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España

Monografía CIMNE Nº 54, Mayo 2000

Diseño de la cubierta: Jordi Pallf

Primera Edición, Mayo 2000

© Los autores

Edita:

Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería

Edificio C1, Campus Norte UPC

Gran Capitán, s/n

08034 Barcelona, España

ISBN: 84-89925-63-1

Depósito Legal: B-23819-2000

Prólogo

Dar una respuesta adecuada a las cada vez mayores prestaciones que se exigen actualmente al hormigón como material estructural, comporta distintas actuaciones que conciernen tanto a la composición del material como al propio diseño de la estructura.

Una de las tendencias actuales para aumentar las prestaciones del hormigón en términos, fundamentalmente, de disminuir su inherente fragilidad y mejorar su comportamiento en el régimen de post-fisuración consiste en la incorporación de fibras de acero. Ello supone una actuación desde la composición del material, originando el hormigón reforzado con fibras de acero.

La cuantificación de los diferentes aspectos asociados a la fragilidad o ductilidad del material, así como del comportamiento en la etapa posterior a la fisuración implica la utilización de técnicas de ensayo distintas a las usualmente utilizadas para caracterizar al hormigón convencional sin fibras, en donde el comportamiento en régimen no lineal (posterior a la aparición de la fisuración) difiere sustancialmente del correspondiente al hormigón reforzado con fibras de acero.

En este documento se presentan la metodología seguida y los resultados obtenidos en el contexto de un exhaustivo estudio experimental encaminado a la caracterización del comportamiento de los hormigones reforzados con fibras de acero, utilizando distintos procedimientos de ensayo contemplados en las normativas internacionales vigentes. Esta campaña experimental se ha desarrollado sobre tres hormigones base (C-20, C-30 y C-70), a los cuales se han incorporado fibras metálicas de distinto tipo y en diferentes cantidades.

Este estudio se ha realizado parcialmente en el marco de un proyecto de investigación suscrito entre N.V. Bekaert S.A. y la Universitat Politècnica de Catalunya (E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Barcelona) y los trabajos experimentales se han desarrollado en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la citada universidad.

Finalmente, los autores quieren mostrar su agradecimiento a D. Julio Rossi, D. Raúl Zerbino, D. Miguel Mateos, D. Miguel A. Martín, D. Camilo Bernat y D. José Mora por sus positivas aportaciones en el transcurso de los trabajos que han originado el presente documento.

Barcelona, Febrero de 2000

Los autores

Índice

Capítulo 1: Introducción

1.1.- Antecedentes	1
1.2.- Objetivos	2
1.3.- Metodología	2

Capítulo 2: Marco normativo de referencia

2.1.- Introducción	5
2.2.- Conceptos de módulo de rotura, tenacidad y resistencia equivalente	7
2.3.- Normas UNE	8
2.4.- Consideraciones sobre la evaluación de la tenacidad	13
2.4.1.- Ensayos de flexotracción en cuatro puntos	14
2.4.1.1.- Índices adimensionales basados en la energía	15
2.4.1.2.- Capacidad de absorción de energía	16
2.4.1.3.- Índices adimensionales basados en la resistencia	18
2.4.1.4.- Resistencia residual	18
2.4.1.5.- Resistencia equivalente a flexotracción	18
2.4.2.- Otros ensayos para caracterizar la tenacidad	18
2.4.2.1.- Ensayos de flexotracción en tres puntos	18
2.4.2.2.- Ensayo de placa	20
2.4.3.- Aspectos relevantes relativos a la evaluación experimental de la tenacidad	20
2.4.3.1.- Precisión en la medida del desplazamiento	20
2.4.3.2.- Inestabilidad después de la fisuración de la matriz	20
2.4.3.3.- Identificación de la primera fisura	21

Capítulo 3: Programa experimental

3.1.- Introducción	23
3.2.- Materiales componentes y dosificaciones	24
3.3.- Fabricación del hormigón y de las probetas de ensayo	27
3.4.- Procedimientos de ensayo	29

3.4.1.- Influencia del sistema de compactación en la distribución y orientación de las fibras..... 29

3.4.2.- Ensayos de flexotracción..... 30

3.4.3.- Ensayos de rotura por compresión 34

Capítulo 4: Resultados y análisis de resultados correspondientes a los hormigones C20 y C30

4.1.- Introducción..... 35

4.2.- Dosificaciones y configuraciones de ensayo 36

4.3.- Efecto del tipo de compactación..... 37

 4.3.1.- Hormigones utilizados..... 37

 4.3.2.- Resultados y análisis de resultados 38

 4.3.2.1.- Efecto en la distribución y orientación de las fibras..... 38

 4.3.2.2.- Efecto en la resistencia y tenacidad a flexotracción 40

4.4.- Resultados relativos al ensayo con carga en los tercios de la luz..... 41

 4.4.1.- Hormigones estudiados 41

 4.4.2.- Estudio de la fisuración 42

 4.4.3.- Curvas carga-flecha 44

 4.4.4.- Resistencia a flexotracción..... 48

 4.4.5.- Evaluación de parámetros de tenacidad 50

 4.4.5.1.- Índices adimensionales 51

 4.4.5.2.- Parámetros de tensión residual 53

 4.4.5.3.- Parámetros absolutos de absorción de energía 54

 4.4.5.4.- Resistencia equivalente a flexotracción..... 56

4.5.- Resultados relativos al ensayo con carga central..... 57

 4.5.1.- Hormigones estudiados 57

 4.5.2.- Estudio de la fisuración observada..... 58

 4.5.3.- Forma de las curvas carga-flecha 58

 4.5.4.- Resistencia a flexotracción y parámetros de tenacidad 59

 4.5.5.- Comparación de los resultados obtenidos en los ensayos con carga central y con carga a tercios..... 60

4.6.- Resultados relativos al ensayo con vigas con entalla 61

 4.6.1.- Hormigones estudiados 61

 4.6.2.- Estudio de la fisuración observada..... 62

 4.6.3.- Forma de las curvas carga-flecha y carga-apertura de fisura 62

 4.6.4.- Resistencia a flexotracción y parámetros de tenacidad 64

Capítulo 5: Resultados y análisis de resultados correspondientes al hormigón C70

5.1.- Introducción	65
5.2.- Dosificaciones y configuraciones de ensayo.....	66
5.3.- Resultados relativos al ensayo con carga en los tercios de la luz	67
5.3.1.- Estudio de la fisuración.....	67
5.3.2.- Curvas carga-flecha.....	68
5.3.3.- Resistencia a flexotracción	69
5.3.4.- Evaluación de parámetros de tenacidad	70
5.3.4.1.- Índices adimensionales.....	70
5.3.4.2.- Parámetros de tensión residual.....	72
5.3.4.3.- Parámetros absolutos de absorción de energía.....	72
5.3.4.4.- Resistencia equivalente a flexotracción	73
5.4.- Resultados relativos al ensayo con carga central	74
5.4.1.- Estudio de la fisuración observada.....	74
5.4.2.- Forma de las curvas carga-flecha.....	75
5.4.3.- Resistencia a flexotracción y parámetros de tenacidad.....	76
5.4.4.- Comparación de los resultados obtenidos en los ensayos con carga central y con carga a tercios	76
5.5.- Resultados relativos al ensayo con vigas con entalla.....	77
5.5.1.- Estudio de la fisuración observada.....	77
5.5.2.- Forma de las curvas carga-flecha y carga-apertura de fisura.....	78
5.5.3.- Resistencia a flexotracción y parámetros de tenacidad.....	79

Capítulo 6: Conclusiones

6.1.- Introducción	81
6.2.- Conclusiones relativas a la fabricación de las probetas de ensayo	81
6.3.- Conclusiones relativas a la evaluación de la tenacidad.....	82

Anejo 1: Fundamentos de la utilización de prensas servohidráulicas

A1.1.- Introducción.....	A1.1
A1.2.- Sistemas de control.....	A1.2
A1.3.- Máquinas de ensayo servohidráulicas	A1.4
A1.3.1.- La parte electrónica.....	A1.4
A1.3.2.- La parte hidráulica	A1.5
A1.3.3.- La parte mecánica.....	A1.6
A1.4.- Aplicación de PLC en ensayos de hormigón	A1.6
A1.4.1.- Ensayo de compresión	A1.7
A1.4.2.- Ensayos de tracción	A1.10

A1.4.3.- Ensayos a flexotracción.....	A1.12
A1.4.4.- Otros tipos de ensayos.....	A1.13
A1.5.- Ensayos estructurales	A1.13
A1.6.- Conclusiones	A1.15
Bibliografía	B1

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.- ANTECEDENTES

En el contexto del proceso constructivo de obras civiles y de edificación, el hormigón como material estructural (armado o pretensado) es uno de los materiales comúnmente utilizados debido, entre otros argumentos, a la buena relación existente entre las prestaciones a las que es capaz de dar respuesta de forma satisfactoria y el coste derivado de la materialización de las estructuras con este material.

Son distintas las prestaciones que actualmente se le demandan al hormigón como material estructural, abarcando requisitos que implican tanto a su comportamiento en fresco (entre otros, trabajabilidad adecuada en cada aplicación) como a su comportamiento como material endurecido (entre otros, características mecánicas y de deformación, y durabilidad).

En lo que se refiere al comportamiento del hormigón endurecido, uno de los aspectos críticos, y a la vez bien conocido, es la fisuración del material, la cual puede obedecer a causas de origen muy diferente. Asimismo, otro aspecto conocido del comportamiento del material es su fragilidad, caracterizada, a grandes rasgos, por la escasa o nula capacidad de carga durante la rotura.

Una de las tendencias actuales para mejorar la respuesta frente a la fisuración y reducir la fragilidad del material o, lo que es lo mismo, dotarle de tenacidad, consiste en la incorporación de fibras de acero al hormigón. La evaluación del comportamiento del hormigón reforzado con fibras y del efecto de las fibras sobre la fisuración y la tenacidad se realiza habitualmente mediante ensayos de flexotracción, los cuales proporcionan la base para el cálculo de diferentes parámetros que permiten cuantificar la resistencia y tenacidad a flexotracción.

Por otra parte, son distintas las normativas y recomendaciones que contemplan ensayos para la evaluación experimental del comportamiento de hormigones con fibras y particularmente en lo que se refiere a la respuesta del material frente a sollicitaciones de flexotracción. Asimismo, no existe en ellas un planteamiento unificado para abordar estos aspectos, fundamentalmente, en lo que concierne a la evaluación de los parámetros de tenacidad.

1.2.- OBJETIVOS

Dentro del marco general expuesto, el presente trabajo se centra, fundamentalmente, en el estudio de diferentes facetas relativas tanto a la caracterización experimental del comportamiento a flexotracción del hormigón con fibras de acero como a las posibles cuantificaciones de la tenacidad del material que pueden plantearse sobre la base de los resultados obtenidos experimentalmente en esta caracterización. Siguiendo este eje principal, el trabajo se articula en torno a los siguientes objetivos específicos:

- Presentar el marco normativo en el ámbito nacional relativo a los hormigones con fibras, enfatizando en los aspectos referentes a la evaluación de la tenacidad a flexotracción, así como realizar una revisión exhaustiva de las diferentes formas existentes para cuantificar la tenacidad contempladas en distintas normativas y recomendaciones de carácter internacional.
- Analizar la influencia del sistema de compactación del hormigón sobre la orientación y distribución de las fibras incorporadas, y sobre la respuesta mecánica del hormigón con fibras frente a una sollicitación de flexión.
- Estudiar la respuesta del hormigón con fibras frente a distintas configuraciones de ensayo a flexotracción, analizando los resultados en términos de distintos indicadores para cuantificar la tenacidad del material

1.3.- METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos, el trabajo se estructura en diferentes capítulos que dan contenido al presente documento.

A efectos de enmarcar los trabajos desarrollados y de facilitar el seguimiento de los temas tratados, en el *capítulo 2* se exponen, en primer lugar, algunos conceptos básicos relativos al comportamiento del hormigón con fibras relacionados con su resistencia y

capacidad de absorción de energía como son el módulo de rotura, la tenacidad y la resistencia equivalente en el régimen de post-fisuración.

En segundo lugar, se presentan las normas UNE relativas a hormigones con fibras, las cuales constituyen el marco normativo de referencia en el ámbito español; de entre estas normas se incide en aquéllas que se refieren a la evaluación de la resistencia y la tenacidad a flexotracción, propiedades en las cuales se ha centrado, fundamentalmente, el estudio realizado.

Finalmente, como tercer bloque temático dentro del *capítulo 2*, se expone un análisis exhaustivo de los diferentes métodos de ensayo disponibles para caracterizar la capacidad de absorción de energía durante la fisuración y rotura según distintas configuraciones de carga a flexotracción; este análisis se realiza, fundamentalmente, en términos de los indicadores contemplados en distintas normativas, códigos y recomendaciones internacionales para la caracterización de la tenacidad.

En el *capítulo 3* se exponen las diferentes facetas relativas al estudio experimental desarrollado para analizar la influencia que presentan sobre la tenacidad del hormigón con fibras distintas variables asociadas a la fabricación de las probetas de ensayo y al propio procedimiento de ensayo utilizado para su evaluación.

Las directrices principales del trabajo experimental realizado se articulan en torno a dos etapas básicas de actuación: una relativa al análisis de la influencia del sistema de compactación del hormigón sobre la orientación y distribución de las fibras, y en la respuesta mecánica del mismo. La otra, con un tratamiento más exhaustivo que la anterior, se centra en la utilización de distintas configuraciones de ensayo por flexión para evaluar el comportamiento del hormigón con fibras en términos de los parámetros asociados a la medida de la tenacidad.

Se han considerado tres sistemas de compactación constituidos por una vibración externa mediante mesa vibrante y dos vibraciones internas, de carácter puntual, empleando barra metálica y vibrador de aguja. Dentro de los ensayos para evaluar la tenacidad se han adoptado tres configuraciones de ensayo a flexión: mediante cuatro puntos de carga, también conocidos como ensayos con carga a tercios de la luz; mediante tres puntos de carga, también conocidos como ensayos con carga centrada y mediante carga centrada utilizando probetas con entalla.

La campaña experimental se ha realizado sobre tres hormigones base, a los cuales se han incorporado fibras metálicas de distinto tipo y en diferentes proporciones. Estos hormigones corresponden a dos hormigones de resistencia normal, denominados C20 y C30 (respectivamente, de resistencia a compresión a los 28 días de 20 MPa y 30 MPa) y uno de alta resistencia, designado por C70 (resistencia a compresión a los 28 días de 70 MPa).

Asimismo, en el *capítulo 3* se exponen los detalles relativos a las características de los materiales componentes, dosificaciones, procedimientos de ensayo y equipos utilizados en la campaña experimental.

Por otra parte, la caracterización de la tenacidad mediante técnicas experimentales de ensayo requiere la utilización de equipos y sistemas de control que permitan representar adecuadamente la respuesta del material en el régimen post-pico o de post-fisuración; ello conduce a la utilización de prensas servohidráulicas susceptibles de ser controladas mediante diferentes sistemas de control. A efectos de facilitar el seguimiento de algunos temas relacionados con los sistemas de control utilizados en los ensayos correspondientes a la campaña experimental desarrollada, dentro del *anejo 1* se presenta un trabajo monográfico relativo a los fundamentos de la utilización de prensas servohidráulicas y posibles sistemas de control para los ensayos de flexión.

En los *capítulos 4 y 5* se exponen los resultados y el análisis de resultados correspondientes a los distintos ensayos realizados. En el *capítulo 4* se recogen los resultados relativos a los ensayos desarrollados sobre los hormigones denominados de resistencia normal (C20 y C30). En primer lugar se presentan los relativos al estudio realizado sobre el efecto del tipo de compactación en términos de la distribución y orientación de las fibras, y de la resistencia y tenacidad a flexotracción.

Dentro de este capítulo, en un segundo bloque, se presentan los resultados relativos a los ensayos de flexión realizados según las tres configuraciones de ensayo consideradas en este estudio, respectivamente relativas a la aplicación de la carga en los tercios de la luz, carga central y carga central con probetas entalladas. En cada caso se analiza la fisuración observada, las curvas carga-flecha y se evalúan distintos parámetros indicadores de la tenacidad del hormigón.

Dentro del *capítulo 5* se exponen los resultados correspondientes al hormigón de alta resistencia (C70). Estos resultados se refieren a los ensayos de flexión realizados según las tres configuraciones de ensayo consideradas; la presentación y análisis de los mismos se realizan bajo el mismo hilo conductor expuesto para los hormigones C20 y C30.

Dentro del *capítulo 6* se presentan las conclusiones derivadas de los distintos trabajos realizados. Estas conclusiones se presentan encuadradas en dos grupos principales. En el primer grupo de conclusiones, se detallan las relativas a distintos aspectos que conciernen a la fabricación de las probetas de ensayo; dentro del segundo grupo, se recogen las conclusiones derivadas de los ensayos realizados siguiendo las tres configuraciones de ensayo contempladas en el presente estudio.

Finalmente, en el último capítulo correspondiente a la *bibliografía* se presentan las referencias bibliográficas utilizadas a lo largo del presente estudio.

CAPÍTULO 2

MARCO NORMATIVO DE REFERENCIA

2.1.- INTRODUCCIÓN

Este capítulo tiene por objeto principal presentar una visión general de los distintos procedimientos de ensayo vigentes para la evaluación de la tenacidad de los hormigones con fibras y del contexto normativo nacional e internacional que engloba estos procedimientos. En este sentido, los procedimientos de ensayo que se presentan en este capítulo se exponen tal como se contemplan en las correspondientes normativas, sin realizarse por parte de los autores una valoración subjetiva de los mismos.

La incorporación de fibras en el hormigón provoca una sustancial modificación de la respuesta del material en la situación posterior a la fisuración, presentando una mayor capacidad de carga y de absorción de energía; a modo de ejemplo, en la figura 2.1 se visualiza de forma cualitativa esta respuesta en términos de las curvas carga-desplazamiento resultantes de un ensayo de flexotracción; en este sentido, el análisis y la cuantificación del comportamiento del hormigón con fibras a partir, fundamentalmente, de la carga de pico justifican el desarrollo de procedimientos de ensayo para llegar a evaluar estos efectos.

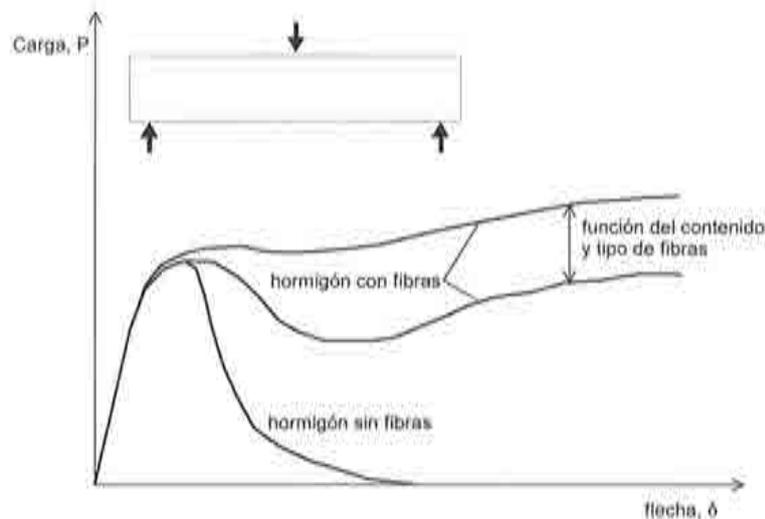


Fig. 2.1.- Descripción cualitativa de la incidencia de las fibras en el comportamiento a flexotracción del hormigón

Dentro del presente capítulo, en aras a facilitar el seguimiento de los temas que se tratan en el mismo, se exponen, en primer lugar, algunos conceptos básicos asociados al comportamiento del hormigón con fibras relacionados con la resistencia y capacidad de absorción de energía como son el módulo de rotura, la tenacidad y la resistencia equivalente en el régimen de post-fisuración.

En segundo lugar se presenta el marco normativo de referencia en el ámbito español configurado por las normas UNE relativas a hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. De estas normas, se incide fundamentalmente en aquéllas que hacen referencia a la evaluación experimental de la resistencia y la tenacidad a flexotracción, propiedades en las cuales se ha centrado el estudio que se presenta en este documento; se exponen, en forma resumida, el objeto y las directrices generales de los procedimientos de ensayo contemplados en las mismas. En este sentido, no es objeto de este documento describir en detalle los procedimientos y los equipos a emplear en cada ensayo, los cuales pueden consultarse directamente en las normas referidas.

Finalmente, dentro de un tercer bloque temático se presenta un análisis de los diferentes ensayos disponibles para caracterizar la capacidad de absorción de energía durante la fisuración y rotura en distintas configuraciones de carga, haciéndose énfasis en los ensayos de flexotracción al ser éstos los más frecuentemente utilizados. Este análisis se realiza en términos, fundamentalmente, de los indicadores contemplados en diferentes códigos y recomendaciones para la caracterización de la tenacidad como son, entre otros, la absorción absoluta de energía, los índices adimensionales relacionados con la capacidad de absorción de energía y la resistencia equivalente a flexión.

2.2.- CONCEPTOS DE MÓDULO DE ROTURA, TENACIDAD Y RESISTENCIA EQUIVALENTE

El módulo de rotura o resistencia a flexotracción se determina convencionalmente mediante un ensayo de flexión sobre una probeta prismática, en el cual se registra la carga máxima y, aplicando el análisis elástico, se calcula la tensión máxima. En hormigones sin fibras es usual que la respuesta de la probeta ponga de manifiesto una carga pico bien definida a partir de la cual la carga desciende bruscamente; por lo tanto, se puede asociar la carga máxima al inicio de la fisuración a tracción y, en consecuencia, a la resistencia a tracción, o más propiamente, a la resistencia a flexotracción del material (o módulo de rotura).

En hormigones con fibras la resistencia no siempre disminuye monótonamente después del inicio de la fisuración, produciendo un aumento gradual de la resistencia a flexotracción a partir de un valor mínimo. En este sentido, en el presente trabajo, se considera la tensión máxima correspondiente a la carga del primer pico (P_{MR}) como el módulo de rotura (ver figura 2.2), reservándose la denominación de resistencia a flexotracción para la tensión máxima correspondiente a cargas en el régimen de post-fisuración, calculada aplicando el análisis elástico. La utilidad del módulo de rotura en el caso de hormigones con fibras radica, fundamentalmente, en la representación de la resistencia de la matriz u hormigón de base (no reforzado con fibras).

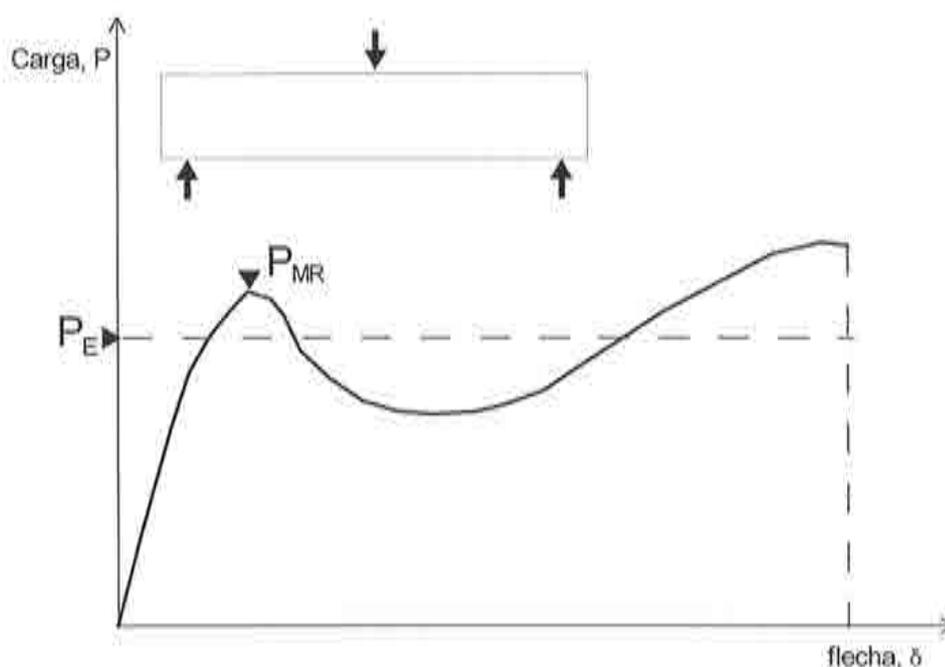


Fig. 2.2.- Módulo de rotura (P_{MR}) y resistencia equivalente (P_E)

Tal como se ha manifestado anteriormente, la resistencia de un hormigón con fibras no disminuye bruscamente a partir del inicio de la fisuración conduciendo a una disipación progresiva de la energía durante el proceso de rotura. La tenacidad del material se puede definir como el parámetro que cuantifica esta capacidad de absorción de energía. Puede considerarse también como el inverso de la fragilidad teniendo en cuenta que un material frágil no posee ninguna capacidad de absorción de energía a partir de formación de la fisura y presenta una rotura brusca. Aunque no se utiliza la tenacidad directamente como parámetro de cálculo, su caracterización es fundamental para representar el efecto de la incorporación de las fibras en el hormigón y como herramienta en la ingeniería de materiales dúctiles. Asimismo, existen distintos procedimientos de cálculo para aplicaciones específicas que se basan en la tenacidad obtenida experimentalmente.

Otra forma de representar la tenacidad del material es a través de la tensión máxima correspondiente a un valor medio de la carga en el régimen post-pico o post-fisuración (P_E). Esta tensión máxima se conoce como resistencia equivalente, la cual es susceptible de ser asociada a distintos intervalos de la flecha alcanzada en el régimen post-pico. Para el cálculo de la resistencia equivalente se utiliza el análisis elástico considerando la sección no fisurada (nominal). Esta definición permite, en el marco del cálculo estructural, la incorporación de la tenacidad del material a través un concepto basado en la resistencia. En la figura 2.2 se ilustra cualitativamente el concepto de la resistencia equivalente, asociado a la carga P_E .

2.3.- NORMAS UNE

El marco normativo de referencia en el ámbito español está configurado por las normas UNE actualmente vigentes relativas a hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. De estas normas, se incide en este apartado fundamentalmente en aquellas que hacen referencia a la evaluación experimental de la resistencia y la tenacidad a flexotracción, propiedades en las cuales se ha centrado el estudio que se presenta en este documento; asimismo, se incide también en las normas referentes a la fabricación del hormigón, a la evaluación de su comportamiento en fresco y a la fabricación de las probetas de ensayo, dado que en ellas se contemplan los distintos pasos a seguir previamente a los ensayos para caracterizar las propiedades anteriormente citadas.

En la tabla 2.1, se presenta una relación de las normas UNE para hormigones con fibras de acero, en la cual se expone también la correspondencia indicada de forma explícita en las citadas normas con otras normas y recomendaciones internacionales (JCI: Japan Concrete Institute; ACI: American Concrete Institute; ASTM: American Society for Testing and Materials; ISO: International Standards Organization).

A continuación, se expone en forma resumida el objeto y las directrices generales de los procedimientos de ensayo contemplados en las normas más relevantes con relación al presente estudio.

Normas UNE para hormigones con fibras de acero y/o polipropileno (correspondencias con otras normas)	Denominación
83500-1:1989	Clasificación y definiciones. Fibras de acero para el refuerzo de hormigones
83501:1986	Toma de muestras de hormigón fresco
83502:1988 (JCI-SF 1)	Fabricación en laboratorio
83503:1988 (ASTM C 995-83)	Medida de docilidad por medio del cono invertido
83504:1990	Fabricación de probetas para los ensayos de laboratorio
83505:1986	Extracción y conservación de probetas testigo
83506:1986	Refrentado de probetas con mortero de azufre
83507:1986	Rotura por compresión
83508:1990	Determinación del índice de tenacidad a compresión
83509:1988 (ASTM C 78-84, ISO 4013)	Rotura por flexotracción
83510:1989	Determinación del índice de tenacidad de resistencia a primera fisura
83511:1989	Determinación de la resistencia a cortante
83512-1:1989	Determinación del contenido de fibras de acero
83514:1992 (ACI 544.1R, ACI 544.2R)	Determinación de la resistencia al impacto

Tabla 2.1.- Normas UNE relativas a hormigones con fibras

UNE 83-502-88.- Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Fabricación en laboratorio

Esta norma tiene por objeto especificar un método para la fabricación en el laboratorio de hormigón reforzado con fibras. En la misma se establecen las directrices para la preparación y dosificación de los materiales componentes, así como para el amasado del hormigón con fibras, contemplando, entre otros aspectos, el tiempo de amasado sin fibras, la incorporación de las mismas y el tiempo de amasado de la mezcla con las fibras incorporadas.

El tiempo de amasado antes de la incorporación de las fibras diferirá dependiendo de la capacidad de la mezcladora, tipo, proporciones del hormigón y otros factores, pero generalmente se estima suficiente tres minutos para una hormigonera basculante y dos minutos para una fija.

La incorporación de las fibras al hormigón debe hacerse mientras la mezcladora esté girando, de tal forma que las fibras sean distribuidas lo más uniformemente posible. La duración de la introducción de las fibras, la cual variará de acuerdo con el volumen a mezclar y la cantidad de fibras, es normalmente de uno a dos minutos. El amasado debe continuarse después de que la cantidad completa de fibras haya sido introducida, y durante el menor tiempo necesario para que las fibras se repartan totalmente en la masa.

UNE 83-504-90.- Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Fabricación de probetas para los ensayos de laboratorio

Esta norma tiene por objeto indicar los procedimientos para la fabricación y conservación de las probetas de hormigón reforzado con fibras, mediante vertido directo por gravedad en los moldes y compactación del mismo, destinadas a la determinación de diferentes características mecánicas del hormigón.

La forma y dimensiones interiores de los moldes pueden ser cualesquiera que se consideren adecuadas para el ensayo que se trate, pero su menor dimensión ha de ser igual o mayor a tres veces el tamaño máximo de los áridos y dos veces la longitud de la fibra. No obstante, y a los efectos de esta norma, se considerarán los moldes prismáticos como moldes normalizados para ensayos de flexión, de dimensiones interiores 150×150×600 mm y 100×100×400 mm.

En el caso de probetas prismáticas, éstas se fabrican en dos tongadas compactando el hormigón en cada tongada, dependiendo el sistema de compactación a emplear de la consistencia del hormigón. Así, se recomienda utilizar el picado con barra para hormigones con asiento en el cono de Abrams mayor de 12 cm, apisonado con pisón metálico para asientos comprendidos entre 5 y 12 cm y vibración externa (mesa vibrante) para hormigones con asientos iguales o menores que 5 cm. Cuando el sistema de vibración disponible sea uno de aguja vibrante, la compactación se realiza aplicando dicha aguja a lo largo de las superficies exteriores del molde y nunca introduciéndola dentro de la masa.

En relación con la conservación de las probetas se contemplan las opciones de cámara húmeda e inmersión en agua.

UNE 83-509-88, UNE 509:1995/Erratum.- Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Rotura por flexotracción

Esta norma tiene por objeto describir el método de ensayo para determinar la carga máxima de rotura por flexotracción en hormigón con fibras, empleando probetas prismáticas con cargas a un tercio de la luz, que hayan sido fabricadas de acuerdo con la norma UNE 83-504.

Las probetas a emplear en este ensayo deben ser prismáticas, con una longitud total mínima de 150 mm y mayor que el triple del canto de la probeta a ensayar. La relación entre el ancho y canto de la probeta no debe ser superior a 1,5. Se recomienda emplear las probetas de sección 100×100 mm o de 150×150 mm, siendo estas últimas obligatorias para el caso de pavimentos. La menor dimensión de la probeta nunca será inferior a tres veces el tamaño máximo del árido, ni a dos veces la dimensión máxima de la fibra.

El mecanismo para la aplicación de las cargas consistirá en dos rodillos para apoyo de la probeta y dos rodillos para aplicación de la carga; este mecanismo se ilustra en la figura 2.3.

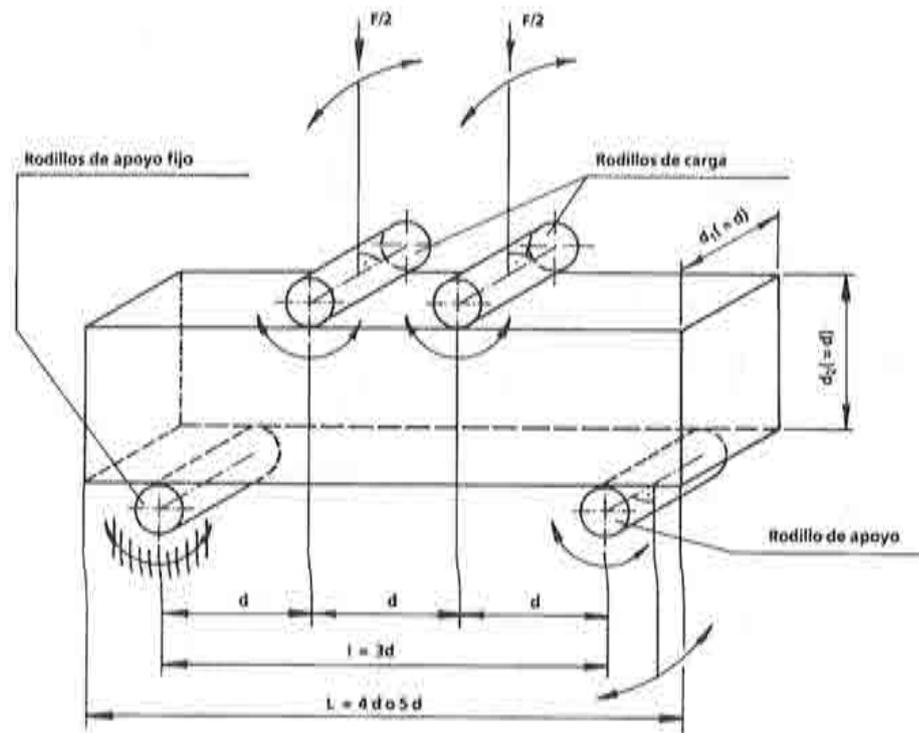


Fig 2.3.- Mecanismo de aplicación de cargas en el ensayo de flexotracción (UNE 83-509)

La carga se aplica a una velocidad constante que aumente la tensión en el extremo más alejado de la fibra neutra entre 0,80 y 1,20 N/mm² por minuto.

Si la rotura tiene lugar en la cara traccionada dentro del tercio central, la tensión de rotura se calcula mediante la expresión:

$$f_{cf} = F / d_1 \cdot d_2^2$$

donde:

- f_{cf} es la tensión de rotura por flexotracción
- F es la carga de rotura
- l es la distancia entre apoyos
- d_1 es el ancho medio de la probeta
- d_2 es el canto medio de la probeta

Nota: Esta tensión de rotura por flexotracción (f_{cf}) corresponde a la tensión máxima asociada a la carga del primer pico o módulo de rotura según las definiciones presentadas en el apartado 2.2 de este capítulo.

UNE 83-510-89.- Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Determinación del índice de tenacidad de resistencia a primera fisura

Esta norma tiene por objeto especificar el método de ensayo para determinar la resistencia a primera fisura, tenacidad e índice de tenacidad a flexotracción del hormigón reforzado con fibras mediante el análisis de la curva carga-flecha obtenida en un ensayo de flexotracción con cargas a un tercio de la luz entre ejes de apoyos.

Las probetas empleadas en el ensayo de flexotracción deben ser las definidas en la norma UNE 83-509, con una longitud total mínima de tres veces el canto de la probeta a ensayar más 50 mm.

La flecha se mide mediante dos transductores electrónicos o flexímetros mecánicos colocados en el centro de la luz entre ejes de apoyos a ambos lados de la probeta.

La carga se aplica de forma que se consiga una velocidad de aumento de la flecha comprendida entre 1/1000 y 1/3000 de la luz entre ejes de apoyo por minuto. El ensayo se considera finalizado cuando la flecha sea superior en un 10% al valor mayor de los dos siguientes:

- 1/150 de la luz entre ejes de apoyos, ó
- 15,5 veces la flecha correspondiente a la primera fisura.

La flecha se define como la media aritmética entre las dos lecturas tomadas en cada uno de los transductores electrónicos o flexímetros, para cada carga. Para la definición de la curva carga-flecha se determinan al menos cinco puntos desde el inicio del ensayo hasta que se produzca la primera fisura y veinticinco hasta que la flecha cumpla la condición relativa a la finalización del ensayo expuesta en el párrafo anterior. En la figura 2.4 se visualiza una curva tipo carga-flecha propia de este ensayo.

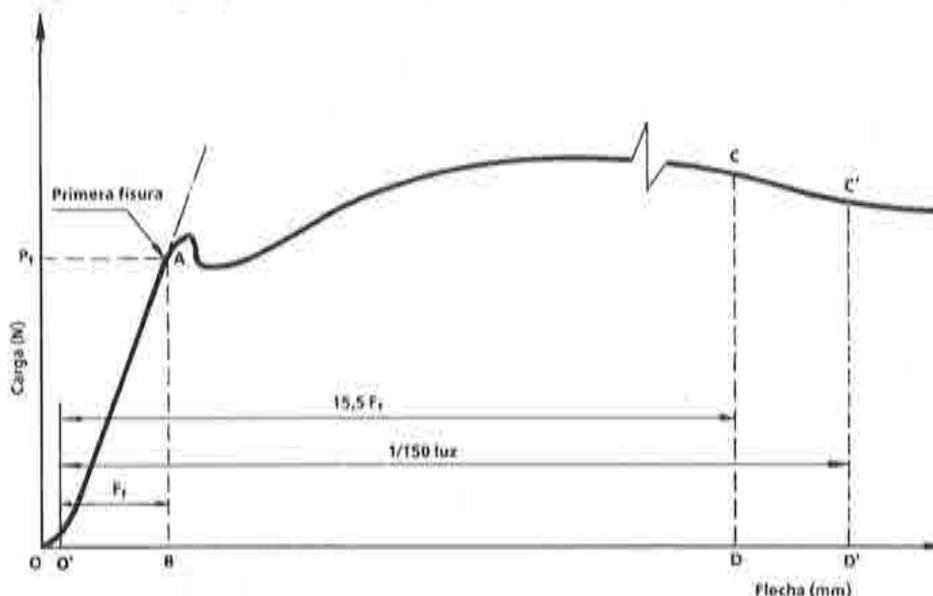


Fig. 2.4.- Curva tipo carga-flecha en el ensayo de flexotracción (UNE 83-510)

Al comienzo del ensayo pueden producirse acoplamientos en la probeta, no eliminados por el equipo de medida del desplazamiento y que se detectan por la aparición de un tramo no lineal en la primera parte de la curva carga-flecha. Cuando esto sucede debe corregirse la posición del origen, para lo cual se prolonga la línea recta AT hasta su intersección con el eje de abscisas determinando el nuevo origen O'. A efectos de interpretación de resultados, la línea O'A sustituye a la OA y el origen de coordenadas pasa a ser el punto O'.

La primera fisura corresponde al punto en el cual la curva carga-flecha se aparta de la linealidad; aproximadamente en este punto la matriz del hormigón se fisura. Si es visible la primera fisura, debe indicarse en qué tercio de la luz entre ejes de apoyos se ha producido. La flecha de la primera fisura, designada por F_1 en la figura 2.4, viene indicada por el segmento O'B.

La carga correspondiente a la primera fisura, P_f , viene representada por el segmento BA en el diagrama carga-flecha. La tensión a primera fisura se calcula introduciendo esta carga P_f en la fórmula dada en UNE 83-509 para evaluar la tensión de rotura por flexotracción.

La tenacidad, designada por T, es la energía que es necesario comunicar a la probeta en el ensayo de flexión para que ésta alcance una flecha igual a 1/150 de la distancia entre ejes de apoyos y viene representada por el área O'AC'D' de la figura 2.4. El índice de tenacidad, I_{30} , se obtiene como resultado de dividir el área bajo la curva carga-flecha desde el origen hasta una flecha igual a 15,5 veces la flecha de primera fisura (O'ACD) por el área del triángulo O'AB.

2.4.- CONSIDERACIONES SOBRE LA EVALUACIÓN DE LA TENACIDAD

Para caracterizar la capacidad de absorción de energía de estos compuestos se han desarrollado ensayos en distintas configuraciones de carga como compresión, flexotracción y tracción directa, de las cuales la más frecuentemente utilizada es la de flexotracción (Gopalaratnam y Gettu, 1995).

Los resultados que se obtienen permiten la caracterización de la tenacidad a través de distintos indicadores como son la absorción absoluta de energía, los índices adimensionales relacionados con la capacidad de absorción de energía, la resistencia equivalente a flexotracción o cualquier otro parámetro que cuantifique la respuesta del hormigón en el régimen post-pico.

Si bien con estos ensayos se pretende caracterizar el comportamiento del material, los resultados de los mismos se ven afectados por el tamaño y la geometría de la probeta, lo cual redundaría en la necesidad de estandarizar estos parámetros para homogeneizar los resultados obtenidos según distintas normativas.

La caracterización de la tenacidad de los hormigones con fibras de acero, tal como se ha citado anteriormente, se realiza frecuentemente ensayando probetas prismáticas a flexotracción con la configuración de carga en 4 puntos (2 puntos de carga aplicados a un tercio de la luz). Asimismo, esta configuración ha sido utilizada también en ensayos de probetas con entalla (Gopalaratnam et al., 1989, 1991; RILEM 89 FMT, 1990). Un procedimiento menos usado, pero quizás más apropiado para caracterizar los parámetros de fractura del compuesto, es el ensayo de flexotracción en 3 puntos (carga aplicada en el centro de la luz) utilizando probetas con entalla. Por otra parte, recientemente se han desarrollado ensayos para la caracterización de la tenacidad mediante ensayos de flexión de placa, si bien éstos son de aplicación más específica.

A continuación se incide en detalle sobre diferentes aspectos relativos a estos ensayos, si bien dado el contexto del presente documento se hace un mayor énfasis en los ensayos a flexotracción.

2.4.1.- Ensayos de flexotracción en cuatro puntos

Las probetas para estos ensayos son prismáticas y las dimensiones de las mismas contempladas en distintas normas y recomendaciones varían poco, siendo unas dimensiones frecuentemente recomendadas para la sección transversal de la probeta 150×150 mm y una longitud de 600 mm, con una luz entre apoyos de 450 mm y cargada con dos cargas puntuales a un tercio de la luz, según se ilustra en la figura 2.5. Asimismo se recomienda una probeta de la misma geometría con una sección transversal de 100×100 mm para hormigones con fibras cortas (longitud de fibra, $l_f < 30$ mm). Para aplicaciones del hormigón con fibras en las cuales el material se ponga en obra por proyección se recomiendan probetas de sección transversal de menor canto (EFNARC, 1993; NB, 1993; RILEM 49 TFR, 1984).

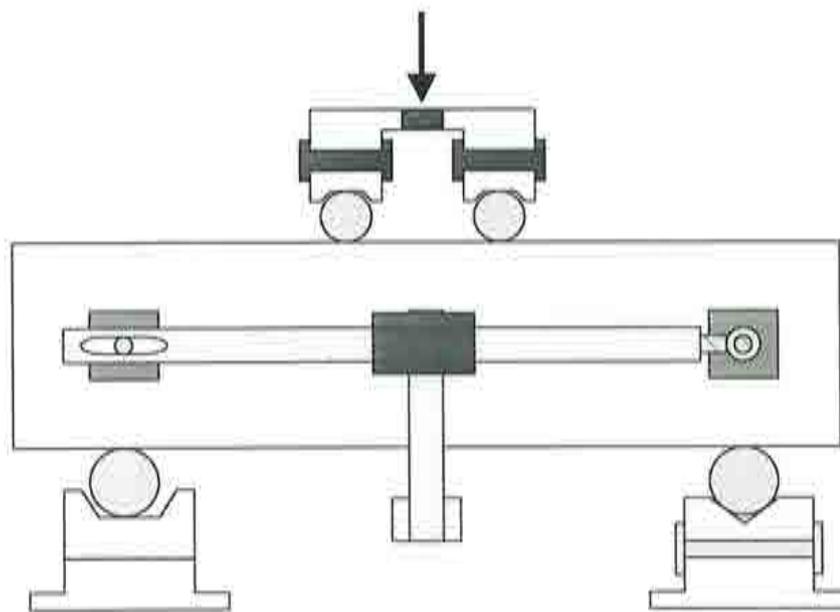


Fig 2.5.- Configuración tipo de un ensayo de flexotracción en cuatro puntos

La medida del desplazamiento neto (flecha) de la probeta en el centro de la luz se especifica en la mayoría de las normas y recomendaciones. Ello se debe a que es fácil de configurar y sólo se precisa un sensor de desplazamiento colocado en el centro de una de las caras. No obstante, la medición de los desplazamientos de los puntos de carga es preferible y más útil porque propicia el cálculo directo de la energía absorbida, tal como se explicará posteriormente.

Las mediciones de estos desplazamientos se hacen usando transductores electrónicos. Sin embargo, unas normas también permiten el uso de relojes comparadores u otros extensómetros mecánicos. Por otra parte, la carga se aplica a través de elementos interpuestos que permiten la libre rotación de la probeta. La carga total se mide mediante una célula de carga. Los ensayos deben realizarse en una máquina de ensayos rígida con una velocidad de desplazamiento prescrita (normalmente se especifica el rango de velocidades de desplazamiento permitido). Cuando se emplea una máquina hidráulica convencional es necesario controlarla a través de servocontrol para obtener la velocidad de desplazamiento especificada. Las máquinas electromecánicas permiten cargar a velocidades constantes de desplazamiento del cabezal. La respuesta carga-desplazamiento se registra gráficamente de forma continua. En el caso de usar extensómetros mecánicos se permite graficar los resultados punto a punto.

Mientras que la geometría de las probetas y los procedimientos de ensayo son comparables en la mayoría de las normas, el modo de emplear los resultados para evaluar la tenacidad puede diferir de forma significativa. Estos resultados pueden tratarse en términos de diferentes indicadores de la tenacidad como son, entre otros, los índices adimensionales basados en la energía, la capacidad de absorción de energía, los índices adimensionales basados en la resistencia, la resistencia equivalente a flexotracción y los índices adimensionales basados en el desplazamiento. A continuación se incide en la evaluación de los citados indicadores de la tenacidad.

2.4.1.1.- Índices adimensionales basados en la energía

El índice de tenacidad contemplado en la recomendación ACI 544.2R (1988), fundamentado en la propuesta de Henegar (1978), fue el primer índice adimensional basado en la energía utilizado para caracterizar el comportamiento de los hormigones reforzados con fibras de acero; ello constituyó el primer gran esfuerzo en reconocer que la absorción de energía podía ser un parámetro importante frente a la resistencia como propiedad más convencional usualmente asumida para caracterizar al hormigón.

El índice de tenacidad ACI 544 se define por el cociente entre el área bajo la curva carga-desplazamiento hasta el desplazamiento de 1.9 mm y el área bajo la misma curva hasta la flecha correspondiente a la primera fisura, δ_f . Uno de los inconvenientes de esta definición es que el desplazamiento de primera fisura, tal como se indica más adelante, es difícil de determinar de una forma objetiva y que el límite de deformación de 1.9 mm establecido es totalmente arbitrario. En realidad los límites de flecha deberían basarse en requisitos de servicio o estados límites de servicio, y, por consiguiente ser específicos para cada aplicación.

Por otra parte, la recomendación ASTM C 1018 (1992) utiliza esencialmente la misma idea básica. La diferencia más significativa radica en que los límites de los desplazamientos se especifican como múltiplos del desplazamiento correspondiente a la primera fisura. Por ejemplo, los índices de tenacidad I_5 e I_{20} se calculan, respectivamente, con los límites de desplazamiento correspondientes a $3\delta_f$ y $10.5\delta_f$; estos aspectos se visualizan en la figura 2.6 anteriormente presentada. Para un material elasto-plástico, los valores de estos índices son, respectivamente, 5 y 20. Por otro lado, los índices de ASTM C 1018 dependen más de la determinación de la primera fisura que el índice de tenacidad del ACI 544.

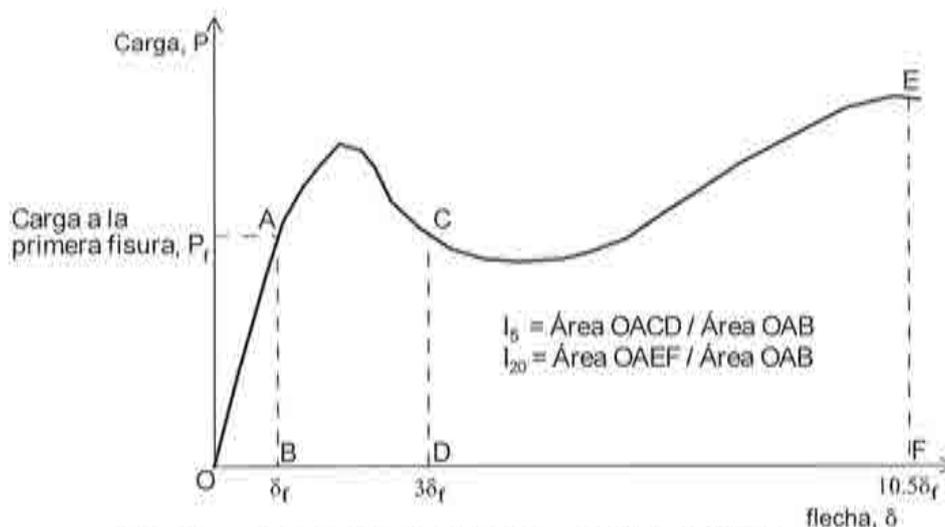


Fig. 2.6.- Índices de tenacidad según ASTM C 1018

La norma española UNE 83-510 requiere, tal como se ha expuesto en el apartado 2.3, el cálculo de un índice adimensional equivalente al I_{30} del ATSM C 1018 (determinado hasta un desplazamiento igual a $15.5 \delta_f$) quizás asumiendo implícitamente que para límites menores de desplazamiento un índice como este no es una medida suficientemente sensible de la tenacidad. También, según la citada norma UNE, debe incluirse en el informe la resistencia a primera fisura y la tenacidad (capacidad de absorción de energía) al igual que en la norma japonesa (JCI-SF4, 1984).

En una reciente revisión, el comité ACI 544 recomienda un índice de tenacidad alternativo, I_t , que se define como el cociente entre la capacidad de absorción de energía de una probeta de hormigón reforzado con fibras y la capacidad correspondiente a una probeta del mismo hormigón sin fibras. Esta definición proporciona una medida clara de la efectividad de la incorporación de las fibras hasta la rotura de la probeta; no obstante, la necesidad de ensayar la probeta de hormigón sin fibras hasta la rotura dificulta la implementación práctica del índice I_t .

2.4.1.2.- Capacidad de absorción de energía

La definición de la tenacidad en términos de la capacidad de absorción de energía según el Instituto Japonés del Hormigón (JCI-SF4, 1984), expresada por T_{JCI} , se calcula, para

un tamaño estándar de probeta, como el área bajo la curva carga-desplazamiento hasta un límite de desplazamiento igual a $l/150$. En otras normas y procedimientos de ensayo de Bélgica (IBN, 1992a), Holanda (CUR, 1994), Alemania (DBV, 1991, 1992a, 1992b), RILEM 49 TFR (1984) y España (AENOR UNE 83-510) también se han propuesto índices similares. Asimismo, Gopalaratnam et al. (1989, 1991) han puesto de manifiesto que la capacidad de absorción de energía, definida como la energía absorbida por unidad de área transversal de la probeta, evaluada para cualquier límite de desplazamiento, tiene una alta sensibilidad para la caracterización de la tenacidad, así como la capacidad de poder correlacionarse con otros parámetros de fractura del material.

Una limitación de la medida de la tenacidad en términos de capacidad de absorción de energía es que ésta depende del tamaño de la probeta (Gopalaratnam et al., 1989, 1991; Trottier y Banthia, 1994). Sin embargo, para un tamaño determinado, este valor sirve de referencia, por ser más sensible al tipo y contenido de fibra que los índices adimensionales de la norma ASTM. La otra limitación de la definición de la tenacidad del JCI es que el desplazamiento límite es muy grande y no es representativo del desplazamiento en servicio correspondiente a la mayoría de las aplicaciones. Las recomendaciones belga, holandesa y alemana han superado, en parte, esta limitación al requerir el cálculo de la absorción de energía para desplazamientos más pequeños.

Es importante reseñar que las recomendaciones alemanas (DBV, 1991, 1992a, 1992b) especifican la capacidad de absorción de energía de forma tal que se refleja explícitamente la influencia de la incorporación de fibras. La idea básica tiene algunas similitudes con el índice I_f del ACI 544. En este sentido, se calcula la capacidad de absorción de energía de una probeta de hormigón con fibras hasta un límite especificado de desplazamiento y se resta la contribución idealizada de una probeta de hormigón sin fibras de igual tamaño, tal como se ilustra en la figura 2.7. Así, se eliminan las limitaciones del índice I_f de ensayar las probetas hasta rotura.

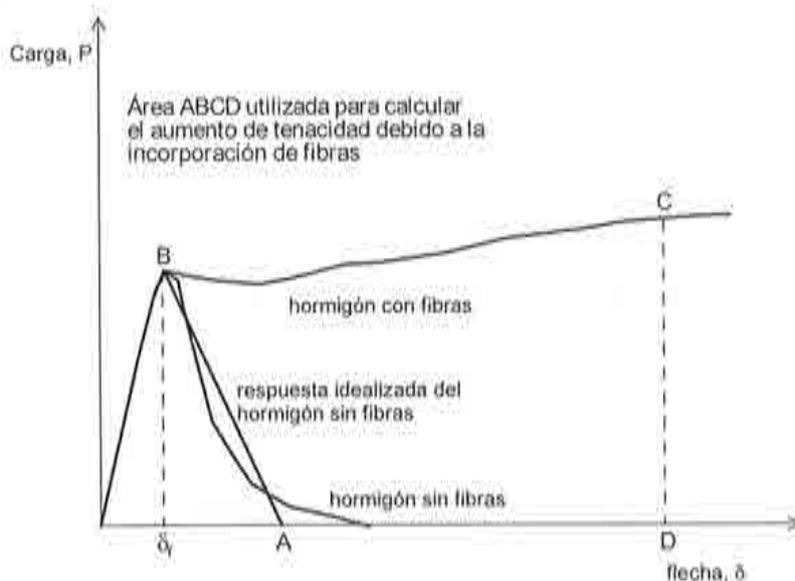


Fig. 2.7.- Medida de la tenacidad según las recomendaciones alemanas

2.4.1.3.- Índices adimensionales basados en la resistencia

Mientras no se asuman de un modo generalizado los procedimientos o bases de cálculo basados en la energía puede resultar de interés implementar un cálculo basado en la resistencia post-fisuración. En este sentido existen diferentes normas y recomendaciones que contemplan índices adimensionales basados en la capacidad de carga en régimen de post-fisuración.

Por ejemplo, la norma belga determina además de la tenacidad basada en la energía absoluta, cocientes adimensionales de carga para distintos desplazamientos; estos cocientes se definen, para cada desplazamiento en el post-pico, mediante la relación entre la carga correspondiente al desplazamiento considerado y la carga de primera fisura. La norma francesa considera exclusivamente cocientes de carga a deformaciones prescritas para representar la tenacidad.

2.4.1.4.- Resistencia residual

La norma ASTM C 1018 considera, además de índices adimensionales basados en la energía, el cálculo de índices de resistencia residual expresados por $R_{5,10}$ y $R_{10,20}$; éstos se evalúan, respectivamente, mediante las relaciones $20(I_{10} - I_5)$ y $10(I_{20} - I_{10})$ que representan los cocientes entre la resistencia media en el intervalo $3\delta_f$ y $5.5\delta_f$, y $5.5\delta_f$ y $10.5\delta_f$ (respectivamente), y la resistencia a primera fisura.

2.4.1.5.- Resistencia equivalente a flexotracción

La norma japonesa (JCI-SF4, 1984) contempla el empleo de la resistencia equivalente a flexotracción (σ_b) expresada por la relación $T_{JCI} / (\delta_{limit} bd^2)$, en donde T_{JCI} es el área bajo la curva carga-desplazamiento hasta el límite de desplazamiento $\delta_{limit} = l/150$, y l , b y d son la luz, espesor y canto de la viga, respectivamente. Las normas alemana y belga (CUR, 1994; IBN, 1992a, 1992b) también consideran resistencias equivalentes similares correspondientes a dos límites distintos de desplazamiento. La norma belga utiliza los límites de desplazamiento de $l/300$ y $l/150$ mientras que la norma alemana especifica límites de 1.5 y 3 mm.

2.4.2.- Otros ensayos para caracterizar la tenacidad

2.4.2.1.- Ensayos de flexotracción en tres puntos

El ensayo de flexotracción en tres puntos de carga constituye, tal como se ha citado con anterioridad, otra vía experimental para caracterizar la tenacidad de los hormigones con fibras. Esta modalidad de ensayo es similar a la de cuatro puntos, pero aplicando la carga en el centro de la luz.

Gopalaratnam et al. (1989, 1991) han propuesto la utilización de este ensayo sobre probetas con una entalla en centro de la luz practicada una vez ha endurecido el hormigón. El

ensayo se realiza normalmente en una prensa servohidráulica mediante control por lazo cerrado adoptando como variable de control la *apertura de la fisura* (CMOD¹). La tenacidad se caracteriza en términos de los desplazamientos siguiendo el procedimiento de ASTM C 1018.

Esta configuración, la cual se ilustra en la figura 2.8, tiene numerosas ventajas, una de las cuales es garantizar la estabilidad de la respuesta a lo largo del ensayo incluso para hormigones sin fibras o para hormigones de alta resistencia con bajo contenido de fibras (Chern y Tarng, 1990; Bryars et al., 1994a, 1994b; Khajuria et al., 1994). A diferencia de las probetas sin entalla, la deformación en las probetas con entalla se localiza siempre en el plano de la entalla y el resto de la probeta no experimenta deformaciones no lineales significativas. Esto minimiza la energía disipada en todo el volumen de la probeta y, por tanto, toda la energía disipada puede atribuirse directamente a la propagación de la fisura. En consecuencia, la energía disipada puede correlacionarse directamente con la respuesta del material.

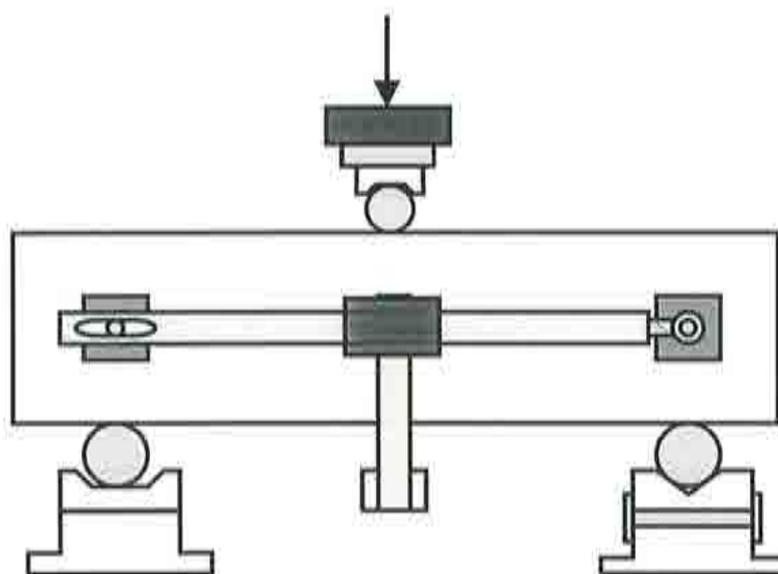


Fig.2.8.- Configuración tipo de un ensayo de flexotracción en tres puntos con entalla

Otra de las ventajas de la utilización de probetas con entalla radica en la posibilidad de caracterizar la tenacidad en términos de la apertura de la fisura (CMOD) en vez del desplazamiento de la probeta (Gopalaratnam et al., 1989; Bryars et al., 1994a, 1994b). En principio, las medidas de tenacidad discutidas anteriormente, basadas en la respuesta carga-desplazamiento, pueden ser adaptadas a la respuesta carga-CMOD. Asimismo, Gopalaratnam et al. (1989, 1991) han puesto de manifiesto que los índices de tenacidad así obtenidos son tan sensibles al efecto derivado de la incorporación de las fibras como los índices obtenidos en ensayos de flexotracción en cuatro puntos (sin entalla), pero presentando una menor dispersión. Por otra parte, esta configuración supone una mayor complejidad operativa asociada a la materialización de la entalla sobre la probeta de hormigón.

¹ derivado de la denominación Crack mouth opening displacement en inglés

2.4.2.2.- Ensayo de placa

Además de los ensayos de flexotracción en sus distintas modalidades para caracterizar la tenacidad de los hormigones con fibras, se han desarrollado ensayos de flexión de placa. La EFNARC (1993) recomienda el uso de este ensayo para caracterizar la capacidad de absorción de energía en hormigones proyectados con fibras, en el cual se utiliza una placa de 600×600 mm (100 mm de espesor) apoyada en los bordes de un cuadrado de 500×500 mm. La carga se aplica sobre una sección de 100×100 mm con una velocidad de 1.5 mm/min. La capacidad de absorción de energía se obtiene a partir del diagrama carga-desplazamiento (en el centro de la placa) hasta un desplazamiento de 25 mm.

2.4.3.- Aspectos relevantes relativos a la evaluación experimental de la tenacidad

En apartados anteriores se han expuesto distintas facetas que conciernen a los procedimientos de ensayo para evaluar la tenacidad del hormigón con fibras desde una vertiente experimental. Dentro de este contexto, en el presente apartado se incide en aspectos vinculados a los procedimientos de ensayo que pueden ser origen de errores en la obtención y validación de los resultados obtenidos y en la cuantificación de los diferentes indicadores que se realiza fruto de los mismos; éstos se refieren a la precisión en la medida del desplazamiento, la inestabilidad después de la fisuración de la matriz y la identificación de la primera fisura.

2.4.3.1.- Precisión en la medida del desplazamiento

La medición de la flecha y su influencia sobre la cuantificación de la tenacidad han sido analizados en recientes estudios (Gopalaratnam et al., 1989, 1991; Trottier y Banthia, 1994; El-Shakra y Gopalaratnam, 1993). Los errores en la medición del desplazamiento correspondiente a la primera fisura (δ_f) pueden traducirse en errores importantes de las medidas de tenacidad que se basan en el citado desplazamiento. Por ejemplo, la tenacidad a primera fisura, que es el denominador en el índice ASTM, se ve influenciada por imprecisiones en la medición de δ_f . También, puesto que los límites de desplazamiento usados para el cálculo de los índices de tenacidad ASTM están definidos como múltiplos de δ_f , el numerador en estos índices se ve también afectado de forma significativa.

2.4.3.2.- Inestabilidad después de la fisuración de la matriz

Para hormigones con bajo contenido de fibras es frecuente que la fisuración de la matriz provoque una pérdida de carga que conduce a la pérdida temporal de estabilidad en el ensayo. En consecuencia, la respuesta carga-desplazamiento registrada en este régimen no puede ser considerada como la respuesta válida. En este sentido, debe tenerse en cuenta que valores de tenacidad calculados a niveles bajos de deformación (<1 mm) como los de $3\delta_f$ y $5.5\delta_f$ regularmente entran en este régimen de inestabilidad. Sin embargo, la capacidad de absorción de energía evaluada para límites de desplazamiento mayores (fuera del régimen de inestabilidad) se ve poco influenciada por este fenómeno. La realización de ensayos sobre probeta con entalla usando el control por CMOD garantiza la estabilidad en todo momento

durante el ensayo (Batson y Eissa, 1992; Chern y Tarng, 1990; Bryars et al., 1994a, 1994b; Khajuria et al., 1994) lo cual induce una mayor fiabilidad en los resultados obtenidos, obviando la problemática relativa a la inestabilidad temporal en la zona inmediatamente posterior al pico de carga.

2.4.3.3.- Identificación de la primera fisura

Tal como se ha puesto de manifiesto anteriormente, la identificación de la primera fisura puede no resultar objetiva. El punto de primera fisura se define generalmente como el punto de la curva carga-desplazamiento en el cual la forma de la curva se convierte por primera vez en no lineal. La determinación de este punto en la práctica es ambigua y depende, entre otros factores, de la resolución del equipo registrador y el juicio del operador (Trottier y Banthia, 1994). Ello es particularmente cierto para probetas que muestran un aumento de la resistencia post-fisura. Para dichas respuestas, distintas recomendaciones (AFNOR, 1993; DBV, 1991, 1992a, 1992b; IBN, 1992a, 1992b) adoptan una definición más objetiva de la primera fisura análoga a la especificación del límite de fluencia del acero. La figura 2.9 muestra la definición de la primera fisura (DBV, 1991, 1992a, 1992b) para tres tipos de respuestas carga-desplazamiento; marcadas con • sobre cada curva. Se traza una línea paralela al pendiente inicial de la curva a una flecha de 0,1 mm y se considera la máxima carga observada anterior a la intersección de la curva con esta línea como la carga a la primera fisura.

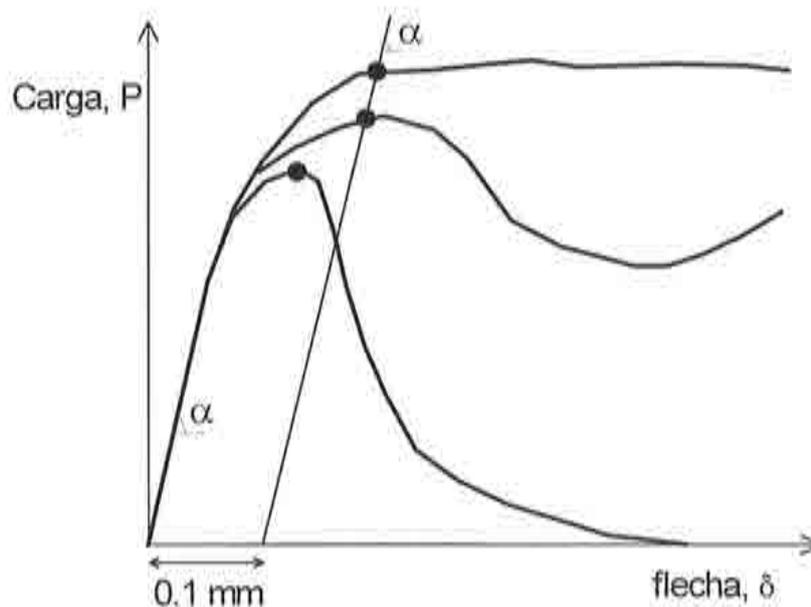


Fig. 2.9.- Definición de la primera fisura según distintas respuestas carga-desplazamiento

CAPÍTULO 3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1.- INTRODUCCIÓN

En el capítulo precedente se han revisado distintos aspectos que conciernen al marco normativo referente a la evaluación experimental de la tenacidad del hormigón reforzado con fibras de acero. En este capítulo se exponen las diferentes facetas relativas al estudio experimental realizado para analizar la influencia que presentan sobre la tenacidad del hormigón con fibras distintas variables asociadas a la fabricación y al propio procedimiento de ensayo utilizado para su evaluación.

La evaluación de la tenacidad a flexotracción del hormigón con fibras, asociada fundamentalmente a la respuesta del material a partir de la carga de fisuración, requiere técnicas de ensayo que permitan reflejar adecuadamente el comportamiento del material durante la rotura y que proporcionen la información necesaria para cuantificar este comportamiento. Ello confiere un aspecto claramente diferenciado en cuanto a las técnicas de ensayo usuales en el hormigón sin fibras, en donde, dada la fragilidad del material, el énfasis principal es en la rama ascendente hasta la carga de pico, la cual puede asimilarse, en primera aproximación, a la carga de rotura del material. Así, la cuantificación del efecto resultante de incorporar las fibras en el hormigón conduce necesariamente a formas o modos de control del

ensayo que permitan el registro de la respuesta del material en forma estable desde la carga de pico hasta la rotura completa.

Las directrices básicas del trabajo experimental desarrollado se articulan en torno a dos etapas principales de actuación; una relativa al análisis de la influencia del sistema de compactación del hormigón en la orientación y distribución de las fibras, y en la respuesta mecánica del mismo. La otra, con un tratamiento más exhaustivo que la anterior, se centra en la utilización de distintas configuraciones de ensayo por flexión para evaluar el comportamiento del hormigón con fibras en términos de los parámetros asociados a la medida de su tenacidad.

La campaña experimental se ha realizado sobre tres hormigones base, a los cuales se han incorporado fibras metálicas de distinto tipo y en diferentes proporciones. Estos hormigones corresponden a dos hormigones de resistencia normal, denominados por C20 y C30, respectivamente de resistencias a compresión a los 28 días de 20 MPa y 30 MPa, y uno de alta resistencia, denominado por C70, de 70 MPa de resistencia a compresión a los 28 días, todas ellas evaluadas sobre probetas cilíndricas de 150×300 mm. Ello propicia el análisis del efecto de la incorporación de las fibras metálicas en un amplio rango de resistencias del hormigón base, en donde la fragilidad del mismo aumenta a medida que lo hace la resistencia a compresión.

Se han considerado tres sistemas de compactación configurados por una vibración externa con mesa vibrante y dos sistemas internos: barra metálica y vibrador de aguja. La respuesta mecánica en esta etapa del estudio se ha evaluado mediante ensayos de flexión en la configuración de carga centrada y ensayos de resistencia a compresión.

Dentro de los ensayos para evaluar la tenacidad se han considerado tres posibles configuraciones de ensayos de flexión: mediante cuatro puntos de carga, también conocidos por ensayos con carga a tercios de la luz (TPL), mediante tres puntos de carga, también conocidos por ensayos con carga centrada (CPL) y mediante carga centrada con probetas entalladas. Asimismo, en esta etapa se han analizado también otros parámetros asociados a los ensayos de flexotracción como son el posicionamiento de la probeta en el bastidor de carga en relación con la dirección de hormigonado de la probeta, y la velocidad de aplicación de la carga durante el ensayo.

A continuación se incide en detalle en los aspectos relativos a los materiales componentes, dosificaciones, fabricación del hormigón y de las probetas, así como a los procedimientos de ensayo seguidos en el estudio experimental.

3.2.- MATERIALES COMPONENTES Y DOSIFICACIONES

Los materiales componentes utilizados para la fabricación de los hormigones contemplados en este estudio son materiales locales empleados usualmente en la fabricación industrial de hormigones en el entorno de las empresas catalanas. Se han considerado tres tipos de hormigón, dos de resistencia normal y uno de alta resistencia, a los cuales se han incorporado las fibras metálicas.

Se han utilizado dos tipos de cemento, CEM I 42.5R, para la fabricación de los hormigones de resistencia normal, y CEM I 52.5R, para la fabricación del hormigón de alta resistencia.

Para el esqueleto granular se han empleado como áridos dos tipos de arena y tres tipos de grava, todos ellos de machaqueo, cuyas fracciones granulométricas, naturaleza designación y procedencia se exponen en la tabla 3.1, mientras que las características físicas de los mismos que se han evaluado en este estudio se presentan en la tabla 3.2.

ARIDOS	Naturaleza	Designación	Procedencia
Arena 0-5 mm	Silíceo	SS	SMS
Arena 0-5 mm	Caliza	SL	Cementos Molins
Grava 5-12 mm	Caliza	G1	Montsolvent,S.A.
Grava 5-12 mm	Caliza	G2	Cementos Molins
Grava 12-20 mm	Caliza	G3	Cementos Molins

Tabla 3.1.- Áridos utilizados en el estudio

ARIDOS	SS	SL	G1	G2	G3
Módulo de finura	25	31	-	-	-
Densidad seca (Kg/l)	261	269	261	268	270
Coefficiente de absorción (%)	25	13	7	11	6

Tabla 3.2.- Características de los áridos utilizados

Los aditivos empleados son un plastificante (PF-75 de Bettor MBT) y un superplastificante (DARACEM 195 de Grace), cuyas características (densidad y contenido de sólidos) se exponen en la tabla 3.3. La adición mineral utilizada para el hormigón de alta resistencia es un humo de sílice en forma condensada, ELKEM Grade 920D. El agua empleada corresponde a la red urbana de Barcelona.

ADITIVOS	TIPO	Densidad (kg/l)	Contenido sólidos (%)
Meleret PF-75 (Bettor MBT)	Plastificante (lignosulfonato modificado)	1.18	40
Daracem 195 (GRACE)	Superplastificante (naftaleno)	1.16	35

Tabla 3.3.- Aditivos utilizados en el estudio

Las fibras metálicas utilizadas han sido suministradas por BEKAERT. En la tabla 3.4 se muestran algunas de sus características extraídas de la documentación técnica facilitada por la citada empresa. Todas ellas corresponden a la denominación DRAMIX™; un tipo de fibras metálicas con alto contenido de carbono (fibras de alta resistencia) y otro con bajo contenido de carbono (fibras de resistencia normal).

Propiedad	RL45/50BN	RC65/60BN	RC80/60BN	ZC30/0.50
Contenido en carbono	bajo	bajo	bajo	alto
Resistencia a tracción (MPa)	1000	1000	1100	2500
Máxima elongación* (%)	0.8	0.8	0.8	1.0
Longitud (mm)	50	60	60	30
Aspecto (longitud/diámetro)	48	67	80	60
Encoladas/sueltas	sueltas	encoladas	encoladas	encoladas

* Valores mínimos

Tabla 3.4.- Tipo y características de las fibras (suministradas por BEKAERT)

En la tabla 3.5 se presentan los materiales componentes y las dosificaciones correspondientes a los hormigones empleados. La relación agua/cemento que figura en la citada tabla corresponde al agua efectiva en el hormigón la cual viene dada por el agua de amasado (agua añadida) más el agua aportada por el aditivo más el agua aportada por la humedad de los áridos menos el agua de absorción de los mismos (agua absorbida por los áridos secos tras 24 horas de inmersión dada por el coeficiente de absorción).

Las dosificaciones C20 y C30 son dosificaciones usuales en la producción industrial de hormigones (Planta de PROMSA, S.A., en la Zona Franca de Barcelona), mientras que la dosificación C70 se ha obtenido aplicando un procedimiento de optimización de hormigones de altas prestaciones desarrollado en la Universitat Politècnica de Catalunya (Toralles et al., 1996) para obtener la resistencia deseada con un asiento alto en el cono de Abrams. Estas dosificaciones no se han modificado cuando se han incorporado las fibras al hormigón.

Con los hormigones base (C-20, C-30 y C-70) y las fibras que se han adoptado en este estudio se han fabricado los hormigones con fibras que se han ensayado en el laboratorio. A efectos de facilitar el seguimiento de los temas relativos a la campaña experimental realizada, las composiciones de los hormigones empleados en las diferentes etapas de la misma se explicitan en los capítulos 4 y 5 correspondientes a la presentación y análisis de los resultados obtenidos.

COMPONENTE	C 20	C 30	C 70
Tipo de cemento	I 42.5	I 42.5R	I 52.5R
Contenido de cemento (kg/m ³)	256	349	457
Agua total añadida (kg/m ³)	195	200	143
Tipo de arena 0-5 mm	SL	SL	SS
Contenido de arena (kg/m ³)	999	873	869
Tipo de grava 5-12 mm	G2	G2	G1
Contenido de grava 5-12 mm (kg/m ³)	154	140	869
Contenido de grava 12-20 mm (kg/m ³)	795	838	---
Tipo de aditivo	PF-75	PF-75	Daracem 195
Contenido de aditivo (l/m ³)	1.0	1.0	25.4
Contenido de humo de sílice (kg/m ³)	---	---	46
Relación agua/cemento	0.69	0.53	0.34

Tabla 3.5.- Dosificaciones de los hormigones

3.3.- FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN Y DE LAS PROBETAS DE ENSAYO

Los áridos utilizados se han mantenido almacenados en el laboratorio en bolsas cerradas y protegidas de las acciones climáticas hasta la fabricación del hormigón. Antes de su utilización se han secado al aire y se ha determinado su humedad para proceder a la pertinente corrección del agua de amasado. El cemento, los aditivos y el humo de sílice se han mantenido en sus envases de origen, aislados del suelo, en un lugar protegido con ambiente seco y ventilado.

El hormigón se ha fabricado en una amasadora de eje vertical de 250 l de capacidad nominal, dotada de tres dispositivos distintos de amasado constituidos por una araña, un agitador de alta velocidad y el giro de la propia cuba. La araña consiste en cuatro palas que giran según un eje excéntrico respecto al de la cuba y en el mismo sentido que ésta, siendo la mayor responsable del corte y amasado de la mezcla. El agitador hace un efecto de batido y colabora en menor medida que la araña al amasado de la mezcla; su giro es en el mismo sentido que el giro de la cuba y de la araña.

Se ha adoptado una velocidad de giro de la cuba reducida (6 rpm) frente a la de las palas de la araña (60 rpm) en orden a evitar la acumulación de fibras en las palas y posibles deformaciones de las mismas en estas zonas.

La secuencia y tiempos de amasado han sido los siguientes. En primer lugar el cemento, el humo de sílice y los áridos se mezclan en seco durante un minuto; a continuación se añade el agua y el aditivo y se mezcla durante dos minutos. Finalmente, se incorporan las fibras y se prosigue el amasado durante dos minutos. Se ha adoptado esta secuencia frente a la opción de incorporar las fibras con los áridos para evitar posibles doblados de las fibras durante el amasado.

Para la confección de las probetas se han utilizado moldes de acero de forma prismática (150×150×600 mm) y cilíndricos (150×300 mm). Las cilíndricas se han fabricado

en dos tongadas, mientras que las probetas prismáticas se han fabricado vertiendo el hormigón en la zona central de la probeta y desplazándolo hacia los extremos (según, por ejemplo, Fattuhi and Hughes, 1982); en la figura 3.1 se visualiza esquemáticamente la secuencia de vertido utilizada para la fabricación las probetas prismáticas.

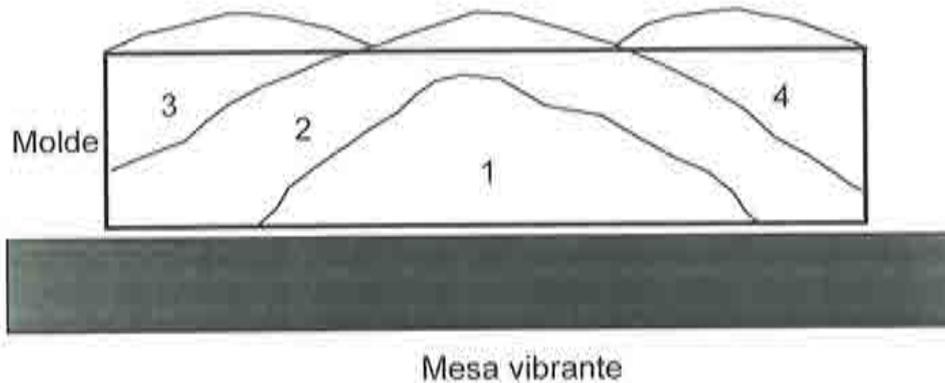


Fig.3.1.- Secuencia de llenado de los moldes prismáticos

Las probetas, excepto las destinadas al estudio relativo a la influencia del sistema de compactación, se han compactado externamente mediante una mesa vibrante con una amplitud de vibración baja y una frecuencia de alrededor de 11000 rpm durante 20 segundos, tiempo que está en el rango de 15 a 60 segundos recomendado en la norma francesa AFNOR P 18-409 (1993). Este modo de compactación es el especificado en distintas normativas y recomendaciones (ACI 544, 1988; AENOR UNE 83-504, 1990; ASTM C 1018, 1992; AFNOR P 18-409, 1993) para el hormigón con fibras de acero.

En todos los casos se ha procedido manualmente al acabado y enrase de las caras superiores de las probetas y, posteriormente, a enfundarlas en bolsas de plástico. A las 24 horas se ha realizado el desmoldeo y traslado de las probetas a la cámara húmeda (20°C, 98% H.R.) para su conservación hasta el momento de realizar los ensayos.

En las probetas prismáticas con entalla, la entalla se ha dispuesto en la sección de centro luz, en la cara de tracción, y se ha materializado mediante corte con sierra de diamante, a la edad de 28 días. Estas entallas son de distinta longitud (12, 25 y 50 mm), todas ellas de 3 mm de ancho.

3.4.- PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO

En este apartado se presentan los aspectos relativos a la metodología seguida en los diferentes ensayos contemplados en este estudio. En primer lugar, se exponen los procedimientos relativos a la evaluación de la distribución y orientación de las fibras y la influencia que presenta en las mismas el método de compactación. Seguidamente, se incide en las facetas relativas a los ensayos de flexión realizados.

3.4.1.- Influencia del sistema de compactación en la distribución y orientación de las fibras

Se han considerado tres sistemas de compactación para el hormigón con fibras, una vibración externa con mesa vibrante, realizada según se ha expuesto en el apartado anterior, y dos vibraciones internas mediante picado con barra y mediante vibrador de aguja. En todos ellos se han adoptado probetas prismáticas de 150×150×600 mm.

El picado se ha realizado mediante barra metálica de 15 mm, con 25 golpes, en el centro y extremos de la probeta. La aguja vibrante utilizada es de 28 mm y 400 Hz de frecuencia, habiéndose aplicado en puntos a cuartos de la luz y durante 15 segundos en cada punto. En la figura 3.2 se esquematiza la compactación realizada mediante la aguja vibrante.

La distribución y orientación de las fibras se ha evaluado en diferentes secciones de la probeta obtenidas por corte mediante sierra de diamante, según diferentes planos principales; se ha empleado un lupómetro para observar las fibras visualmente, y se ha calculado el porcentaje de fibras en las zonas observadas.

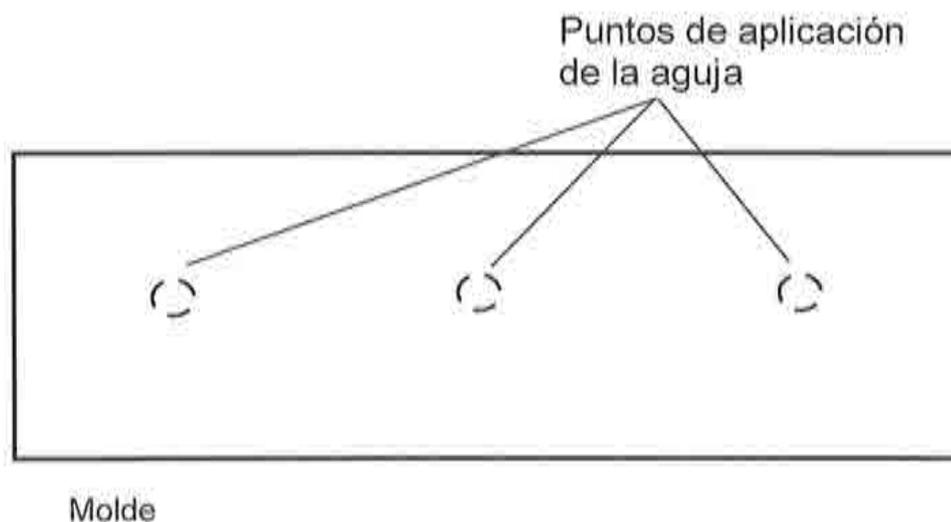


Fig. 3.2.- Esquema de la compactación mediante aguja vibrante (en planta)

3.4.2.- Ensayos de flexotracción

Los ensayos de flexotracción contemplados comprenden tres configuraciones distintas de carga. Estas corresponden a la carga aplicada a tercios de la luz, la carga aplicada en el centro de la probeta, en ambos casos con probetas prismáticas convencionales, y a la carga aplicada en el centro pero con probetas entalladas.

La configuración usualmente utilizada para determinar la resistencia a flexotracción y la tenacidad del hormigón con fibras es la de viga simplemente apoyada con carga a tercios de la luz, también conocida por ensayo de flexión con cuatro puntos de carga (AENOR UNE 83-510, 1989; ASTM C 1018, 1992; DBV, 1992a; NBN N 15-238, 1992; AFNOR P 18-409, 1993); esta configuración, en lo que concierne al presente estudio, se designa por TPL y se visualiza en la figura 3.3a.

Además de esta configuración, se han realizado ensayos de flexotracción con carga centrada, también conocidos por ensayos de flexión con tres puntos de carga; esta configuración se designa por CPL y se ilustra en la figura 3.3b.

En ambos casos las probetas ensayadas son prismáticas, de sección transversal cuadrada (150×150 mm) y 600 mm de longitud. La luz libre o distancia entre apoyos es de 450 mm. En la configuración TPL las cargas se aplican simétricamente a 75 mm del centro de la probeta, tal como se contempla en distintos códigos y recomendaciones como son, entre otros, JCI-SF2 (1984), AENOR UNE 83-510 (1989), ASTM C 1018 (1992) y NBN B 15-238 (1992).

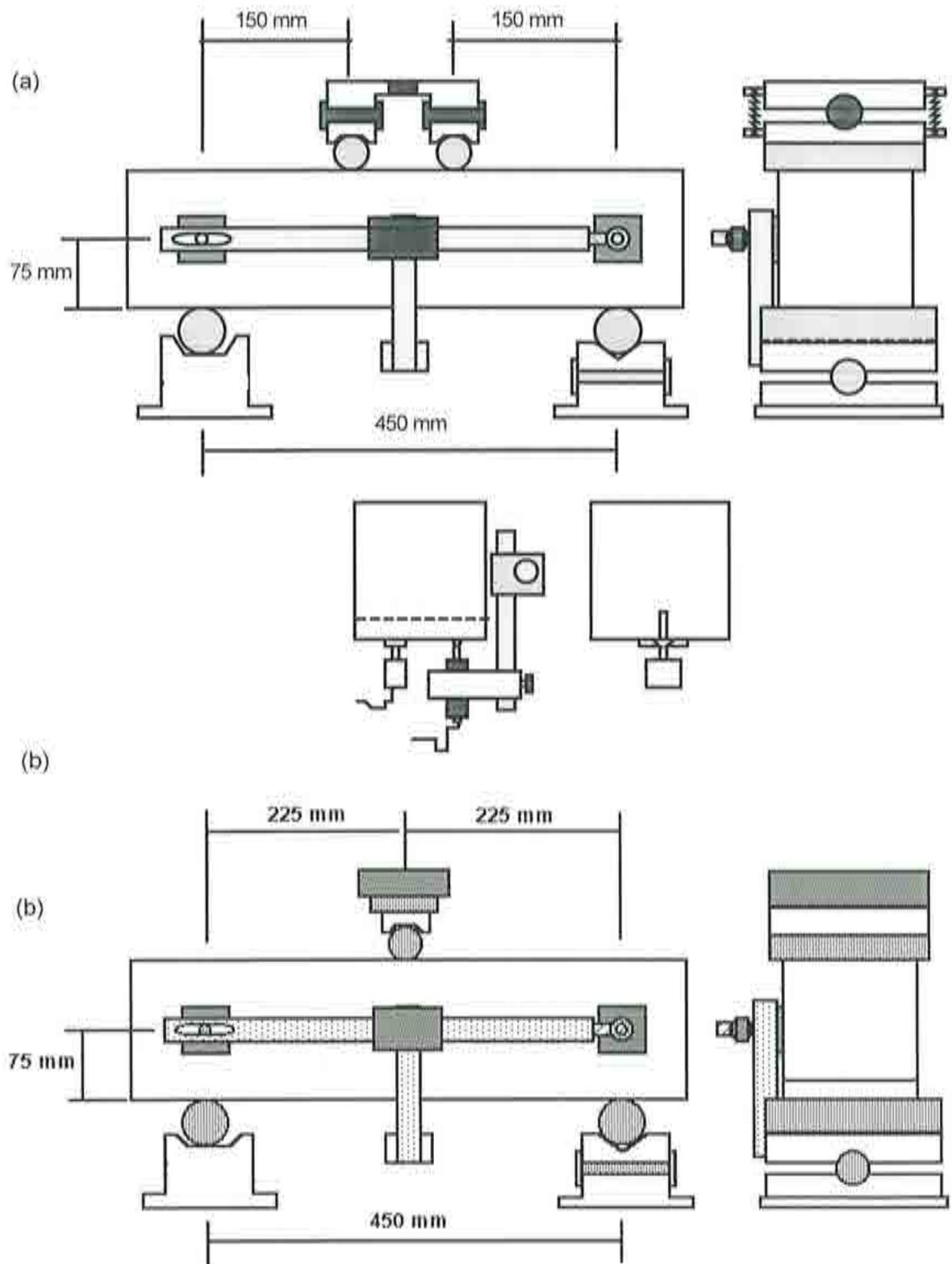


Fig. 3.3.- Ensayo de flexión
(a) con carga a tercios de la luz (TPL) y (b) con carga centrada (CPL)

La flecha en el centro de la luz se mide con un sensor de desplazamiento dispuesto sobre un soporte rígido unido a la probeta.

Los apoyos de la probeta y los soportes de aplicación de la carga están constituidos por rodillos metálicos de 20 mm de diámetro y 160 mm de longitud de acuerdo con las directrices al respecto contempladas en la norma AENOR UNE 83-509 (1988). Este sistema elimina efectos torsionales debidos a imperfecciones de los moldes y a deformaciones asimétricas durante la carga.

Los ensayos de flexión en sus distintas configuraciones se han realizado en una prensa servohidráulica INSTRON 8505 Plus con capacidad dinámica de 1 MN. El control del ensayo y la adquisición de datos se ha realizado mediante un controlador digital de lazo cerrado con software INSTRON Wavemaker. Este sistema permite adoptar la carga, la deflexión (flecha) y la apertura de fisura como variables de control en el ensayo; dentro del Anejo I del presente documento se expone los fundamentos de la utilización de prensas servohidráulicas y de los posibles modos de control de ensayo.

La carga se ha medido con una célula de carga de 100 kN montada entre el actuador y los puntos de carga. La flecha o deflexión en el punto medio de las vigas se ha medido mediante un LVDT Schaevitz (recorrido de ± 5 mm). En la configuración CPL con probetas entalladas, para la medida del desplazamiento de la apertura de fisura (CMOD) se ha empleado un extensómetro de clip INSTRON (recorrido de ± 2 mm) dispuesto sobre dos cuchillos (chapas metálicas) pegados, uno a cada lado de la entalla, sobre la cara inferior de la probeta y distantes 3.5 cm entre ejes.

A efectos de visualizar las tres configuraciones de ensayo utilizadas, en las fotos 3.1 y 3.2 se ilustra el ensayo de flexotracción según las tres referidas configuraciones (carga a tercios de la luz y carga centrada, respectivamente). En ellas puede apreciarse también los equipos de medida utilizados en cada caso.

Las probetas se han posicionado en el bastidor de carga giradas 90° respecto a la dirección del llenado de las mismas, es decir, apoyando los rodillos para la aplicación de la carga sobre una de las caras laterales longitudinales en contacto directo con el molde, siguiendo las directrices de las recomendaciones ASTM C 1018 (1992) y JCI-SF4 (1984). En este sentido la norma española UNE 83-509 establece un posicionamiento de la probeta sin girar, aplicando la carga directamente en la misma dirección en la que se ha llenado la probeta. Este hecho puede tener sentido desde el punto de vista de la aplicación del hormigón con fibras en elementos estructurales, como por ejemplo los pavimentos, por lo cual se ha estudiado la influencia del posicionamiento de la probeta con relación a la dirección del hormigonado mediante ensayos de flexión con carga centrada.

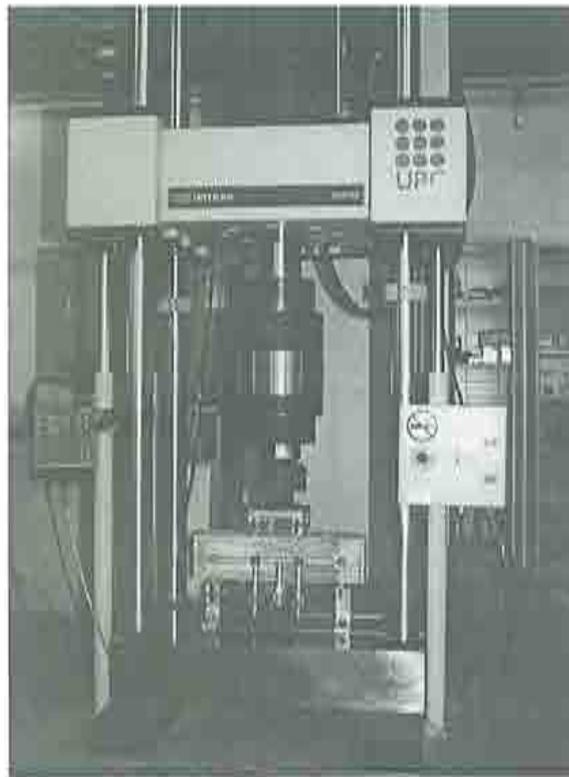


Foto 3.1.- Ensayo de flexión con carga a tercios de la luz



Foto 3.2.- Ensayo de flexión con carga centrada

Las velocidades de carga se han escogido en cada configuración de ensayo para obtener una respuesta lo más estable posible en rango cuasi-estático y se ha intentado alcanzar deflexiones máximas en el centro de la viga como mínimo de 3 mm. En estas condiciones los ensayos en la configuración TPL tienen una duración aproximada de 9 minutos, mientras que para la configuración CPL en probetas sin entalla es de 25 minutos; en los ensayos CPL con probetas entalladas la duración ha sido de 35 minutos. Las funciones de carga empleadas para las distintas configuraciones de ensayo se dan en la tabla 3.6; en este sentido ASTM C 1018 (1992) especifica una velocidad de deflexión en el rango de 0.83-1.7 $\mu\text{m/s}$, mientras el rango especificado en AENOR UNE 83-510 (1989) es de 2.5-7.5 $\mu\text{m/s}$.

Configuración del ensayo	Variable de control	Escalones de carga	Velocidad ($\mu\text{m/s}$)
Carga a tercios de la luz (TPL)	Flecha centro luz	0 - 500 μm	2.5
		500 μm hasta rotura	7.5
Carga centrada (CPL)	Flecha centro luz	0 - 150 μm	0.2
		150 - 500 μm	1
		500 μm hasta rotura	7.5
Carga centrada en probetas con entalla	CMOD	0 - 150 μm	0.2
		150 - 1500 μm	1
	Flecha centro luz	continua hasta rotura	7.5

Tabla 3.6.- Variables de control y funciones de carga

3.4.3.- Ensayos de rotura por compresión

Los ensayos de rotura por compresión se han realizado sobre probetas cilíndricas de 150×300 mm siguiendo las directrices de la norma UNE 83-507 utilizando una prensa IBERTEST de 150 T.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS CORRESPONDIENTES A LOS HORMIGONES C20 Y C30

4.1.- INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se han expuesto las directrices generales y los procedimientos de ensayo que se han adoptado en la campaña experimental contemplada en el presente estudio. En este capítulo se presentan los resultados y el análisis de resultados relativos a los ensayos realizados sobre las probetas fabricadas con los hormigones de resistencia normal, denominados por C20 y C30, mientras que en el capítulo siguiente se exponen los resultados relativos al hormigón de alta resistencia, denominado por C70. Los resultados corresponden al valor medio de tres determinaciones, y deben entenderse en el contexto de los materiales componentes y dosificaciones utilizados en el estudio.

En primer lugar se presentan los resultados correspondientes al estudio del efecto de la compactación en la distribución y orientación de las fibras en el hormigón y en la resistencia y tenacidad a flexotracción. Dentro de un segundo bloque se presentan los resultados relativos a los ensayos de flexotracción con carga a tercios y con carga central, estos últimos tanto sobre probetas sin entalla como sobre probetas con entallas. Estos resultados se analizan en términos de diferentes indicadores de la tenacidad del hormigón.

A efectos de facilitar el seguimiento de este capítulo, y sin ánimo de ser redundantes, en cada caso se explicitan los hormigones estudiados y el tipo y contenido de fibras adoptados en el estudio.

4.2.- DOSIFICACIONES Y CONFIGURACIONES DE ENSAYO

En este estudio se utilizaron dos dosificaciones base, que permitieron obtener dos tipos de hormigón de resistencia normal, que denotaremos por C20 y C30.

El C20 se diseñó con el fin de que tuviera una resistencia característica a compresión de 20 MPa a 28 días y el C30 una de 30 MPa. Ambos fueron concebidos para tener un asiento (sin fibras), medido con el cono de Abrams, de 10 cm.

En la tabla 4.1, se presentan las dos dosificaciones que sirvieron de base para la fabricación del C20 y del C30. Los materiales utilizados fueron un cemento del tipo CEM I 42.5R, una arena caliza procedente del machaqueo (0-5 mm), una gravilla caliza procedente del machaqueo (5-12 mm), una grava caliza procedente del machaqueo (12-20 mm), un superfluidificante tipo lignosulfonato modificado (Melcret PF-75) y tres tipos de fibra Dramix proporcionadas por BEKAERT, cuyas propiedades se resumen en la tabla 4.2.

COMPONENTE	Hormigón C20	Hormigón C30
Cemento (kg)	256	349
Agua añadida (kg)	195	200
Arena (kg)	999	873
Gravilla (kg)	154	140
Grava (kg)	795	838
Superfluidificante (l)	1.0	1.0
Relación a/c	0.69	0.53

Tabla 4.1.- Dosificaciones adoptadas por m³

Característica de la fibra	Denominación		
	RL 45/50 BN	RC 65/60 BN	RC 80/60 BN
Resistencia a tracción (MPa)	1000	1000	1100
Nº fibras/kg	2800	3200	4600
Longitud (mm)	50	60	60
Diámetro (mm)	1.05	0.9	0.75
Esbeltez	48	67	80
Encoladas/sueltas	Sueltas	Encoladas	Encoladas

Tabla 4.2.- Fibras utilizadas

Las probetas de hormigón, prismáticas de dimensiones 150 mm×150 mm×600 mm, fueron ensayadas a flexotracción para el estudio de sus propiedades. La mayoría de las probetas se ensayaron mediante una configuración de carga en los tercios de la luz entre apoyos (450 mm) sobre la probeta girada 90° respecto su dirección de llenado. La variable controlada fue la flecha central de la probeta utilizando las velocidades anteriormente expuestas en el Capítulo 3 (Tabla 3.6).

4.3.- EFECTO DEL TIPO DE COMPACTACIÓN

La fabricación del hormigón con fibras con un tiempo de mezcla suficiente debe conducir a una distribución uniforme e isotropa de las fibras en la masa del hormigón. Sin embargo, el proceso de compactación produce, junto con el efecto pared del molde, distribuciones no uniformes y orientaciones preferenciales de las fibras en la probeta, lo cual a su vez condiciona el comportamiento mecánico del material.

Para evaluar la influencia de la forma de compactación se estudiaron dos aspectos: el efecto en la distribución y orientación de las fibras, y el efecto en la resistencia y tenacidad a flexotracción.

4.3.1.- Hormigones utilizados

Las probetas fabricadas para tal estudio se presentan en la tabla 4.3; las probetas se han fabricado con el hormigón base C30, y 40 kg/m³ de la fibra RC 65/60 BN. Los ensayos a flexotracción se han realizado mediante la configuración de carga central y probeta girada 90° respecto su dirección de llenado.

Denominación de la probeta	Tipo de compactación
ME 1	Mesa vibrante
ME 2	Mesa vibrante
ME 3	Mesa vibrante
ME 4	Mesa vibrante
VA 1	Barra
VA 2	Barra
VA 3	Barra
AG 1	Aguja vibrante
AG 2	Aguja vibrante
AG 3	Aguja vibrante

Tabla 4.3.- Efecto de la compactación.

Los tiempos y formas de compactación utilizados en cada caso son los que se han expuesto anteriormente en el Capítulo 3 (Apartado 3.4).

4.3.2.- Resultados y análisis de resultados

4.3.2.1.- Efecto en la distribución y orientación de las fibras

A efectos de analizar la influencia del sistema de compactación sobre la distribución y orientación de las fibras, las probetas se ha cortado según diferentes planos, tal como se indican en la figura 4.1; el corte se ha realizado utilizando una sierra de diamante. El número de fibras en la sección de corte, así como su distribución, se han cuantificado utilizando unas lentes de aumento.

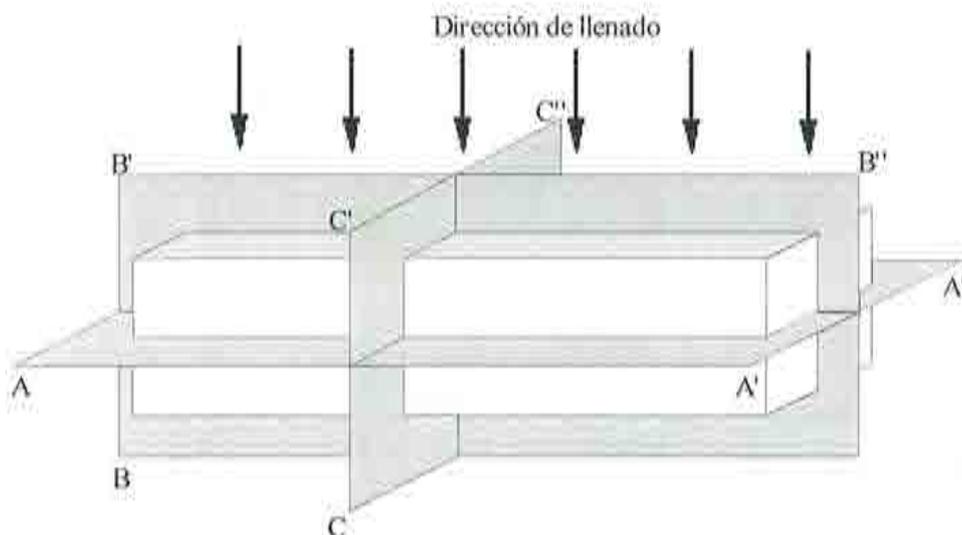


Fig. 4.1.- Secciones realizadas en el estudio

Una probeta, compactada con mesa vibrante, se ha seccionado por el plano B-B'-B'' (en la dirección de llenado). En el corte no se observó segregación, ni de fibras, ni de áridos. El número total de fibras intersectadas por este corte fue de 462, con una densidad media de 0.5 fibras/cm². Se observa una ligera concentración de fibras hacia la parte inferior de la probeta; ello se pone de manifiesto por un mayor porcentaje de fibras en el tercio inferior (37%) frente al 30% del tercio superior.

Asimismo, se ha realizado sobre otra probeta también compactada mediante mesa vibrante, una sección según el plano A-A'-A'' (perpendicular al llenado por el centro). El número total de fibras en este corte es de 239, con una densidad media de 0.27 fibras/cm². Comparando el número de fibras intersectadas por estos dos planos, se pone de manifiesto una orientación no isotropa de las fibras.

Otros cortes según el plano A-A'-A'' se han realizado sobre dos probetas, una compactada por barra y otra por aguja vibrante. El número total de fibras en la primera resultó de 337 (densidad de 0.37 fibras/cm²), y en la segunda de 292 (densidad de 0.32 fibras/cm²).

Se realizaron también cortes según el plano C-C'-C'' (perpendicular al eje axial de la probeta) sobre 2 probetas compactadas por mesa, 2 compactadas con barra y 2 compactadas con aguja. En la figura 4.2 se presentan las distribuciones (en %) de las fibras en franjas correspondientes a los tercios superior, medio y inferior del canto, y dentro de cada franja, a los tercios según el eje longitudinal de la franja.

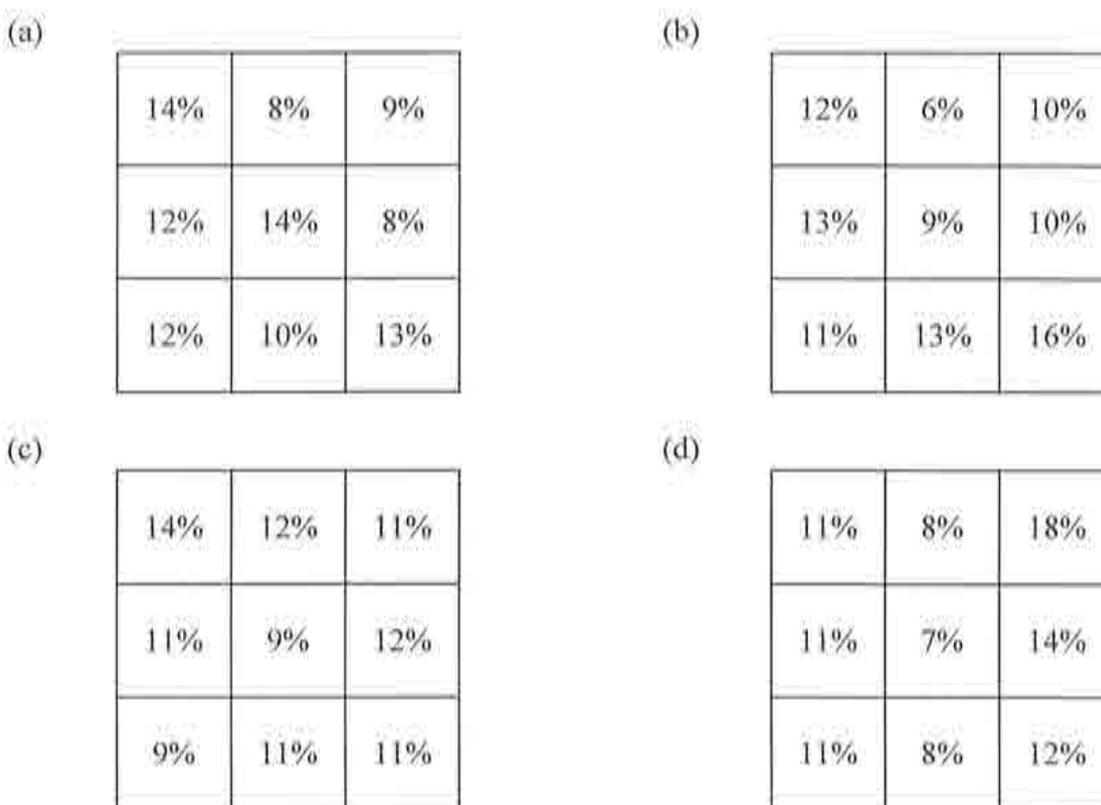


Fig. 4.2.- Distribución de fibras según secciones C-C'-C''. (a) mesa vibrante, (b) picado con barra, (c) aguja vibrante – sección central, y (d) aguja vibrante – sección correspondiente a un punto de introducción de la aguja.

La figura 4.2 (a) corresponde a la mesa vibrante con 117 fibras intersectadas (0.52 fibras/cm^2). Se observa una mayor concentración de fibras en el tercio inferior, análogamente a lo que sucede en el corte por el plano B-B'-B'', con una densidad de fibras similar en ambos casos. De ello puede derivarse que existe una orientación preferencial de las fibras según planos perpendiculares al llenado fruto de la compactación mediante la mesa vibrante; en otros términos, la compactación provoca una orientación predominante de las fibras según planos paralelos a la base del molde.

La figura 4.2 (b) corresponde a la compactación con barra, con un número total de fibras de 87 (0.39 fibras/cm^2). La figura 4.2 (c) corresponde a la aguja vibrante, con un número total de fibras de 83 (0.37 fibras/cm^2). Ello pone de manifiesto diferencias

significativas entre estos métodos de compactación; asimismo, en ellos no se presenta el grado de orientación manifestado en el caso de la compactación mediante mesa vibrante.

Con objeto de analizar el efecto local de la introducción de la aguja vibrante, se han realizado cortes en dos probetas según un plano paralelo al C-C'-C'' por la zona de inserción de la aguja. Las distribuciones medias se presentan en la figura 4.2 (d), la cual, en comparación con la figura 4.2 (c), muestra una disminución en la densidad de fibras en el entorno de un 5% reflejando el efecto local de la compactación mediante aguja vibrante.

Los resultados obtenidos muestran en conjunto que la compactación por mesa vibrante induce a las fibras a orientarse según planos horizontales sin que haya dentro de estos planos una dirección preferente. Además, se produce una ligera concentración de fibras en la parte inferior de la probeta. Por otra parte, la compactación por barra y por aguja no parecen incidir sustancialmente en la orientación de las fibras.

4.3.2.2.- Efecto en la resistencia y tenacidad a flexotracción

Para analizar la influencia del sistema de compactación sobre el comportamiento mecánico se han ensayado a flexotracción con la configuración de carga centrada probetas fabricadas utilizando los tres sistemas de compactación estudiados.

En la figura 4.3 se visualizan los resultados obtenidos en términos de las curvas carga-flecha; asimismo, en la tabla 4.5 se presentan las respectivas cargas pico, así como el parámetro de tenacidad, T, definido en la norma española (UNE 83510) por el área bajo la curva carga-flecha hasta el límite luz/150, en nuestro caso 3 mm (valores medios correspondientes a dos probetas).

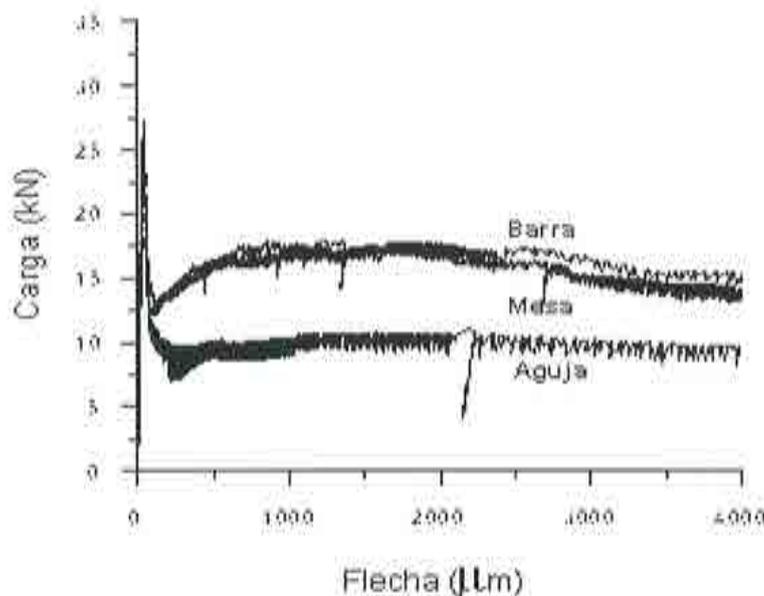


Fig 4.3.- Efecto de la compactación en la respuesta mecánica

Tipo de compactación	Carga pico (kN)	T (kN.mm)
Mesa	32.3	45.0
Barra	27.4	42.0
Aguja	25.1	29.6

Tabla 4.5.- Efecto de la compactación en la respuesta mecánica

Estos resultados ponen de manifiesto que con la mesa vibrante se obtiene una carga pico algo mayor que con la barra y con la aguja vibrante (del orden del 25% mayor que los picos de éstas). Sin embargo, en lo que concierne a la tenacidad, mesa y barra proporcionan resultados similares, y mayores (del orden del 35%) que los correspondientes a la aguja, como puede verse de la comparación de los respectivos parámetros T.

La orientación favorable de fibras que se consigue con la vibración por mesa, según planos horizontales, y la mejor compactación a que se ve sometida la matriz, origina que los resultados conseguidos con este tipo de compactación (tenacidad y carga pico) sean mejores que los obtenidos con vibración interna (con aguja), para los tiempos de vibrado adoptados, y que los obtenidos con barra (atendiendo a la variabilidad de resultados que puede presentar este método). De lo expuesto, se deriva que el método de compactación por mesa es el más eficiente de los sistemas analizados para hormigones con fibras de acero.

4.4.- RESULTADOS RELATIVOS AL ENSAYO CON CARGA EN LOS TERCIOS DE LA LUZ

La configuración de ensayo a flexotracción más común contempladas en las normas para la evaluación de la tenacidad de hormigones con fibras es la de carga en los tercios (o con cuatro puntos de carga).

En este apartado se presentan los resultados correspondientes a los ensayos realizados con esta configuración de carga, así como los parámetros de tenacidad basados en la curva carga-flecha obtenida mediante este ensayo.

4.4.1.- Hormigones estudiados

En las tablas 4.6 y 4.7 se presentan los hormigones con fibras fabricados para el estudio de los parámetros de tenacidad a flexotracción, con dos hormigones base, C20 y C30. En cada uno de ellos se han incorporado tres diferentes tipos de fibra y para cada tipo de fibra se han utilizado tres dosificaciones diferentes de fibra.

Designación	Tipo de hormigón	Tipo de fibra	Cantidad de fibras (Kg/m ³)
C20	C20	--	--
C20-65/60-20	C20	RC 65/60 BN	20
C20-65/60-30	C20	RC 65/60 BN	30
C20-65/60-40	C20	RC 65/60 BN	40
C20-45/50-20	C20	RL 45/50 BN	20
C20-45/50-30	C20	RL 45/50 BN	30
C20-45/50-40	C20	RL 45/50 BN	40
C20-80/60-15	C20	RC 80/60 BN	15
C20-80/60-25	C20	RC 80/60 BN	25
C20-80/60-35	C20	RC 80/60 BN	35

Tabla 4.6.- Probetas fabricadas con el hormigón C20

Designación	Tipo de hormigón	Tipo de fibra	Cantidad de fibras (Kg/m ³)
C30	C30	--	--
C30-65/60-20	C30	RC 65/60 BN	20
C30-65/60-30	C30	RC 65/60 BN	30
C30-65/60-40	C30	RC 65/60 BN	40
C30-45/50-20	C30	RL 45/50 BN	20
C30-45/50-30	C30	RL 45/50 BN	30
C30-45/50-40	C30	RL 45/50 BN	40
C30-80/60-15	C30	RC 80/60 BN	15
C30-80/60-25	C30	RC 80/60 BN	25
C30-80/60-35	C30	RC 80/60 BN	35

Tabla 4.7.- Probetas fabricadas con el hormigón C30

4.4.2.- Estudio de la fisuración

Tras cada ensayo se ha registrado, en papel vegetal, la forma y posición de las fisuras producidas; ello ha permitido definir la posición del inicio de la fisura, en ambas caras de la probeta. La posición media del inicio de la fisura se ha definido por el promedio de ambas caras.

La observación de los croquis de las fisuras muestra que, generalmente, la fisura es bastante recta, presentándose más tortuosidad y fisuración secundaria en aquellos hormigones

con mayor cantidad de fibras, tal y como es de esperar dado el efecto puente de la fibra durante la fisuración.

En la tabla 4.8 se presenta la posición de inicio de la fisura respecto al centro de la luz para las probetas del hormigón C20, en donde el signo positivo significa que la fisura se presentó a la derecha de la sección de centro luz y el signo negativo que se presentó a la izquierda. Para cada tipo de hormigón, el resultado que se presenta es la media de los valores correspondientes a las tres probetas estudiadas de la misma serie.

Asimismo, en la tabla 4.9 se presentan los resultados correspondientes al hormigón C30 obtenidos siguiendo el mismo procedimiento expuesto anteriormente.

Designación	Posición media del inicio de la fisura (cm)	Desviación estándar (cm)
C20	1.8	0.8
C20-80/60-15	-2.0	2.4
C20-80/60-25	-0.3	3.3
C20-80/60-35	1.8	2.8
C20-65/60-20	0.3	3.0
C20-65/60-30	1.7	3.7
C20-65/60-40	0.6	4.1
C20-45/50-20	-3.5	2.8
C20-45/50-30	3.2	3.0
C20-45/50-40	2.8	2.4

Tabla 4.8.- Posición de la fisura. Serie C20.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la posición relativa de la fisura respecto al centro de la viga no se ve influenciada por la dosificación ni el tipo de fibra.

Los datos indican que, pese a que la aparición de la fisura puede darse de forma aleatoria dentro del tercio central de la viga (momento flector constante en el tercio central, entre puntos de aplicación de la carga), la fisura se ha iniciado en una zona centrada, tanto en la serie C20 como en la C30. Así, la posición promedio de la fisura para toda la serie C20 es de unos 6 mm respecto al centro de la viga, con una desviación estándar de unos 21 mm; siendo para la serie de C30 de unos 3 mm respecto al centro y con desviación estándar de 28 mm.

Designación	Posición media del inicio de la fisura (cm)	Desviación estándar (cm)
C30	-5.1	0.9
C30-65/60-20	1.0	4.4
C30-65/60-30	2.2	4.6
C30-65/60-40	2.5	1.3
C30-45/50-20	0.2	1.3
C30-45/50-30	-2.0	1.5
C30-45/50-40	-4.8	4.0
C30-80/60-15	-1.9	2.2
C30-80/60-25	2.6	3.6
C30-80/60-35	2.1	3.3

Tabla 4.9.- Posición de la fisura. Serie C30

4.4.3.- Curvas carga-flecha

En este apartado se presentan las curvas carga-flecha obtenidas para cada uno de los hormigones con fibras ensayados según la configuración de carga en tercios.

En las figuras 4.5, 4.6 y 4.7; se visualizan las curvas tipo obtenidas para los hormigones C20; y en las figuras 4.8, 4.9 y 4.10; las correspondientes a los hormigones C30. Las curvas presentadas responden al criterio de escoger de las tres curvas de cada serie aquella que representa mejor el promedio de la serie. La curva del hormigón C30 sin fibras no se presenta por haber resultado inestable su ensayo; en este sentido, en el Anejo I se exponen los conceptos asociados a la inestabilidad en este tipo de ensayos.

En ellas se han linealizado los tramos iniciales para eliminar el efecto del acoplamiento del sistema, tal como se recomienda en las normas UNE 83-510 y ASTM C 1018.

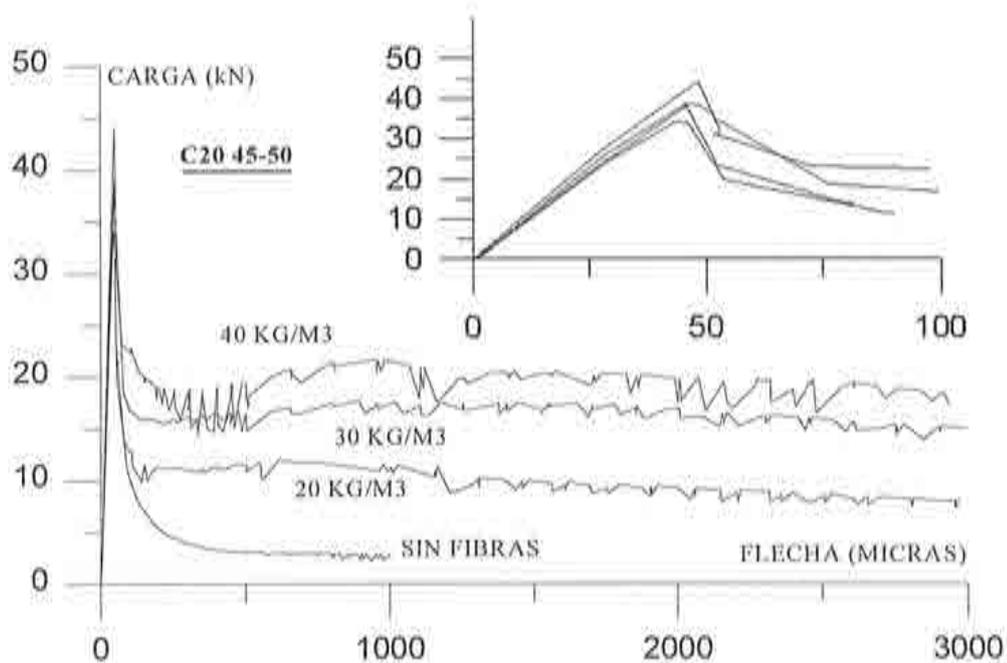


Fig. 4.5.- Curva tipo para los hormigones C20 sin y con fibras RL 45/50 BN

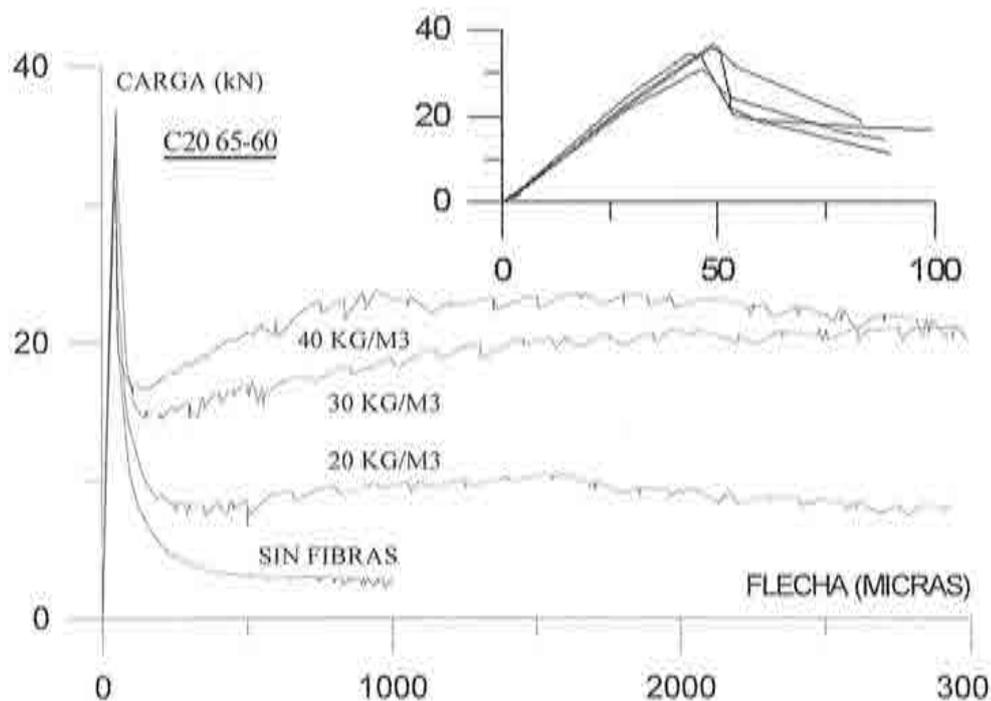


Fig. 4.6.- Curva tipo para los hormigones C20 sin y con fibras RC 65/60 BN

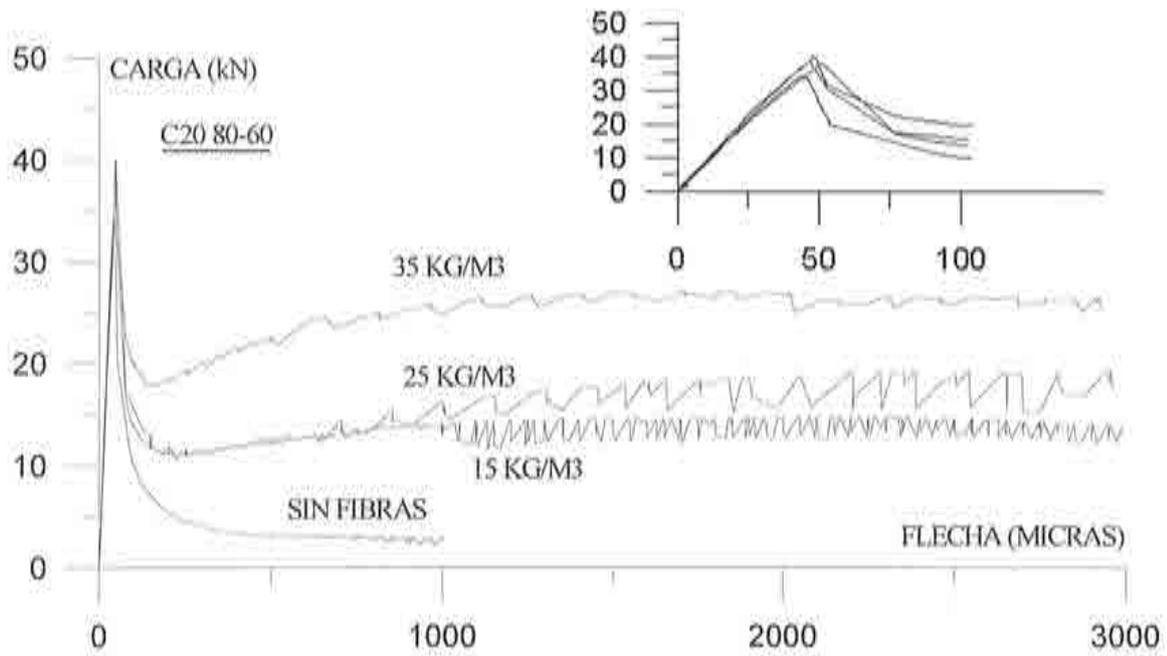


Fig. 4.7.- Curva tipo para los hormigones C20 sin y con fibras RC 80/60 BN

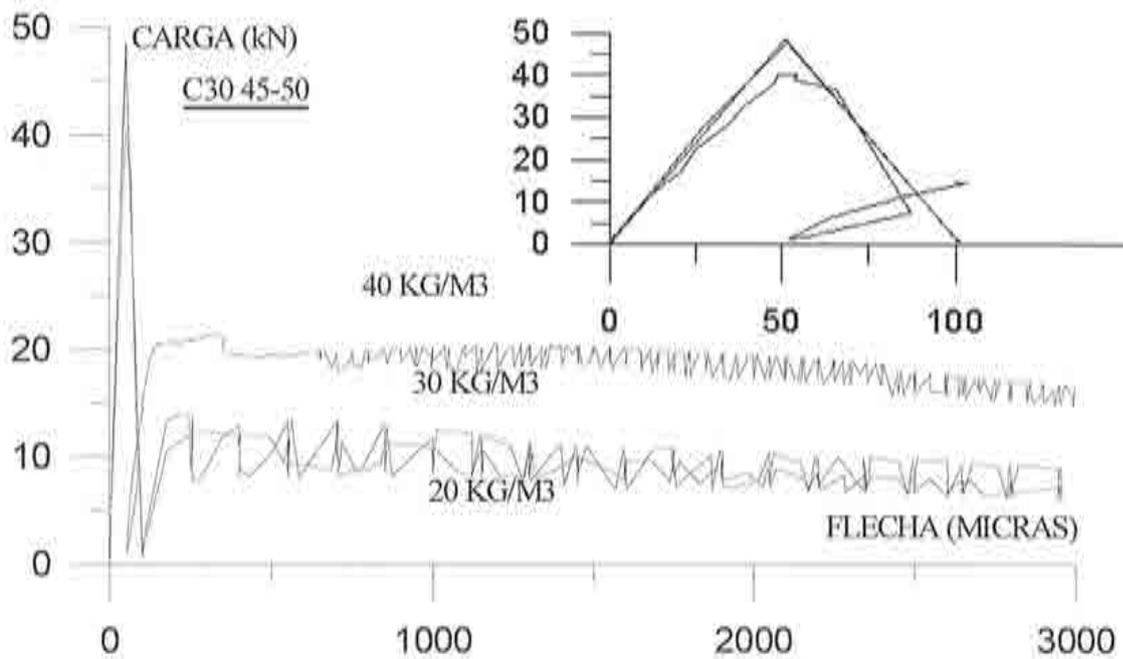


Fig. 4.8.- Curva tipo para los hormigones C30 sin y con fibras RL 45/50 BN

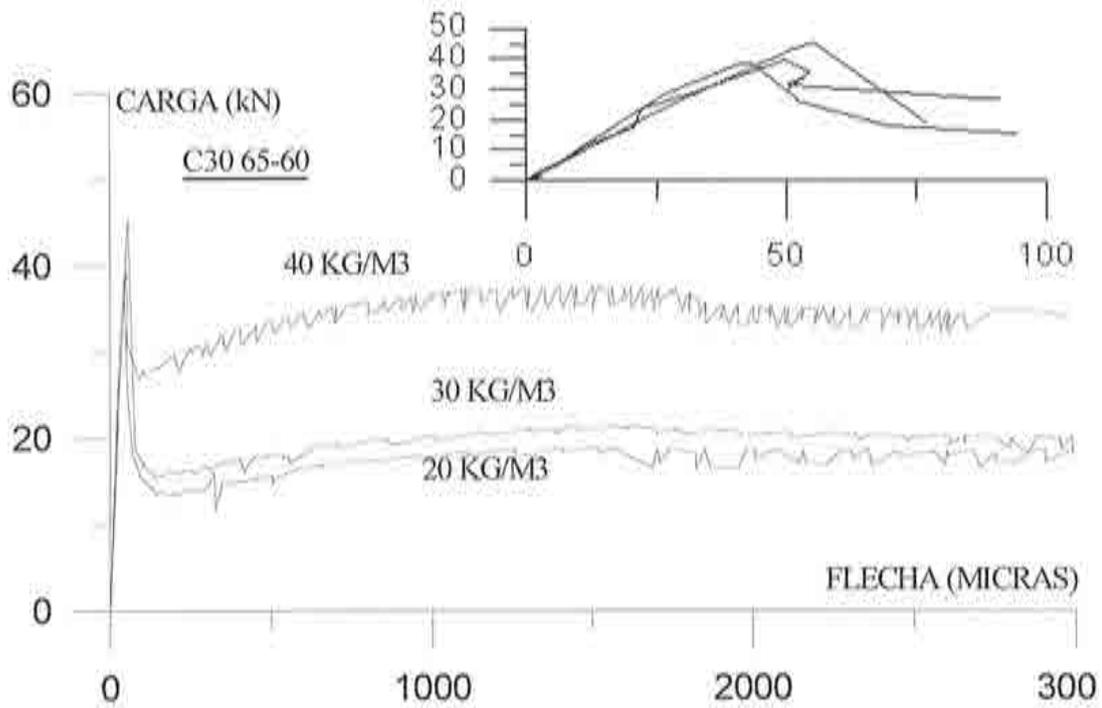


Fig. 4.9.- Curva tipo para los hormigones C30 sin y con fibras RC 65/60 BN

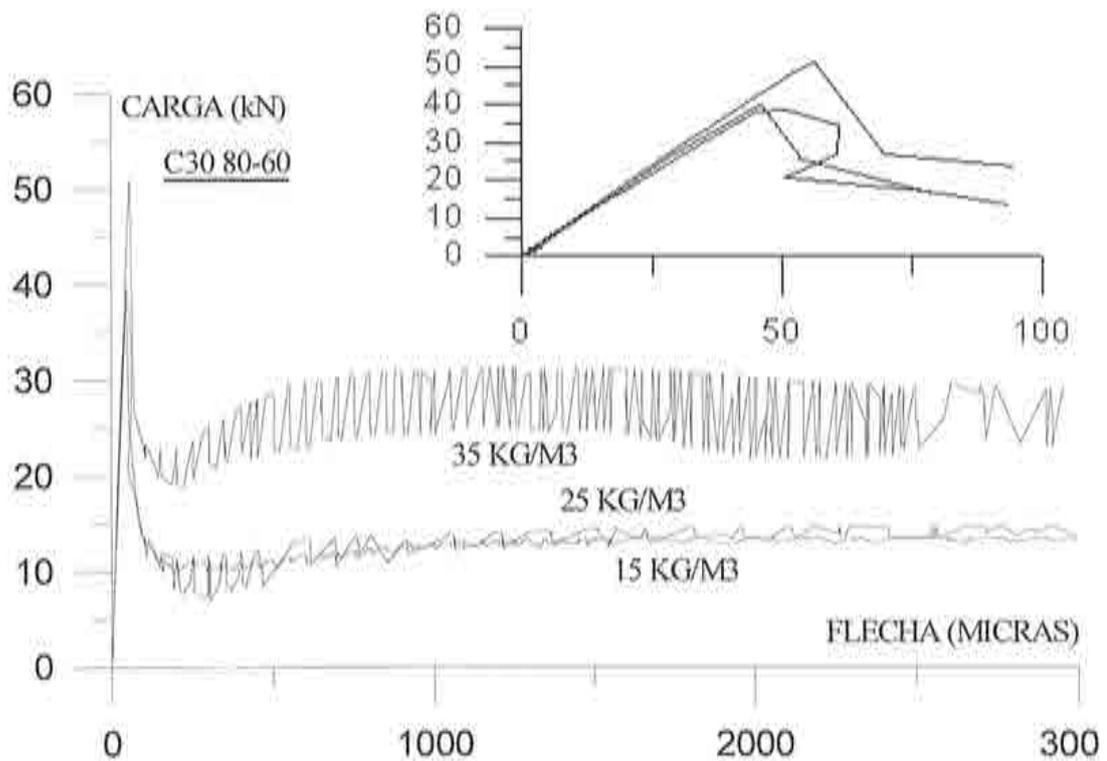


Fig. 4.10.- Curva tipo para los hormigones C30 sin y con fibras RC 80/60 BN

En cada gráfica se han insertado los tramos iniciales de cada una de las curvas. Se observa en ellas que la respuesta prepico (curva anterior al pico o carga máxima) es muy similar en todos los casos para la misma matriz (mismo hormigón base).

El comportamiento prepico se puede dividir en dos fases: una primera lineal, y una segunda no lineal con pendiente decreciente hasta el pico. La carga correspondiente al punto final de la primera fase (lineal) se suele denominar carga de primera fisura, a partir del cual se empieza a fisurar el material. Es importante destacar que pese a que el cambio de pendiente es generalmente perceptible, el punto exacto en que ello ocurre o punto de primera fisura, es difícil de precisar con exactitud.

Son varias las normas (entre otras, UNE 83-510 y ASTM C 1018) que utilizan el punto de primera fisura para la definición de parámetros de tenacidad. La dificultad de determinar con precisión este punto, tal como se ha citado anteriormente, dota a estos parámetros de un cierto grado de subjetividad.

Tras el pico se produce un brusco descenso de la carga, lo cual puede provocar una pérdida momentánea del control del ensayo en esta zona de la curva. La respuesta registrada desde el pico hasta aproximadamente 150 ó 200 μ m (micras) no refleja, por tanto, el verdadero comportamiento del material. En este sentido, dado que algunos parámetros de tenacidad se basan en el comportamiento del material en esta zona, su evaluación no se realiza de forma satisfactoria.

Tras esta fase de pérdida momentánea de control, el ensayo se estabiliza de nuevo llegando a una respuesta similar a un comportamiento plástico, que en ocasiones se denomina zona de meseta, que refleja la verdadera contribución de las fibras. Se puede ver que esta zona es prácticamente inexistente en el hormigón sin fibras, lo que se traduce en una capacidad resistente prácticamente nula después de la carga máxima, y, por tanto, una capacidad de absorción de energía tras el pico prácticamente nula.

Por otro lado, en los hormigones con fibras se pone de manifiesto una resistencia residual que se traduce en un incremento significativo de la capacidad de absorción de energía tras el pico. Asimismo, las curvas obtenidas indican que la absorción de energía aumenta al incrementarse el contenido de fibras, especialmente para dosificaciones mayores de 25 kg/m^3 de fibras.

4.4.4.- Resistencia a flexotracción

La tensión de rotura por flexotracción o el módulo de rotura es un parámetro definido en distintas normativas tales como, entre otras, UNE 83-509, ASTM C 1018, NBN B 15-238 y JCI-SF4. Se define como la tensión de tracción (calculada según la teoría elástica) a que se ve sometida la fibra inferior de la viga en el tercio central, cuando ésta se ve solicitada por la carga pico. Esta tensión se evalúa según la siguiente expresión:

$$f_{of} = \frac{F \times l}{d_1 \times d_2^2}$$

donde:

f_{of} : resistencia a flexotracción, en MPa.

F : carga de rotura (o carga pico), en N.

l : distancia entre apoyos, en mm.

d_1 : ancho de la probeta, en mm.

d_2 : canto de la probeta, en mm.

Esta fórmula es válida siempre que la rotura se produzca en el tercio central.

Varias normas, entre ellas la UNE 83-510 y ASTM C 1018-92, calculan, bajo las mismas consideraciones, la resistencia a flexotracción para la carga correspondiente al punto de primera fisura, la cual se puede denominar por resistencia a primera fisura.

En las tablas 4.10 y 4.11 se presentan, respectivamente, para los hormigones C20 y C30, los valores de la resistencia a flexotracción (tensión de pico) y de la resistencia a primera fisura (tensión de primera fisura), evaluadas sobre una muestra de tres probetas.

Designación	Resistencia a flexotracción		Resistencia a primera fisura	
	Valor medio (MPa)	Coefficiente de variación (%)	Valor medio (MPa)	Coefficiente de variación (%)
C20	4.8	6	3.6	13
C20-80/60-15	4.7	7	2.9	2
C20-80/60-25	4.9	2	3.1	3
C20-80/60-35	5.0	5	3.3	4
C20-65/60-20	4.6	9	3.0	9
C20-65/60-30	4.5	6	3.0	6
C20-65/60-40	4.4	9	2.9	3
C20-45/50-20	5.1	3	3.4	8
C20-45/50-30	5.1	5	3.3	2
C20-45/50-40	5.4	6	3.5	9

Tabla 4.10.- Resistencia a flexotracción y resistencia a primera fisura. C20

Designación	Resistencia a flexotracción		Resistencia a primera fisura	
	Valor medio (MPa)	Coefficiente de variación (%)	Valor medio (MPa)	Coefficiente de variación (%)
C30	4.4	12	3.2	17
C30-80/60-15	5.3	5	3.0	11
C30-80/60-25	4.8	6	3.1	6
C30-80/60-35	6.3	7	3.8	4
C30-65/60-20	5.0	2	3.3	13
C30-65/60-30	5.7	6	3.2	10
C30-65/60-40	5.3	1	3.6	6
C30-45/50-20	6.4	5	3.8	6
C30-45/50-30	6.1	5	3.6	1
C30-45/50-40	5.2	5	3.2	5

Tabla 4.11.- Resistencia a flexotracción y resistencia a primera fisura. C30

Obviamente, la resistencia a primera fisura es menor que la resistencia a flexotracción por producirse la primera fisura en una carga menor que la carga pico.

Como puede apreciarse, la adición de las fibras al hormigón no incide en forma significativa en la resistencia a flexotracción, lo cual concuerda con el hecho conocido de que el beneficio derivado de la incorporación de las fibras se manifiesta claramente a partir de la carga pico. Asimismo, se constata que, en el rango de dosificaciones de fibras utilizado, la respuesta en el régimen prepico depende, fundamentalmente, de las características de la matriz (hormigón base).

4.4.5.- Evaluación de parámetros de tenacidad

Las diferentes normativas, para evaluar la tenacidad, definen una serie de parámetros que, en su mayoría, se basan en la curva carga-flecha obtenida en el ensayo de flexotracción de probetas prismáticas bajo una configuración de carga en tercios.

Con los resultados obtenidos se ha evaluado la tenacidad según distintos indicadores contemplados en diferentes normativas y recomendaciones. Estos indicadores se han clasificado en los siguientes grupos:

- Índices adimensionales
- Parámetros absolutos de absorción de energía
- Resistencia a flexotracción equivalente
- Tensión residual

4.4.5.1.- Índices adimensionales

Tal como se ha visto en el apartado 2.4.1.2, la norma ASTM C 1018 define los parámetros I_5 , I_{10} e I_{20} , que relacionan el área bajo la curva carga-flecha hasta 3, 5.5 y 10.5 veces la flecha correspondiente al punto de primera fisura con el área hasta el punto de primera fisura; según esta definición, un comportamiento elastoplástico con pico en el punto de primera fisura proporcionaría, respectivamente, para estos índices los valores de 5, 10 y 20. La UNE 83-510 utiliza el parámetro I_{30} , que se define análogamente a los anteriores, pero hasta un límite de flecha de 15.5 veces la del punto de primera fisura.

Tal como se ha comentado con anterioridad, la determinación del punto de primera fisura no es fácil en muchas ocasiones, y por tanto, no siempre se puede hacer de forma objetiva; ello conduce a que estos índices pueden llevar implícita una cierta subjetividad asociada a la determinación del punto de primera fisura. Una forma de paliar este efecto es utilizar, en lugar del punto de primera fisura, el primer pico cuya definición es usualmente más objetiva.

En las tablas 4.12 y 4.13 se presentan, para los hormigones C20 y C30, las áreas bajo la curva carga-flecha hasta primera fisura y primer pico, en términos del valor medio de las tres probetas de cada serie. Estas áreas intervienen en la definición de los parámetros adimensionales que se presentan posteriormente; como puede observarse, las áreas correspondientes al primer pico son mayores que las correspondientes a primera fisura, por ocurrir ésta antes del pico.

Designación	Área hasta primera fisura (kN.mm)	Área hasta primer pico (kN.mm)
C20	0.37	0.77
C20-80/60-15	0.33	0.94
C20-80/60-25	0.36	0.93
C20-80/60-35	0.38	1.00
C20-65/60-20	0.34	0.87
C20-65/60-30	0.34	0.85
C20-65/60-40	0.34	0.82
C20-45/50-20	0.39	0.94
C20-45/50-30	0.38	0.96
C20-45/50-40	0.40	1.11

Tabla 4.12.- Áreas hasta primera fisura y primer pico. C20

Designación	Área hasta primera fisura (kN.mm)	Área hasta primer pico (kN.mm)
C30	0.38	0.88
C30-80/60-15	0.33	1.11
C30-80/60-25	0.35	1.04
C30-80/60-35	0.48	1.36
C30-65/60-20	0.37	0.99
C30-65/60-30	0.35	1.22
C30-65/60-40	0.44	1.14
C30-45/50-20	0.44	1.32
C30-45/50-30	0.44	1.24
C30-45/50-40	0.33	1.04

Tabla 4.13.- Áreas hasta primera fisura y primer pico. C30

En la tablas 4.14 y 4.15 se presentan, respectivamente, para los hormigones C20 y C30, los parámetros I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30} , evaluados respecto al punto de primera fisura y al punto de primer pico. Estos índices corresponden al promedio de las tres probetas de su serie.

Designación	Índices basados en primera fisura				Índices basados en primer pico			
	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}
C20	4.28	6.00	7.96	9.41	2.55	3.39	4.44	5.34
C20-80/60-15	5.27	8.23	13.20	18.33	2.76	4.27	7.41	10.80
C20-80/60-25	4.97	7.56	12.42	17.57	2.71	4.25	7.55	11.25
C20-80/60-35	5.24	8.94	16.62	24.92	3.10	5.47	10.67	16.65
C20-65/60-20	5.26	8.27	12.46	16.53	3.01	4.39	7.01	9.89
C20-65/60-30	5.14	8.52	15.01	21.71	3.05	5.12	9.37	13.86
C20-65/60-40	5.15	8.77	15.82	23.37	3.22	5.51	10.43	15.85
C20-45/50-20	4.63	6.96	10.94	14.77	2.62	3.95	6.46	8.94
C20-45/50-30	5.07	8.33	14.32	20.44	3.00	4.93	8.83	12.73
C20-45/50-40	5.28	8.97	15.70	22.28	3.07	5.17	9.26	13.66

Tabla 4.14.- Índices de tenacidad adimensionales. C20

Designación	Índices basados en primera fisura				Índices basados en primer pico			
	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}
C30	--	--	--	--	--	--	--	--
C30-80/60-15	5.68	9.91	17.50	23.80	2.93	5.15	8.36	11.14
C30-80/60-25	5.70	8.87	13.91	19.12	2.91	4.43	7.57	11.15
C30-80/60-35	5.27	8.74	15.93	23.92	2.96	5.14	10.00	15.17
C30-65/60-20	5.44	8.67	14.17	19.70	3.08	4.84	8.36	12.26
C30-65/60-30	5.88	9.31	15.75	22.53	2.77	4.56	8.41	12.66
C30-65/60-40	5.35	10.76	19.52	29.04	3.63	6.63	12.84	19.67
C30-45/50-20	4.98	9.12	14.43	18.54	2.99	4.62	7.09	9.03
C30-45/50-30	4.93	8.94	13.95	18.20	3.02	4.64	7.19	9.81
C30-45/50-40	6.06	10.56	19.71	29.09	3.30	5.92	11.28	16.52

Tabla 4.15.- Índices de tenacidad adimensionales. C30

En las citadas tablas, se pone de manifiesto que los parámetros I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30} definidos según el punto de primera fisura resultan mayores que los definidos según el primer pico dado que el área encerrada por la curva carga-flecha hasta la primera fisura es menor que el área hasta el primer pico. Asimismo, los parámetros definidos según el primer pico son más objetivos en todos los casos estudiados en este trabajo, los cuales corresponden a los tipos y contenidos de fibras anteriormente expuestos, dado que este punto se ha podido determinar de forma precisa. En consecuencia, se ha adoptado los índices de tenacidad basados en el primer pico en el resto del trabajo, y en los posteriores análisis de resultados que se exponen seguidamente.

De estos resultados, puede derivarse que tanto en la serie C20 como en la serie C30, los índices I_5 e I_{10} son poco sensibles al contenido de fibras, para un mismo tipo de fibras, mientras que los índices I_{20} e I_{30} presentan una mayor sensibilidad, incrementando su valor cuando aumenta el contenido de fibras. De estos últimos, el I_{30} es el que presenta una mayor sensibilidad a la dosificación de fibras, lo cual a priori hace que sea un indicador más representativo de la tenacidad.

4.4.5.2.- Parámetros de tensión residual

La norma ASTM C 1018, además de los índices I_n presentados anteriormente, define otros parámetros que representan la tensión residual correspondiente a distintos límites de flecha. Estos se evalúan mediante las siguientes relaciones: $R_{5,10} = 20(I_{10} - I_5)$ y $R_{10,20} = 10(I_{20} - I_{10})$, las cuales, para un material elastoplástico perfecto con pico en el punto de primera fisura, toman ambas el valor de 100.

En las tablas 4.16 y 4.17, se presentan las tensiones residuales $R_{5,10}$ y $R_{10,20}$ evaluadas con los valores de los índices I_n obtenidos anteriormente respecto al primer pico. Asimismo, en ellas se presenta, también, un nuevo parámetro de tensión residual $R_{20,30} = 10(I_{30} - I_{20})$, el cual da entrada al índice I_{30} que, tal como se ha puesto de manifiesto anteriormente, es el que presenta una mayor sensibilidad al contenido de fibras. El adoptar el primer pico como referencia para el cálculo de estos parámetros permite una correlación de los mismos con la resistencia a flexotracción (adoptada como valor 100); el valor de cada parámetro de tensión residual corresponde al porcentaje de la resistencia a flexotracción que todavía le queda al material (resistencia residual), entre los límites de flecha asociados al mismo.

Designación	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$	$R_{20,30}$
C20	16.8	10.5	9.0
C20-80/60-15	30.2	31.4	33.9
C20-80/60-25	30.7	33.0	37.0
C20-80/60-35	47.3	52.0	59.7
C20-65/60-20	27.5	26.2	28.8
C20-65/60-30	41.5	42.5	44.8
C20-65/60-40	45.8	49.2	54.2
C20-45/50-20	26.7	25.1	24.8
C20-45/50-30	38.6	39.0	39.0
C20-45/50-40	41.9	41.0	44.0

Tabla 4.16.- Tensiones residuales. C20

Designación	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$	$R_{20,30}$
C30	--	--	--
C30-80/60-15	44.4	32.1	27.8
C30-80/60-25	30.5	31.4	35.9
C30-80/60-35	43.6	48.6	51.6
C30-65/60-20	35.1	35.3	38.9
C30-65/60-30	35.8	38.5	42.5
C30-65/60-40	59.9	62.1	68.3
C30-45/50-20	32.6	24.8	19.3
C30-45/50-30	32.3	25.6	26.2
C30-45/50-40	52.3	53.6	52.4

Tabla 4.17.- Tensiones residuales. C30

Estos resultados ponen claramente de manifiesto la mayor sensibilidad al contenido de fibras del parámetro $R_{20,30}$ frente a los otros dos.

4.4.5.3.- Parámetros absolutos de absorción de energía

Una medida de la capacidad de absorción de energía de un hormigón con fibras puede establecerse a través del área encerrada por la curva carga-flecha hasta rotura (curva

completa). Esto implicaría, por una parte una larga duración del ensayo, y por otra, que el rango de deformaciones superaría el rango de deformaciones a las que se ve sometido el material en condiciones usuales de servicio. Por ello, distintas normas, entre ellas UNE 83-510, NBN B 15-238 y JCI-SF4, proponen parámetros de tenacidad que miden la energía absorbida ciertos límites prefijados de flecha, establecidos de forma que representen situaciones reales de servicio.

Así, la norma UNE 83-510-89 define el parámetro T como el área bajo la curva carga-flecha hasta un límite de flecha igual a la luz/150. El mismo parámetro se utiliza en JCI-SF4 y NBN B 15-238 (B_{150}). La norma belga define además otro parámetro B_{300} como el área bajo la curva carga-flecha hasta el límite igual a la luz/300. Los límites luz/150 y luz/300, para las dimensiones de probetas consideradas en este estudio, resultan ser 3 y 1.5 mm, respectivamente.

En las tablas 4.18 y 4.19, se presentan los valores obtenidos para los parámetros T (o B_{150}) B_{300} , en donde cada resultado es el valor medio de tres probetas de cada serie.

Designación	T (kN.mm)	B_{300} (kN.mm)
C20	--	--
C20-80/60-15	42.5	20.4
C20-80/60-25	50.3	23.5
C20-80/60-35	78.7	37.9
C20-65/60-20	34.7	17.4
C20-65/60-30	55.9	26.7
C20-65/60-40	62.9	29.9
C20-45/50-20	29.1	16.1
C20-45/50-30	52.0	26.3
C20-45/50-40	60.5	31.0

Tabla 4.18.- Parámetros T y B_{300} C20

Designación	T (kN.mm)	B_{300} (kN.mm)
C30	--	--
C30-80/60-15	40.7	21.1
C30-80/60-25	47.5	22.8
C30-80/60-35	77.5	38.2
C30-65/60-20	51.4	25.1
C30-65/60-30	64.5	30.3
C30-65/60-40	97.9	46.9
C30-45/50-20	31.3	18.5
C30-45/50-30	36.3	20.6
C30-45/50-40	61.4	33.2

Tabla 4.19.- Parámetros T y B_{300} C30

Los resultados expuestos ponen de manifiesto que estos parámetros son buenos indicadores del contenido de fibras en el hormigón, reflejándose, tanto en la serie C20 como en la C30, en el aumento del valor de T y B_{300} con el aumento en el contenido de fibras.

4.4.5.4.- Resistencia equivalente a flexotracción

Otra medida de la tenacidad es mediante la resistencia equivalente a flexotracción, tal como consideran, entre otras, las normas NBN B 15-238 y JCI-SF4. Estas definen la resistencia equivalente como la tensión máxima correspondiente a un valor medio de la carga asociada a distintos intervalos de la flecha alcanzada en el régimen post-pico.

Así, la NBN B 15-238 define las resistencias equivalentes $f_{f,150}$ y $f_{f,300}$ como $\frac{B_n n}{bh^3}$ con $n = 150$ y 300 , respectivamente, donde b es el ancho de la probeta y h es su canto (en las probetas estudiadas, $b = h = 150$ mm). Por otra parte, la JCI-SF4 define una resistencia equivalente a través de un parámetro $\bar{\sigma}_h$, que coincide con el $f_{f,150}$.

En las tablas 4.20 y 4.21 se presentan los valores de los parámetros $f_{f,150}$ y $f_{f,300}$ para las probetas ensayadas, junto con el valor correspondiente de la resistencia a flexotracción (para la carga pico), f_r .

Designación	f_r (MPa)	$f_{f,300}$ (MPa)	$f_{f,150}$ (MPa)
C20	4.77	--	--
C20-80/60-15	4.66	1.75	1.81
C20-80/60-25	4.86	2.01	2.14
C20-80/60-35	5.04	3.15	3.26
C20-65/60-20	4.60	1.53	1.53
C20-65/60-30	4.50	2.23	2.34
C20-65/60-40	4.41	2.58	2.70
C20-45/50-20	5.13	1.39	1.26
C20-45/50-30	5.11	2.20	2.17
C20-45/50-40	5.40	2.57	2.51

Tabla 4.20.- Resistencias equivalentes. C20

Designación	f_r (MPa)	$f_{f,300}$ (MPa)	$f_{f,150}$ (MPa)
C30	4.42	--	--
C30-80/60-15	5.34	1.85	1.78
C30-80/60-25	4.84	1.96	2.05
C30-80/60-35	6.26	3.32	3.37
C30-65/60-20	4.97	2.18	2.23
C30-65/60-30	5.66	2.63	2.80
C30-65/60-40	5.30	4.01	4.18
C30-45/50-20	6.43	1.60	1.35
C30-45/50-30	6.15	1.78	1.57
C30-45/50-40	5.19	2.91	2.69

Tabla 4.21.- Resistencias equivalentes. C30

Los valores de los parámetros $f_{f,150}$ y $f_{f,300}$ aumentan al aumentar el contenido de fibras, tal y como es de esperar dado el incremento en la capacidad de carga del material en el régimen post-pico.

4.5.- RESULTADOS RELATIVOS AL ENSAYO CON CARGA CENTRAL

Un procedimiento alternativo al ensayo con carga a tercios es el ensayo a flexotracción con carga centrada. Este procedimiento, desde el punto de vista práctico, presenta una mayor facilidad de ensayo al precisar de un único punto de carga y, también, al imponer la aparición y propagación de la fisura en la sección central; ello simplifica la instrumentación de la probeta para medir la apertura de la fisura. Además, al coincidir el punto de medición de la flecha con el punto de aplicación de la carga, la curva carga-flecha resultante proporciona una medida directa de la absorción de energía.

Sin embargo, desde el punto de vista estadístico, el imponer la fisura en una sección predeterminada no implica que la rotura se produzca en la sección más débil, lo cual, teóricamente, queda garantizado en el ensayo con carga a tercios (zona central con momento máximo constante).

En este apartado se presentan los resultados correspondientes a los ensayos realizados con la configuración de ensayo a flexotracción con carga central (o con tres puntos de carga), así como los parámetros de tenacidad basados en la curva carga-flecha obtenida mediante este ensayo.

4.5.1.- Hormigones estudiados

En esta fase del estudio, se ha trabajado con tres tipos de hormigón, de dosificación base C30, incorporando dos tipos de fibras con un mismo contenido de 40 kg/m³. Las

características de estos hormigones se presentan en la tabla 4.22. Los ensayos se han realizado sobre muestras de 3 probetas.

Designación	Dosificación base	Tipo de fibra	Contenido (kg/m ³)
C30	C30	--	0
C30-65/60-40	C30	RC 65/60 BN	40
C30-45/50-40	C30	RL 45/50 BN	40

Tabla 4.22.- Hormigones estudiados

4.5.2.- Estudio de la fisuración observada

Al igual que en las probetas ensayadas bajo carga en tercios, se ha estudiado la disposición inicial de las fisuras bajo carga central. En la tabla 4.23 se presentan las distancias medias del punto del inicio de la fisura al centro de la probeta, en donde el signo - indica que la fisura aparece a la izquierda del centro.

Designación	Distancia (cm)	Desviación estándar (cm)
C30	1.8	1.4
C30-65/60-40	-1.8	4.6
C30-45/50-40	-0.3	2.9

Tabla 4.23.- Distancia de la fisura al centro

Haciendo el promedio de las 9 probetas se obtiene una distancia del inicio de la fisura media al centro de -0.5 mm, con una desviación estándar de 1.8 cm, valores que son menores que los obtenidos para la misma serie C30 en el ensayo con carga a tercios, indicando una posible localización más centrada de la fisura.

Además, se ha apreciado en el estudio de la forma de las fisuras que todas ellas tienden hacia el punto de carga. Esto indica que, a diferencia del ensayo con carga en tercios, una fisura no iniciada en el centro va corrigiendo su camino durante la propagación.

4.5.3.- Forma de las curvas carga-flecha

En la figura 4.11, se presentan las curvas carga-flecha tipo obtenidas para cada una de las tres series ensayadas.

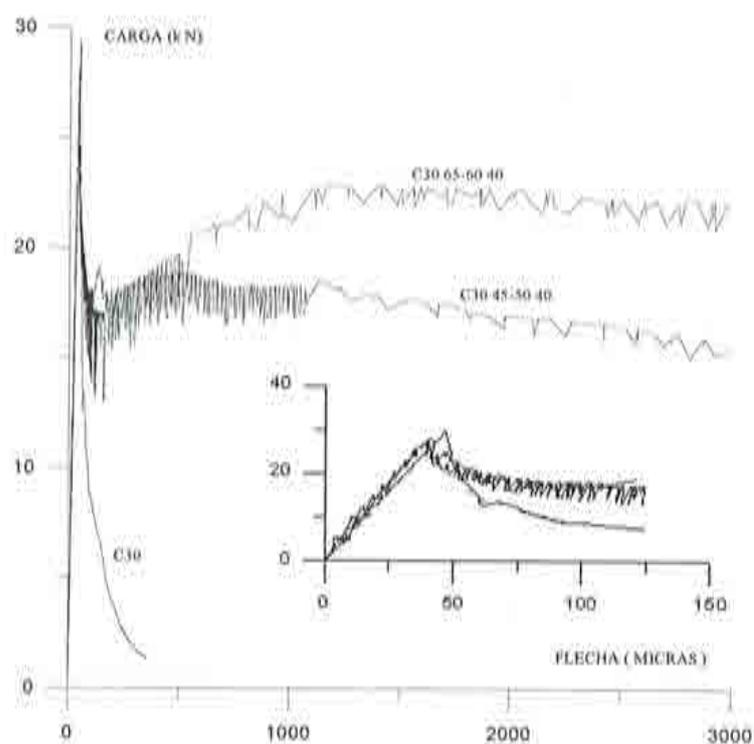


Fig. 4.11.- Forma de las curvas carga-flecha

Las curvas evidencian el beneficio de la adición de fibras que se manifiesta en un significativo incremento de la capacidad de carga tras el pico, presentando, en este sentido, una mayor efectividad las fibras RC 65/60 BN frente a las fibras RL 45/50 BN.

Asimismo, en la figura 4.11 insertada se pone de manifiesto que la forma de la curva en el prepico es prácticamente la misma en los tres casos y no parece clara la identificación del punto de primera fisura; este hecho también se ha presentado en el caso de la carga a tercios.

También, en las muestras ensayadas el ensayo con carga central se ha mostrado más estable (tras el pico) que en el caso de carga a tercios. Además, como puede observarse, las cargas aplicadas son menores que las del ensayo con carga a tercios, lo que implica, por una parte, menor exigencia en la capacidad de carga de la máquina de ensayo y, por otra parte, favorece una mayor estabilidad del ensayo.

4.5.4.- Resistencia a flexotracción y parámetros de tenacidad

En la tabla 4.24, se presentan distintos parámetros indicadores de la resistencia a flexotracción y de la tenacidad obtenidos fruto de los ensayos realizados bajo carga central. Estos parámetros son la resistencia a primera fisura (f_1), la resistencia a flexotracción (f_r), el índice de tenacidad I_{30} , y los indicadores $R_{20,30}$ y T (o $B/5()$). También, se ha calculado una

resistencia equivalente a flexotracción $f_{f,150}$ como $\frac{225B_n}{bh^2}$ donde b es el ancho de la probeta y h es su canto (en las probetas estudiadas, $b = h = 150$ mm).

Designación	f_t (MPa)	f_r (MPa)	I_{30}	$R_{20,30}$	T (kN.mm)	$f_{f,150}$ (MPa)
C30	3.3	5.0	--	--	--	--
C30-65/60-40	3.4	4.5	18.7	62.3	58.4	3.8
C30-45/50-40	3.8	5.1	15.3	50.0	46.6	3.0

Tabla 4.24.- Resistencia a flexotracción y parámetros de tenacidad en carga central

Estos resultados, tal como se ha puesto de manifiesto anteriormente, muestran una mayor efectividad de la fibra RC 65/60 BN frente a la fibra RL 45/50 BN.

4.5.5.- Comparación de los resultados obtenidos en los ensayos con carga central y con carga a tercios

En este apartado, se presenta un análisis comparativo de algunos parámetros representativos del comportamiento del hormigón con fibras evaluados mediante ensayos de flexotracción según las dos configuraciones de carga utilizadas: carga a tercios y carga central. Los valores de estos parámetros se exponen en la tabla 4.25.

Designación	Carga a tercios				Carga central			
	f_r (MPa)	I_{30}	T (kN.mm)	$f_{f,150}$ (MPa)	f_r (MPa)	I_{30}	T (kN.mm)	$f_{f,150}$ (MPa)
C30	4.4		--	--	5.0	--	--	--
C30-65/60-40	5.3	19.8	97.9	4.2	4.5	18.7	58.4	3.8
C30-45/50-40	5.2	16.7	61.4	2.7	5.1	15.3	46.6	3.0

Tabla 4.25.- Resultados para ensayos a carga central y a tercios

En relación a las resistencias a flexotracción, ambos ensayos proporcionan resultados muy similares, no manifestándose una influencia sensible de la configuración del ensayo.

Respecto a los parámetros de tenacidad, los valores de I_{30} son asimismo poco sensibles a la configuración de ensayo, pudiéndose atribuir este efecto a que este parámetro adimensional se obtiene por el cociente de dos áreas encerradas por la misma curva, lo cual puede independizar el valor del parámetro de la configuración del ensayo.

Por otra parte, los parámetros T y $f_{f,150}$ definidos para un límite establecido de flecha en la sección central, no resultan comparables dado que este límite tiene distinta significación según que la carga se aplique en los tercios de la luz o en el centro de la misma.

Asimismo, los resultados muestran, independientemente de los valores absolutos, que mediante ambas configuraciones se pone de manifiesto una mayor eficacia de la RC 65/60 BN frente a la fibra RL 45/50 BN, lo cual es lógico dado el mayor número de fibras por metro cúbico. Todo ello apunta a que la configuración con carga central puede proporcionar resultados con tendencias análogas a la configuración de carga a tercios, y en consecuencia, ser una vía de futuro para caracterizar la tenacidad del hormigón sin necesidad de definir para ello nuevos parámetros.

4.6.- RESULTADOS RELATIVOS AL ENSAYO CON VIGAS CON ENTALLA

Un procedimiento alternativo al ensayo con carga a tercios es el ensayo a flexotracción con carga centrada. Este procedimiento, desde el punto de vista práctico, presenta una mayor facilidad de ensayo al precisar de un único punto de carga y, también, al imponer la aparición y propagación de la fisura en la sección central; ello simplifica la instrumentación de la probeta para medir la apertura de la fisura. Además, al coincidir el punto de medición de la flecha con el punto de aplicación de la carga, la curva carga-flecha resultante proporciona una medida directa de la absorción de energía.

Sin embargo, desde el punto de vista estadístico, el imponer la fisura en una sección predeterminada no implica que la rotura se produzca en la sección más débil, lo cual, teóricamente, queda garantizado en el ensayo con carga a tercios (zona central con momento máximo constante).

En este apartado se presentan los resultados correspondientes a los ensayos realizados con la configuración de ensayo a flexotracción con carga central (o con tres puntos de carga), así como los parámetros de tenacidad basados en la curva carga-flecha obtenida mediante este ensayo.

4.6.1.- Hormigones estudiados

En esta fase del estudio, se ha trabajado con tres tipos de hormigón, de dosificación base C30, incorporando dos tipos de fibras con un mismo contenido de 40 kg/m^3 . Las características de estos hormigones se presentan en la tabla 4.22. Los ensayos se han realizado sobre muestras de 3 probetas.

Designación	Dosificación base	Tipo de fibra	Contenido (kg/m ³)
C30	C30	--	0
C30-65/60-40	C30	RC 65/60 BN	40
C30-45/50-40	C30	RL 45/50 BN	40

Tabla 4.26.- Hormigones estudiados

En estas probetas se ha practicado en el centro de la luz, mediante corte con sierra cinta de diamante, una entalla de 12 mm de longitud y 3 mm de ancho.

4.6.2.- Estudio de la fisuración observada

Una de las ventajas del empleo de probetas con entalla es que la fisura se inicia siempre en la punta de la entalla y que el trayectoria nominal de la fisura esta contenida en el plano de la entalla. Ello reduce la variabilidad de los resultados al estar localizado el daño en una única sección sin modificar las características de la tortuosidad de la fisura ni la fisuración secundaria, ambas asociadas a la incorporación de las fibras.

4.6.3.- Forma de las curvas carga-flecha y carga-apertura de fisura

En la figura 4.12 y 4.13, se presentan respectivamente las curvas tipo correspondientes a los ensayos realizados, en términos de la flecha y la apertura de fisura (CMOD) medidas durante los mismos. Estos resultados ponen de manifiesto que la curva-CMOD presenta una caída menos brusca después del pico que la curva de carga-flecha, lo que se traduce en una mayor estabilidad del ensayo cuando se controla mediante la apertura de fisura como variable del control frente al control por la flecha (Gettu et al., 1998a).

Asimismo, mediante el control por la apertura de fisura se obtiene una respuesta post-pico en la curva carga-flecha sin pérdida de control, lo cual no sucede en los ensayos presentados anteriormente sobre probetas sin entalla y controlados por flecha.

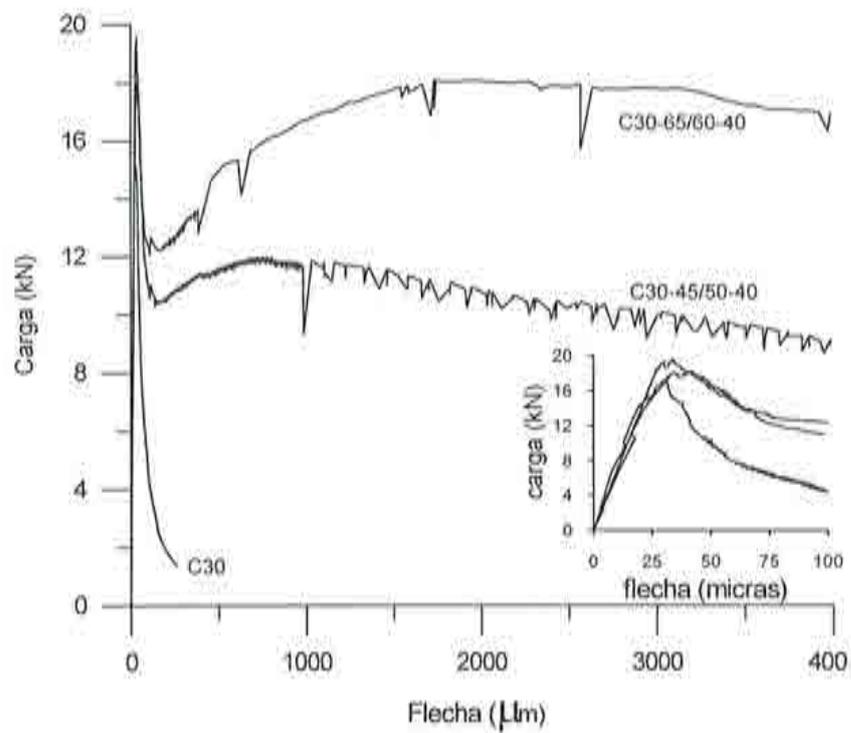


Fig. 4.12.- Curvas carga-flecha en probetas entalladas

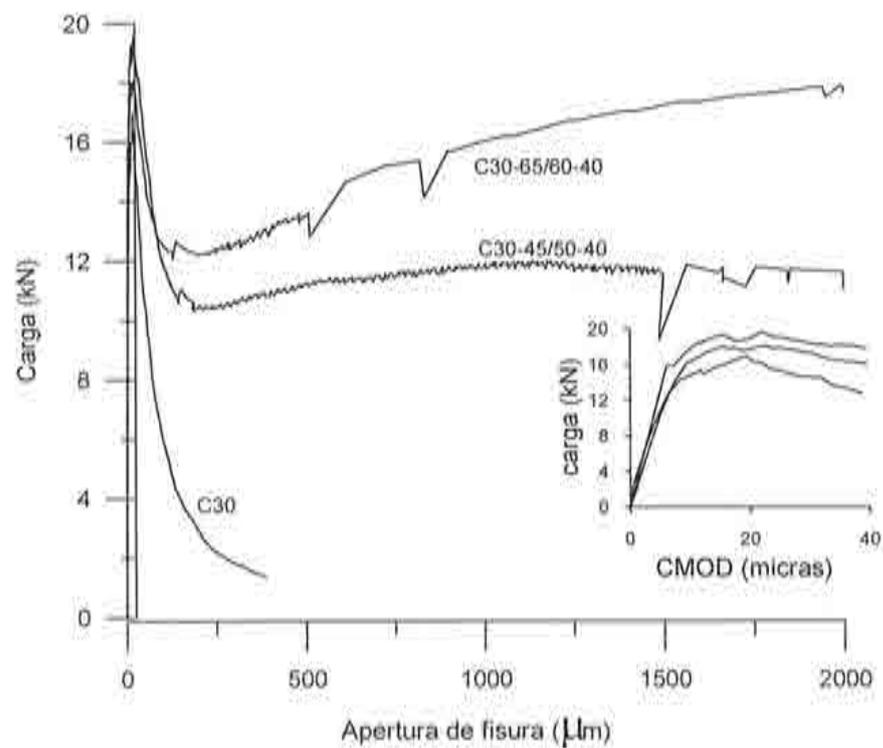


Fig. 4.13.- Curvas carga-apertura de fisura en probetas entalladas

4.6.4.- Resistencia a flexotracción y parámetros de tenacidad

La configuración de la probeta con entalla y carga centrada no esta contemplada en las normas y códigos existentes para el hormigón con fibras, si bien el comité técnico TC 162 de RILEM se plantea adoptar esta configuración para la medida experimental de la tenacidad del hormigón.

En este sentido, los parámetros de tenacidad que se presentan en este apartado se han obtenido por extrapolación directa de la definición de los mismos para el caso de probeta sin entalla. Aunque este planteamiento pueda ser objeto de discusión, se ha estimado pertinente de cara a estudiar las tendencias y comparar, de una forma homogénea, los resultados así obtenidos con los correspondientes a los ensayos convencionales.

En la tabla 4.27, se presentan la resistencia a flexotracción (f_r), el parámetro de tenacidad (T ó B_{150}) y la resistencia equivalente a flexotracción $f_{f,150}$ calculada como $f_{f,150} = 225B_{150}/b(h-a_0)^2$, donde b es el ancho de la probeta, h es su canto (en las probetas estudiadas, $b = h = 150$ mm), y a_0 es la longitud de la entalla (12 mm). Asimismo, en la citada tabla, se presentan los valores correspondientes evaluados en el ensayo de carga a tercios

Designación	Carga central - probetas entalladas			Carga a tercios – probetas sin entalla		
	f_r (MPa)	T (kN.mm)	$f_{f,150}$ (MPa)	f_r (MPa)	T (kN.mm)	$f_{f,150}$ (MPa)
C30	4.0	--	--	4.4	--	--
C30-65/60-40	4.3	52.1	4.1	5.3	97.9	4.2
C30-45/50-40	4.5	36.0	2.8	5.2	61.4	2.7

Tabla 4.27.- Parámetros de tenacidad en probetas entalladas y sin entalla

Estos resultados ponen de manifiesto que se mantienen las tendencias en ambos casos. Asimismo, los valores de la resistencia a flexotracción son del mismo orden de magnitud, si bien inferiores en el caso de las probetas entalladas reflejando el efecto de la concentración de tensiones inducida por la entalla.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS CORRESPONDIENTES AL HORMIGÓN C70

5.1.- INTRODUCCIÓN

En el capítulo precedente se han presentado los resultados y el análisis de resultados relativos a los ensayos realizados sobre las probetas fabricadas con los hormigones base de resistencia normal, designados por C20 y C30. Siguiendo el mismo hilo conductor del capítulo anterior, en el presente capítulo se exponen los resultados y el análisis de resultados correspondientes al hormigón base de alta resistencia, denominado por C70. Estos resultados corresponden al valor medio de tres determinaciones y deben entenderse en el contexto de los materiales y dosificaciones empleadas en el estudio.

En primer lugar se presentan los resultados correspondientes a los ensayos de flexotracción con carga a tercios y a continuación los relativos a los ensayos con carga central; finalmente, se exponen los que conciernen a los ensayos con carga central sobre probetas con entalla. Estos resultados se analizan en términos de diferentes indicadores de la tenacidad del hormigón.

Los distintos parámetros representativos de la tenacidad que se presentan en este capítulo para el hormigón de alta resistencia se han evaluado mediante los mismos criterios y

formulaciones utilizados para los hormigones de resistencia normal, los cuales se han expuesto en el capítulo anterior; por lo cual podría obviarse su exposición dentro de este capítulo. No obstante, a efectos de facilitar el seguimiento de este capítulo y permitir una lectura del mismo con una cierta independencia del anterior, no teniendo que remitir al lector sistemáticamente al capítulo precedente, se han incluido nuevamente los diferentes criterios y formulaciones utilizados en cada caso.

5.2. DOSIFICACIONES Y CONFIGURACIONES DE ENSAYO

Esta etapa del estudio se ha realizado con un hormigón base de alta resistencia denominado C70 (resistencia a compresión de 70 MPa a los 28 días), en el que se han incorporado fibras metálicas de un mismo tipo y en diferentes cantidades.

En la tabla 5.1, se presenta la dosificación del hormigón de alta resistencia utilizado. Los materiales componentes empleados en su fabricación son un cemento del tipo CEM I 52.5R, una arena silícea (0-5 mm), una gravilla caliza de machaqueo (5-12 mm), un superfluidificante tipo naftaleno (Daracem 195) y un humo de sílice ELKEM grado 920D. La fibra empleada en esta fase del estudio es de un único tipo (ZC 30/0.50), suministrada por BEKAERT, cuyas características se presentan en la tabla 4.2.

COMPONENTE	Hormigón C70
Cemento (kg)	457
Agua añadida (kg)	143
Arena (kg)	869
Gravilla (kg)	869
Superfluidificante (l)	25.4
Humo de sílice (kg)	46
Relación a/c	0.34

Tabla 5.1.- Dosificación del hormigón C70 por m³

Característica de la fibra	Fibra ZC 30/0.50
Resistencia a tracción (MPa)	2500
Longitud (mm)	30
Diámetro (mm)	0.5
Esbeltez	60
Encoladas/sueltas	Encoladas

Tabla 5.2.- Características de la fibra empleada en el hormigón C70

Las probetas de hormigón, prismáticas de dimensiones 150 mm×150 mm×600 mm, se han ensayado a flexotracción mediante tres configuraciones de carga: carga en los tercios de la luz entre apoyos, carga central y carga central con probetas entalladas; en las probetas entalladas se ha practicado en el centro de la luz una entalla de 12 mm de longitud y 3 mm de ancho, mediante corte con sierra cinta de diamante. En la tabla 5.3 se muestra la denominación utilizada a lo largo de este estudio para los hormigones ensayados, y el contenido de fibras; cada serie ensayada está constituida por una muestra de tres probetas.

Designación	Tipo de hormigón	Tipo de fibra	Cantidad de fibras (kg/m ³)
C70	C70	--	--
C70-60/30-40	C70	ZC 30/0.5	40
C70-60/30-80	C70	ZC 30/0.5	80

Tabla 5.3.- Probetas fabricadas con el hormigón C70

5.3. RESULTADOS RELATIVOS AL ENSAYO CON CARGA EN LOS TERCIOS DE LA LUZ

En este apartado se presentan los resultados correspondientes a los ensayos realizados con esta configuración de carga, así como los parámetros de tenacidad basados en la curva carga-flecha obtenida mediante este ensayo.

5.3.1. Estudio de la fisuración

Tras cada ensayo se ha registrado, en papel vegetal, la forma y posición de las fisuras producidas; ello ha permitido definir la posición del inicio de la fisura, en ambas caras de la probeta. La posición media del inicio de la fisura se ha definido por el promedio de ambas caras. En la tabla 5.4 se presenta la posición de inicio de la fisura respecto al centro de la luz para las probetas del hormigón C70, en donde el signo positivo significa que la fisura se presentó a la derecha de la sección de centro luz y el signo negativo que se presentó a la izquierda; los resultados que se presentan corresponden a la media de los valores correspondientes a las tres probetas estudiadas de la misma serie.

Designación	Posición media del inicio de la fisura (cm)	Desviación estándar (cm)
C70	-2.1	5.3
C70-60/30-40	1.1	3.2
C70-60/30-80	0.3	3.2

Tabla 5.4.- Posición de la fisura

Análogamente al caso de los hormigones de resistencia normal, la observación de los croquis de las fisuras muestra que, generalmente, la fisura es bastante recta, presentándose más tortuosidad y fisuración secundaria en aquel hormigón con mayor cantidad de fibras, tal y como es de esperar dado el efecto puente de la fibra durante la fisuración.

Asimismo, los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la posición relativa de la fisura respecto al centro de la viga no se ve influenciada por la dosificación de fibra.

5.3.2. Curvas carga-flecha

En este apartado se presentan las curvas carga-flecha obtenidas para cada uno de los hormigones con fibras ensayados según la configuración de carga en tercios.

En la figura 5.1 se visualizan las curvas tipo obtenidas para los hormigones C70; las curvas presentadas responden al criterio de escoger de las tres curvas de cada serie aquella que representa mejor el promedio de la serie. En estas curvas se han linealizado los tramos iniciales para eliminar el efecto del acoplamiento del sistema, tal como se recomienda en las normas UNE 83-510 y ASTM C 1018.

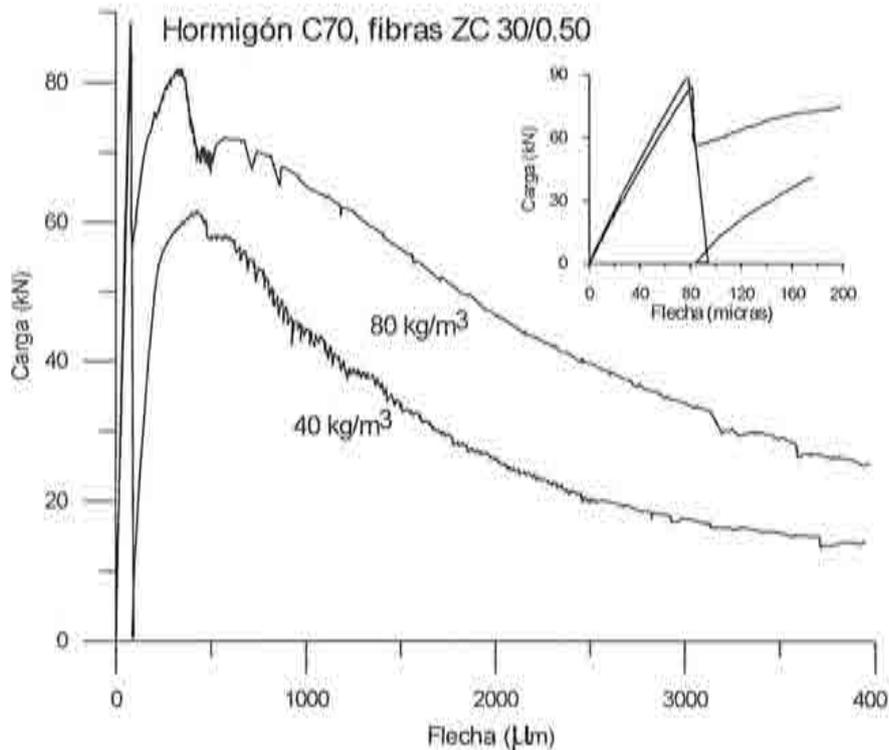


Figura 5.1.- Curvas tipo para los hormigones C70 sin y con fibras

En la citada gráfica se han insertado los tramos iniciales de cada una de las curvas observándose en ellas que la respuesta prepico (curva anterior al pico o carga máxima) es muy similar en todos los casos. En el hormigón de alta resistencia sin fibras (C70) no pudo obtenerse respuesta en el postpico por romperse bruscamente la probeta una vez alcanzada la carga de pico.

Comparando estos resultados con los correspondientes a los hormigones de resistencia normal, se puede observar una mayor inestabilidad en el postpico y que la curva a partir de este punto decrece continuamente, en contraposición a la forma de meseta presentada en los hormigones C20 y C30.

Sin embargo, la mencionada figura ilustra claramente la favorable incidencia que supone la incorporación de las fibras a este hormigón, en términos del incremento significativo de absorción de energía tras el pico, el cual es directamente proporcional al contenido de fibras.

5.3.3.- Resistencia a flexotracción

La tensión de rotura por flexotracción o el módulo de rotura es un parámetro definido en distintas normativas tales como, entre otras, UNE 83-509, ASTM C 1018, NBN B 15-238 y JCI-SF4. Se define como la tensión de tracción (calculada según la teoría elástica) a que se ve sometida la fibra inferior de la viga en el tercio central, cuando ésta se ve solicitada por la carga pico. Esta tensión se evalúa según la siguiente expresión; la cual es válida siempre que la rotura se produzca en el tercio central.

$$f_{cf} = \frac{F \times l}{d_1 \times d_2^2}$$

donde:

f_{cf} : resistencia a flexotracción, en MPa.

F : carga de rotura (o carga pico), en N .

L : distancia entre apoyos, en mm.

d_1 : ancho de la probeta, en mm.

d_2 : canto de la probeta, en mm.

Distintas normas, entre ellas la UNE 83-510 y ASTM C 1018-92, calculan, bajo las mismas consideraciones, la resistencia a flexotracción para la carga correspondiente al punto de primera fisura, la cual se puede denominar por resistencia a primera fisura.

En la tabla 5.5 se muestran los valores de la resistencia a flexotracción (tensión de pico) y de la resistencia a primera fisura (tensión de primera fisura), evaluadas sobre una muestra de tres probetas.

Designación	Resistencia a flexotracción		Resistencia a primera fisura	
	Valor medio (MPa)	Coefficiente de variación (%)	Valor medio (MPa)	Coefficiente de variación (%)
C70	10.5	8	10.4	8
C70-60/30-40	11.2	4	7.5	5
C70-60/30-80	10.9	4	6.8	8

Tabla 5.5.- Resistencia a flexotracción y resistencia a primera fisura

Como puede apreciarse, tal y como se ha puesto también de manifiesto en los hormigones de resistencia normal estudiados (C20 y C30), la adición de las fibras al hormigón no incide en forma significativa en la resistencia a flexotracción, lo cual concuerda con el hecho conocido de que el beneficio derivado de la incorporación de las fibras se manifiesta claramente a partir de la carga pico.

5.3.4. Evaluación de parámetros de tenacidad

Para evaluar la tenacidad las diferentes normativas definen una serie de parámetros que, en su mayoría, se basan en la curva carga-flecha obtenida en el ensayo de flexotracción de probetas prismáticas bajo una configuración de carga en tercios.

Con los resultados obtenidos mediante esta configuración de ensayo se ha evaluado la tenacidad según distintos indicadores contemplados en distintas normativas y recomendaciones. Estos indicadores se han clasificado en los siguientes grupos:

- Índices adimensionales
- Parámetros absolutos de absorción de energía
- Resistencia a flexotracción equivalente
- Tensión residual

5.3.4.1. Índices adimensionales

La norma ASTM C 1018 define los parámetros I_3 , I_{10} e I_{20} , que relacionan el área bajo la curva carga-flecha hasta 3, 5.5 y 10.5 veces la flecha correspondiente al punto de primera fisura con el área hasta el punto de primera fisura; según esta definición, un comportamiento elastoplástico con pico en el punto de primera fisura proporcionaría, respectivamente, para estos índices los valores de 5, 10 y 20. La UNE 83-510 utiliza el parámetro I_{30} , que se define análogamente a los anteriores, pero hasta un límite de flecha de 15.5 veces la del punto de primera fisura.

Tal como se ha comentado con anterioridad, la determinación del punto de primera fisura no es fácil en muchas ocasiones, y por tanto, no siempre se puede hacer de forma objetiva; ello conduce a que estos índices puedan llevar implícita una cierta subjetividad

asociada a la determinación del punto de primera fisura. Una forma de paliar este efecto es utilizar, en lugar del punto de primera fisura, el primer pico cuya definición es usualmente más objetiva.

En la tabla 5.6 se presentan las áreas bajo la curva carga-flecha hasta primera fisura y primer pico, en términos del valor medio de las tres probetas de cada serie. Estas áreas intervienen en la definición de los parámetros adimensionales que se presentan posteriormente; como puede observarse, las áreas correspondientes al primer pico son mayores que las correspondientes a primera fisura, por ocurrir ésta antes del pico.

Designación	Área hasta primera fisura (kN.mm)	Área hasta primer pico (kN.mm)
C70	2.99	3.06
C70-60/30-40	1.44	3.44
C70-60/30-80	1.22	3.40

Tabla 5.6.- Áreas hasta primera fisura y primer pico

En la tabla 5.7 se presentan los parámetros I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30} , evaluados respecto al punto de primera fisura y al punto de primer pico. Estos índices corresponden al promedio de las tres probetas de su serie.

Designación	Índices basados en primera fisura				Índices basados en primer pico			
	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}
C70	-	-	-	-	-	-	-	-
C70-60/30-40	3.87	6.32	12.31	20.06	2.56	5.37	9.27	13.93
C70-60/30-80	6.01	13.06	27.72	41.83	4.27	8.71	17.30	25.35

Tabla 5.7.- Índices de tenacidad adimensionales

Análogamente a los resultados de los hormigones de resistencia normal, en la citada tabla se pone de manifiesto que los parámetros I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30} definidos según el punto de primera fisura resultan mayores que los definidos según el primer pico dado que el área encerrada por la curva carga-flecha hasta la primera fisura es menor que el área hasta el primer pico. Asimismo, los parámetros definidos según el primer pico han resultado más objetivos en los casos estudiados en este trabajo, los cuales corresponden a los contenidos de fibras anteriormente expuestos; ello obedece a que este punto se ha podido determinar de forma precisa. En consecuencia, se ha adoptado los índices de tenacidad basados en el primer pico en el resto del trabajo, y en los posteriores análisis de resultados que se exponen seguidamente.

Asimismo, estos resultados ponen de manifiesto que los índices I_5 e I_{10} son sensibles al contenido de fibras, lo cual no sucedía para el caso de hormigones de resistencia normal.

Ello puede imputarse a la mayor cantidad de fibras por metro cúbico y fragilidad del hormigón base.

5.3.4.2. Parámetros de tensión residual

La norma ASTM C 1018, además de los índices I_n presentados anteriormente, define otros parámetros que representan la tensión residual correspondiente a distintos límites de flecha. Estos se evalúan mediante las siguientes relaciones: $R_{5,10} = 20(I_{10} - I_5)$ y $R_{10,20} = 10(I_{20} - I_{10})$, las cuales, para un material elastoplástico perfecto con pico en el punto de primera fisura, toman ambas el valor de 100.

En la tabla 5.8 se presentan las tensiones residuales $R_{5,10}$ y $R_{10,20}$ evaluadas con los valores de los índices I_n obtenidos anteriormente respecto al primer pico. Asimismo, en ella se presenta también un el parámetro de tensión residual $R_{20,30} = 10(I_{30} - I_{20})$, presentado en el capítulo anterior. El adoptar el primer pico como referencia para el cálculo de estos parámetros permite una correlación de los mismos con la resistencia a flexotracción (adoptada como valor 100); el valor de cada parámetro de tensión residual corresponde al porcentaje de la resistencia a flexotracción que todavía le queda al material (resistencia residual) entre los límites de flecha asociados al mismo.

Designación	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$	$R_{20,30}$
C70	-	-	-
C70-60/30-40	56.2	50.7	46.6
C70-60/30-80	88.8	85.9	80.6

Tabla 5.8.- Tensiones residuales

5.3.4.3. Parámetros absolutos de absorción de energía

Una medida de la capacidad de absorción de energía de un hormigón con fibras puede establecerse a través del área encerrada por la curva carga-flecha hasta rotura (curva completa). Esto implicaría, por una parte una larga duración del ensayo, y por otra, que el rango de deformaciones superaría el rango deformaciones a las que se ve sometido el material en condiciones usuales de servicio. Por ello, distintas normas, entre ellas UNE 83-510, NBN B 15-238 y JCI-SF4, proponen parámetros de tenacidad que miden la energía absorbida ciertos límites prefijados de flecha, establecidos de forma que representen situaciones reales de servicio.

Así, la norma UNE 83-510-89 define el parámetro T como el área bajo la curva carga-flecha hasta un límite de flecha igual a la luz/150. El mismo parámetro se utiliza en JCI-SF4 y NBN B 15-238 (B_{150}). La norma belga define además otro parámetro B_{300} como el área bajo la curva carga-flecha hasta el límite igual a la luz/300. Los límites luz/150 y luz/300, para las

dimensiones de probetas consideradas en este estudio, resultan ser 3 y 1.5 mm, respectivamente.

En la tabla 5.9 se presentan los valores obtenidos para los parámetros T (o B_{150}) B_{300} , en donde cada resultado es el valor medio de tres probetas de cada serie.

Designación	T (kN.mm)	B_{300} (kN.mm)
C70	--	--
C70-60/30-40	95.6	58.9
C70-60/30-80	179.8	103.7

Tabla 5.9.- Parámetros T y B_{300}

Los resultados expuestos ponen de manifiesto que estos parámetros son buenos indicadores del contenido de fibras en el hormigón, reflejándose en el aumento del valor de T y B_{300} con el aumento en el contenido de fibras.

5.3.4.4. Resistencia equivalente a flexotracción

Otra medida de la tenacidad es mediante la resistencia equivalente a flexotracción, tal como consideran, entre otras, las normas NBN B 15-238 y JCI-SF4. Estas definen la resistencia equivalente como la tensión máxima correspondiente a un valor medio de la carga asociada a distintos intervalos de la flecha alcanzada en el régimen post-pico.

Así, la NBN B 15-238 define las resistencias equivalentes $f_{f,150}$ y $f_{f,300}$ como $\frac{B_n n}{bh^2}$ con $n = 150$ y 300 , respectivamente, donde b es el ancho de la probeta y h es su canto (en las probetas estudiadas, $b = h = 150$ mm). Por otra parte, la JCI-SF4 define una resistencia equivalente a través de un parámetro $\bar{\sigma}_h$, que coincide con el $f_{f,150}$.

En la tabla 5.10. se presentan los valores de los parámetros $f_{f,150}$ y $f_{f,300}$ para las probetas ensayadas, junto con el valor correspondiente de la resistencia a flexotracción (para la carga pico), f_f .

Designación	f_f (MPa)	$f_{f,300}$ (MPa)	$f_{f,150}$ (MPa)
C70	10.47	--	--
C70-60/30-40	11.18	5.14	4.17
C70-60/30-80	10.88	9.16	7.94

Tabla 5.10. Resistencias equivalentes

Los valores de los parámetros $f_{f,150}$ y $f_{f,300}$ aumentan al aumentar el contenido de fibras, tal y como es de esperar dado el incremento en la capacidad de carga del material en el régimen post-pico.

5.4.- RESULTADOS RELATIVOS AL ENSAYO CON CARGA CENTRAL

Un procedimiento alternativo al ensayo con carga a tercios es el ensayo a flexotracción con carga centrada. Este procedimiento, desde el punto de vista práctico, presenta una mayor facilidad de ensayo al precisar de un único punto de carga y, también, al imponer la aparición y propagación de la fisura en la sección central; ello simplifica la instrumentación de la probeta para medir la apertura de la fisura. Además, al coincidir el punto de medición de la flecha con el punto de aplicación de la carga, la curva carga-flecha resultante proporciona una medida directa de la absorción de energía.

Sin embargo, desde el punto de vista estadístico, el imponer la fisura en una sección predeterminada no implica que la rotura se produzca en la sección más débil, lo cual, teóricamente, queda garantizado en el ensayo con carga a tercios (zona central con momento máximo constante).

En este apartado se presentan los resultados correspondientes a los ensayos realizados con la configuración de ensayo a flexotracción con carga central (o con tres puntos de carga), así como los parámetros de tenacidad basados en la curva carga-flecha obtenida mediante este ensayo.

5.4.1. Estudio de la fisuración observada

Al igual que en las probetas ensayadas bajo carga en tercios, se ha estudiado la disposición inicial de las fisuras bajo carga central. En la tabla 5.10 se presentan las distancias medias del punto del inicio de la fisura al centro de la probeta, en donde el signo indica que la fisura aparece a la izquierda del centro.

Designación	Posición media del inicio de la fisura (cm)	Desviación estándar (cm)
C70	-1.0	0.7
C70-60/30-40	-0.5	1.1
C70-60/30-80	-1.2	0.9

Tabla 5.10.- Distancia de la fisura al centro

Haciendo el promedio de las 9 probetas se obtiene una distancia del inicio de la fisura media al centro de -9 mm, con una desviación estándar de 9 mm, lo que indica que la probabilidad de que la fisura aparezca en los 4 cm centrales de la probeta es muy alta; ello supone una centralización de la fisura mayor que la que se presenta en el caso del ensayo con carga a tercios y, por tanto, se conserva mejor la simetría del ensayo

Asimismo, en el estudio de la forma de las fisuras se ha apreciado que todas ellas tienden hacia el punto de carga. Esto indica que, a diferencia del ensayo con carga en tercios, una fisura no iniciada en el centro va corrigiendo su camino durante la propagación. También, la fisuración secundaria y la tortuosidad aumentan con el contenido de fibras.

5.4.2. Forma de las curvas carga-flecha

En la figura 5.2, se presentan las curvas carga-flecha tipo obtenidas para cada una de las series ensayadas.

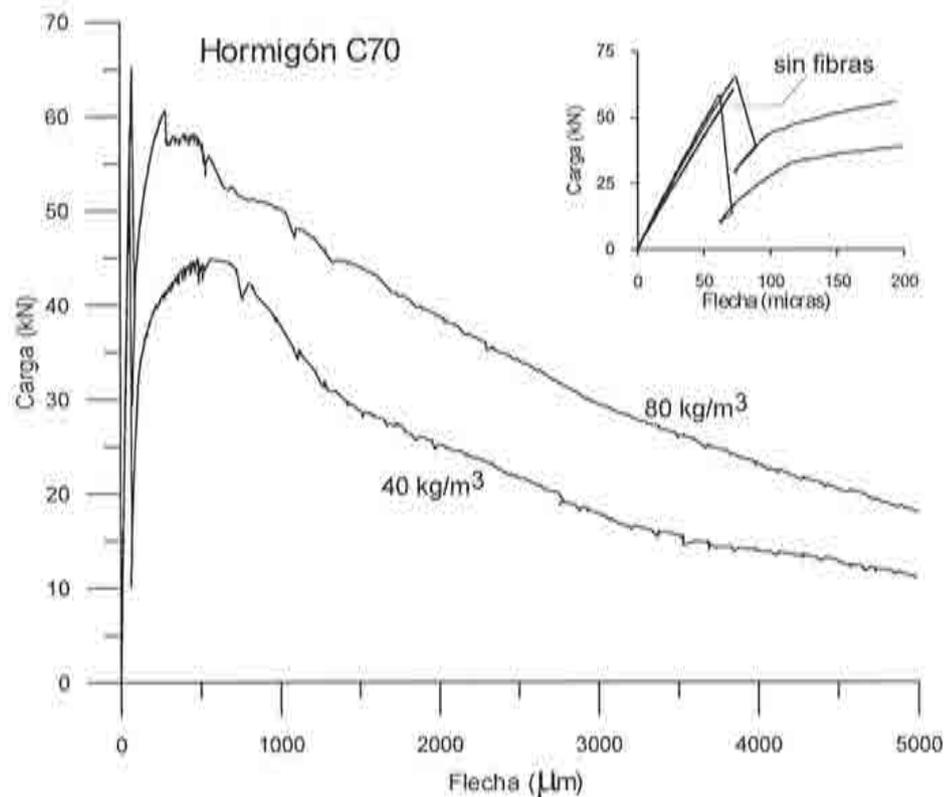


Figura 5.2. Curvas carga-flecha

Las curvas evidencian el beneficio de la adición de fibras que se manifiesta en un significativo incremento de la capacidad de carga tras el pico. Asimismo, en la figura 5.2 insertada se pone de manifiesto que la forma de la curva en el prepico es prácticamente la misma en los tres casos y no parece clara la identificación del punto de primera fisura; este hecho también se ha presentado en el caso de la carga a tercios.

5.4.3.- Resistencia a flexotracción y parámetros de tenacidad

En la tabla 5.11, se presentan distintos parámetros indicadores de la resistencia a flexotracción y de la tenacidad obtenidos fruto de los ensayos realizados bajo carga central. Estos parámetros son la resistencia a primera fisura (f_t), la resistencia a flexotracción (f_r), el índice de tenacidad I_{30} , y los indicadores $R_{20,30}$ y T (o B_{150}). También, se ha calculado una resistencia equivalente a flexotracción $f_{f,150}$ como $\frac{225B_n}{bh^2}$ donde b es el ancho de la probeta y h es su canto (en las probetas estudiadas, $b = h = 150$ mm).

Designación	f_t (MPa)	f_r (MPa)	I_{30}	$R_{20,30}$	T (kN.mm)	$f_{f,150}$ (MPa)
C70	8.2	11.1	--	--	--	--
C70-60/30-40	7.7	10.9	19.3	62.8	85.6	5.5
C70-60/30-80	7.6	11.8	24.5	80.0	137.2	9.0

Tabla 5.11.- Resistencia a flexotracción y parámetros de tenacidad en carga central

Respecto a los parámetros de tenacidad, los valores de I_{30} son más sensibles al contenido de fibras que los correspondientes a los hormigones C20 y C30, si bien tenerse en cuenta que para el hormigón C70 los contenidos de fibras son mayores.

5.4.4.- Comparación de los resultados obtenidos en los ensayos con carga central y con carga a tercios

En este apartado, se presenta un análisis comparativo de algunos parámetros representativos del comportamiento del hormigón con fibras evaluados mediante ensayos de flexotracción según las dos configuraciones de carga utilizadas: carga a tercios y carga central. Los valores de estos parámetros se exponen en la tabla 4.25.

Designación	Carga a tercios				Carga central			
	f_r (MPa)	I_{30}	T (kN.mm)	$f_{f,150}$ (MPa)	f_r (MPa)	I_{30}	T (kN.mm)	$f_{f,150}$ (MPa)
C70	10.5	--	--	--	11.1	--	--	--
C70-60/30-40	11.2	13.9	95.6	4.2	10.9	19.3	85.6	5.5
C70-60/30-80	10.9	25.3	179.8	7.9	11.8	24.5	137.2	9.0

Tabla 5.12.- Resultados para ensayos a carga central y a tercios

En relación a las resistencias a flexotracción y el índice I_{30} , ambos ensayos proporcionan resultados muy similares, no manifestándose una influencia sensible de la configuración del ensayo.

Por otra parte, los parámetros T y $f_{f,150}$ definidos para un límite establecido de flecha en la sección central, no resultan comparables dado que este límite tiene distinta significación según que la carga se aplique en los tercios de la luz o en el centro de la misma.

5.5. RESULTADOS RELATIVOS AL ENSAYO CON VIGAS CON ENTALLA

Si bien esta configuración de ensayo no responde actualmente a un ensayo normalizado, el comité técnico TC 162 de RILEM se plantea adoptar esta configuración para la medida experimental de la tenacidad del hormigón. En consecuencia, los parámetros de tenacidad que se presentan en este apartado se han obtenido por extrapolación directa de la definición de los mismos contemplada en distintas normativas para el caso de probeta sin entalla. Aunque este planteamiento pueda ser objeto de debate, permite analizar y contrastar, bajo un mismo criterio, las tendencias de los indicadores así obtenidos con los correspondientes a los ensayos convencionales.

A continuación se exponen los resultados correspondientes a los ensayos realizados con la configuración de ensayo a flexotracción con carga central (o con tres puntos de carga) sobre probetas prismáticas en las que se ha practicado en el centro de la luz, mediante corte con sierra cinta de diamante, una entalla de 12 mm de longitud y 3 mm de ancho ; asimismo se exponen los parámetros de tenacidad basados en la curva carga-flecha obtenida mediante este ensayo.

5.5.1. Estudio de la fisuración observada

Una de las ventajas del empleo de probetas con entalla es que la fisura se inicia siempre en la punta de la entalla y que la trayectoria nominal de la fisura esta contenida en el plano de la entalla. Ello reduce la variabilidad de los resultados al estar localizado el daño en

una única sección sin modificar las características de la tortuosidad de la fisura ni la fisuración secundaria, ambas asociadas a la incorporación de las fibras

5.5.2. Forma de las curvas carga-flecha y carga-apertura de fisura

En las figuras 5.3 y 5.4, se presentan respectivamente las curvas tipo correspondientes a los ensayos realizados, en términos de la flecha y la apertura de fisura (CMOD) medidas durante los mismos. Estos resultados ponen de manifiesto que la curva-CMOD presenta una caída menos brusca después del pico que la curva de carga-flecha, lo que se traduce en una mayor estabilidad del ensayo cuando se controla mediante la apertura de fisura como variable del control frente al control por la flecha (Gettu et al., 1998a, 1998b).

Asimismo, mediante el control por la apertura de fisura se obtiene una respuesta post-pico en la curva carga-flecha sin pérdida de control, lo cual no sucede en los ensayos presentados anteriormente sobre probetas sin entalla y controlados por flecha.

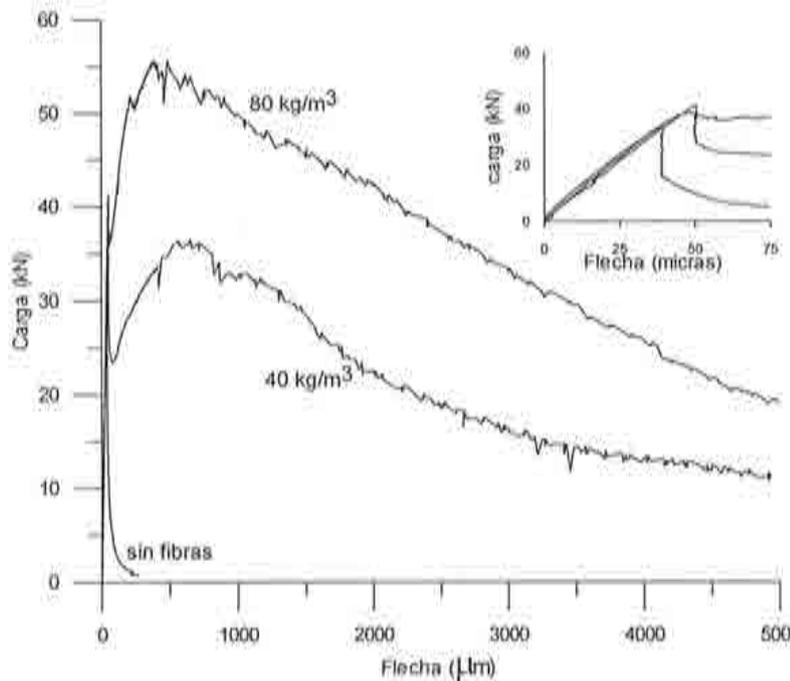


Figura 5.3. Curvas carga-flecha en probetas entalladas

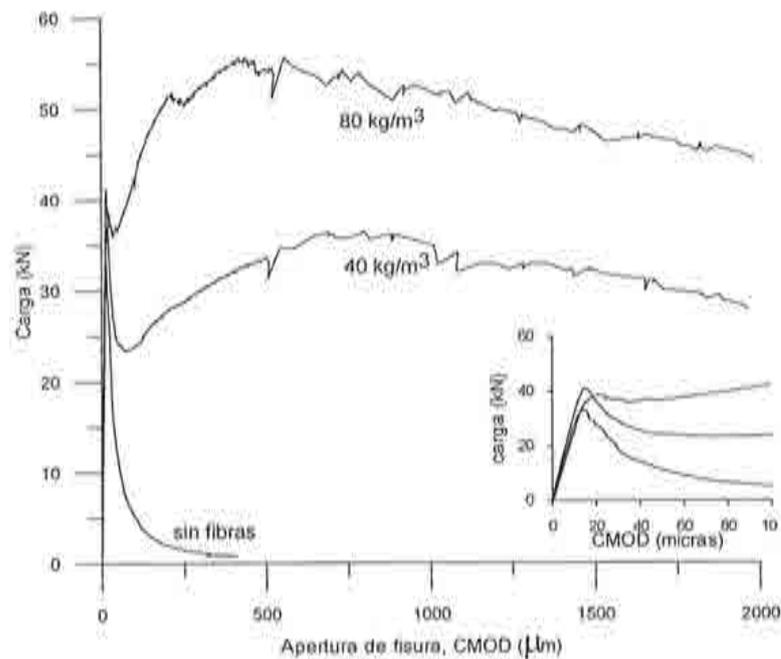


Figura 5.4. Curvas carga-apertura de fisura en probetas entalladas

5.5.3.- Resistencia a flexotracción y parámetros de tenacidad

La configuración de la probeta con entalla y carga centrada no está contemplada en las normas y códigos existentes para el hormigón con fibras, si bien el comité técnico TC 162 de RILEM se plantea adoptar esta configuración para la medida experimental de la tenacidad del hormigón.

En este sentido, los parámetros de tenacidad que se presentan en este apartado se han obtenido por extrapolación directa de la definición de los mismos para el caso de probeta sin entalla. Aunque este planteamiento pueda ser objeto de discusión, se ha estimado pertinente de cara a estudiar las tendencias y comparar, de una forma homogénea, los resultados así obtenidos con los correspondientes a los ensayos convencionales.

En la tabla 5.13, se presentan la resistencia a flexotracción (f_p), el parámetro de tenacidad (T ó B_{150}) y la resistencia equivalente a flexotracción $f_{f,150}$ calculada como $f_{f,150} = 225B_{150}/b(h-a_0)^2$, donde b es el ancho de la probeta, h es su canto (en las probetas estudiadas, $b = h = 150$ mm), y a_0 es la longitud de la entalla (12 mm). Asimismo, en la citada tabla, se presentan los valores correspondientes evaluados en el ensayo de carga a tercios

Designación	Carga central - probetas entalladas			Carga a tercios - probetas sin entalla		
	f_r (MPa)	T (kN.mm)	$f_{f,150}$ (MPa)	f_r (MPa)	T (kN.mm)	$f_{f,150}$ (MPa)
C70	7.9	-	-	10.5	-	-
C70-60/30-40	9.4	76.7	6.0	11.2	95.6	4.2
C70-60/30-80	8.6	137.2	10.4	10.9	179.8	7.9

Tabla 5.13.- Parámetros de tenacidad en probetas entalladas y sin entalla

Estos resultados ponen de manifiesto que se mantienen las tendencias en ambos casos. Asimismo, los valores de la resistencia a flexotracción son del mismo orden de magnitud, si bien inferiores en el caso de las probetas entalladas reflejando el efecto de la concentración de tensiones inducida por la entalla.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6.1.- INTRODUCCIÓN

En este capítulo se exponen las conclusiones que se derivan de los distintos estudios desarrollados a lo largo de este trabajo. Estas conclusiones se presentan encuadradas en dos grupos principales.

En el primer grupo de conclusiones, se detallan las relativas a distintos aspectos que conciernen a la fabricación de las probetas de ensayo. Dentro del segundo grupo, se recogen las conclusiones derivadas de los ensayos realizados siguiendo las tres configuraciones de ensayo contempladas en el presente estudio.

6.2.- CONCLUSIONES RELATIVAS A LA FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS DE ENSAYO

- La medida de la trabajabilidad del hormigón con fibras mediante el cono de Abrams parece no ser adecuada para asientos menores que 10 cm. Por otra parte, en hormigones con asientos mayores que 10 cm, se observa una disminución de la trabajabilidad con el aumento del contenido de fibras. Este efecto es particularmente importante para el caso de hormigones de alta resistencia, los cuales usualmente requieren una alta trabajabilidad para su puesta en obra. Este aspecto puede compensarse incrementando el contenido de pasta y/o la fluidez de la misma.

- Las observaciones de la distribución de las fibras realizadas sobre los cortes practicados en las probetas confirman la existencia de una ligera segregación de las fibras en el caso de la compactación mediante mesa vibrante, así como una orientación preferente de las fibras en planos perpendiculares a la dirección de hormigonado. Estos efectos son de menor incidencia en los casos de compactación interna mediante aguja vibrante o barra metálica. Sin embargo, la vibración interna conduce a una distribución no homogénea de las fibras.
- Los ensayos de flexión realizados sobre probetas compactadas según distintos procedimientos ponen de manifiesto que la carga pico obtenida en el caso de compactación mediante mesa vibrante es superior a las correspondientes a las probetas fabricadas mediante compactación interna (aguja vibrante, barra metálica). No obstante, la capacidad de carga en el régimen postpico en los casos de compactación por mesa vibrante y barra metálica es similar, y mayor que la correspondiente a las probetas compactadas por aguja vibrante. Estas diferencias pueden atribuirse a la influencia del método de compactación sobre la homogeneidad del hormigón con fibras.

6.3.- CONCLUSIONES RELATIVAS A LA EVALUACIÓN DE LA TENACIDAD

- La utilización de prensas servohidráulicas controladas por lazo cerrado conduce a ensayos más estables y la obtención de resultados experimentales más fiables. Asimismo, la reducción de la velocidad de aplicación de carga resulta favorable para la estabilidad del ensayo.
- Los resultados de los ensayos realizados sobre probetas giradas y no giradas respecto a la dirección de hormigonado ponen de manifiesto una mayor carga pico para el caso de probetas no giradas. Sin embargo, es recomendable girar la probeta dado que se obtiene una respuesta más representativa del comportamiento del material, al no sobre-estimarse dicho comportamiento debido a una orientación preferente de las fibras. Asimismo, en el caso de la probeta girada se utilizan las caras encofradas para aplicación de la carga, lo cual supone una mayor facilidad de operación en la realización del ensayo.
- La medida de la flecha debe realizarse refiriéndose a la propia probeta. Ello obliga a utilizar algún sistema de sujeción del sensor de desplazamiento, como un marco rígido, unido a la probeta sobre los apoyos.
- La flecha central determinada en el ensayo de carga a tercios no tiene una relación directa con los desplazamientos correspondientes a los puntos de aplicación de la carga; ello implica que el área bajo la curva carga-flecha del punto central no es la representativa de la energía disipada por la probeta.
- La fisuración observada en los ensayos bajo carga a tercios y carga central (sobre probetas sin entalla) no pone de manifiesto diferencias significativas en cuanto a la localización del inicio de la fisura. Asimismo, en ambos casos la fisuración secundaria aumenta con el contenido de fibras.

- La carga de pico constituye una referencia más objetiva que la carga de primera fisura para evaluar tanto la resistencia de la matriz, como otros parámetros indicadores de la tenacidad.
- Los parámetros de tenacidad definidos únicamente por un área encerrada por la curva carga-flecha son más sensibles al contenido de fibras en el hormigón. Sin embargo, no son apropiadas para comparar hormigones de distintas resistencias.
- Los índices de tenacidad definidos en términos de límites de flecha pequeños no son suficientemente sensibles al tipo y contenido de fibras.
- La resistencia a flexotracción equivalente constituye un parámetro que permite representar adecuadamente la tenacidad del hormigón con fibras en términos de un concepto usual en el análisis estructural.
- Los ensayos realizados mediante la configuración de carga central se han mostrado más estables que los realizados mediante carga a tercios.
- Los parámetros de tenacidad evaluados con los resultados obtenidos en los ensayos con carga central muestran las mismas tendencias que los correspondientes obtenidos mediante la configuración de carga a tercios.
- Para el caso de ensayos a carga central sobre probetas entalladas, el sistema de control adoptado ha proporcionado una respuesta estable en todos los casos estudiados.
- La extrapolación al caso de la probeta entallada de las definiciones de los parámetros de tenacidad que se adoptan para el caso de la probeta sin entalla ha proporcionado unos resultados con tendencias similares.
- Los resultados obtenidos de los ensayos sobre los hormigones de alta resistencia muestran que la incorporación de fibras de alto contenido en carbono, en las dosificaciones estudiadas, disminuye significativamente la fragilidad del material.

ANEJO 1

FUNDAMENTOS DE LA UTILIZACIÓN DE PRENSAS SERVOHIDRÁULICAS

A1.1- INTRODUCCIÓN

La utilización de prensas servohidráulicas controladas por lazo cerrado, en las cuales se retroalimenta las mediciones en el ensayo al controlador electrónico, ha supuesto un avance significativo en los estudios experimentales sobre el comportamiento mecánico de hormigones y rocas. Gracias a estos sistemas de ensayo se ha conseguido caracterizar la respuesta del material o estructura durante la rotura proporcionando información clave para el diseño basado en estados límites últimos, y realizar ensayos donde se controlan directamente las deformaciones, fisuración y otras características físicas del comportamiento. En el presente anejo, se reseña los fundamentos del control por lazo cerrado y se muestra sus ventajas mediante una discusión de varios tipos de ensayos sobre hormigón.

El control por lazo cerrado (*closed-loop control*, en inglés) de un sistema se puede definir como el proceso mediante el cual se obtiene de forma continua una respuesta deseada modificando adecuadamente sus señales de entrada (Gettu et al., 1996). Como se puede ver en reseñas históricas de este tema (Franklin et al., 1991; Fraile y García, 1987), se ha empleado este proceso inicialmente, en Europa (siglo XVII), en el desarrollo de métodos para controlar la temperatura, la presión y la velocidad de rotación de ejes de maquinaria y progresivamente en sistemas mecánicos con distintos grados de complejidad. Sin embargo, el interés científico

por los sistemas de control comienza con el invento de la máquina de vapor por Watt en 1788, partiendo del estudio de la inestabilidad y otros problemas asociados con el control por lazo cerrado (CLC). Otro hito en este campo es el trabajo de Maxwell en 1868, titulado "*On Governors*", quien inició el estudio matemático de las teorías de control. Por otra parte, la ciencia moderna de sistemas de control automático se ha desarrollado principalmente a partir de las investigaciones que comenzaron en los Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial. Actualmente, aplicaciones de CLC se pueden encontrar en aviones, naves espaciales, cohetes, máquinas con control numérico (tornos, pulidores), procesos industriales y estructuras con control activo.

En un estudio sobre sistemas de ensayo modernos, Hudson et al. (1972) atribuyen el primer uso de CLC en una máquina de ensayo a Bernhard en 1940. Su prensa podía controlar la carga, la velocidad de aplicación de carga, el desplazamiento y la velocidad de desplazamiento. Los principios básicos de una prensa con CLC siguen siendo los mismos, pero los componentes han mejorado considerablemente con el paso de los años. Estas modificaciones también han conducido a un aumento en el uso de CLC en los ensayos de materiales cuasi-frágiles, tales como las rocas y el hormigón, cuya rotura es generalmente inestable y brusca. Uno de los primeros ensayos sobre este tipo de materiales fue realizado en la Universidad de Minnesota (EE.UU.) en los años setenta sobre rocas. Al parecer, la primera aplicación de CLC en el estudio del comportamiento del hormigón fue realizada por Swartz en 1978, en la cual se controló directamente la apertura de la fisura en unas vigas sometidas a flexotracción con el objetivo de obtener una propagación estable de la fisura.

En el presente trabajo, se revisan en detalle los sistemas de control utilizados en las máquinas servohidráulicas empleadas en ensayos sobre materiales, elementos estructurales y la propia estructura, y se presentan diversas aplicaciones relacionadas con el estudio del comportamiento mecánico del hormigón.

A1.2.- SISTEMAS DE CONTROL

Se puede definir un sistema como un grupo de elementos que interactúan, cualquiera de los cuales puede afectar la respuesta del conjunto y de los otros elementos. Las entradas al sistema son las señales transferidas desde el entorno y las salidas son aquellas que pasan del sistema a su entorno. Las máquinas de ensayo se pueden considerar como sistemas, cuyos componentes son el actuador, el marco de ensayo, el controlador, los transductores y el elemento de ensayo. Las señales de entrada son las funciones de carga, tales como las velocidades de aplicación de carga y las ondas definidas por el usuario, mientras que las salidas son los datos obtenidos del ensayo. La bondad del sistema de ensayo se refleja en su capacidad para responder a un amplio rango de entradas. Esto depende principalmente del controlador y del modo en que los actuadores están controlados, lo que se denomina comúnmente como "el control".

En general, el control puede ser clasificado como lazo abierto o lazo cerrado, donde el lazo significa la retroalimentación de las señales de salida del sistema en el proceso de control. En el control por lazo abierto, el controlador no utiliza la salida y el proceso depende únicamente de la señal de entrada al sistema (ver figura A1.1-a). Las variables que se pueden

controlar en este tipo de sistemas generalmente son el desplazamiento del actuador y la carga aplicada (o presión). En el control por lazo cerrado, la señal de salida de la variable controlada es adquirida directamente por el controlador (ver Figura A1.1-b) y utilizada para modificar adecuadamente la señal de entrada. Por lo tanto, la variable empleada para controlar el ensayo, o la variable de control, puede ser cualquier parámetro al cual el controlador pueda acceder, tales como carga, desplazamiento, deformación de la probeta y apertura de fisura. Estos sistemas son parecidos a los controladores de aeronaves, pilotos automáticos de barcos y aviones, entre otros. El CLC también se ha aplicado en el control activo de estructuras (Leipholz y Abdel, 1986), donde el proceso es similar a los sistemas de ensayo.

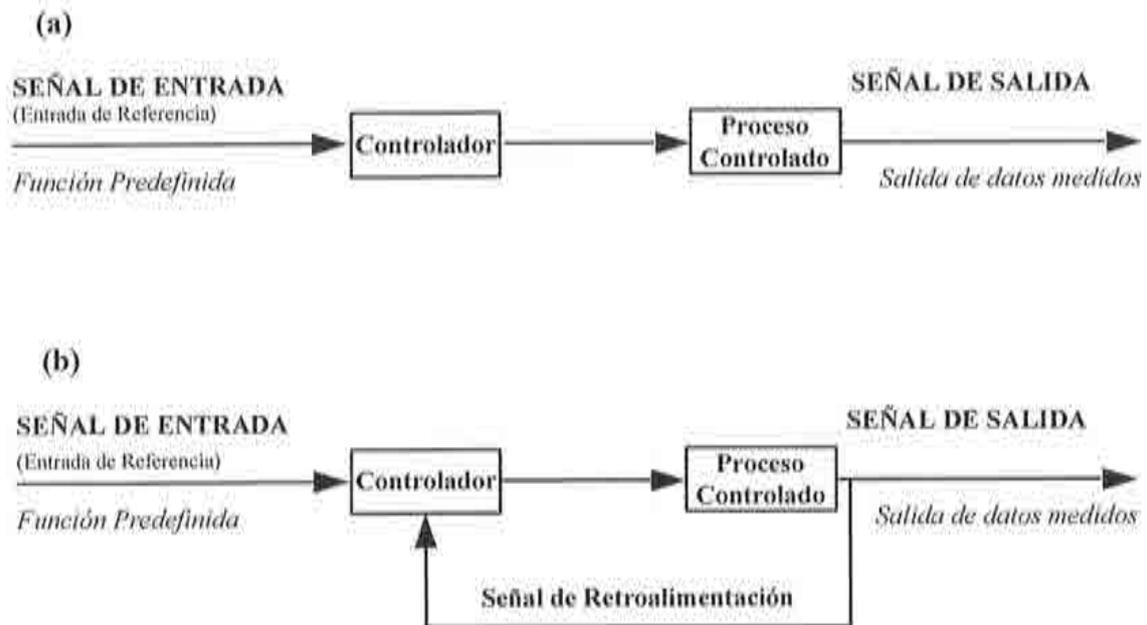


Fig. A1.1- (a) Control por lazo abierto. (b) Control por lazo cerrado

En sistemas controlados por lazo cerrado, como se muestra esquemáticamente en la Figura A1.1-b, se retroalimenta el valor real de la variable controlada al controlador y se lo compara con la señal de entrada de referencia. Se emplea la diferencia entre las dos señales, o sea el error, para manipular el actuador. Las señales de entrada (de referencia) se proporcionan a través de un generador de funciones, y la señal de retroalimentación es normalmente la salida de algún transductor.

Se ve claramente que el alcance de ensayos en sistemas con CLC es mucho mayor que los realizados en sistemas con control por lazo abierto debido a un rango más amplio de variables que se pueden controlar. Además, para una misma variable, por ejemplo el desplazamiento del actuador, se obtiene una respuesta más precisa con el CLC que con control por lazo abierto. Sin embargo, el uso de CLC tiene algunos inconvenientes, aparte de un alto coste inicial, requiriendo usuarios con mayor experiencia ya que una manipulación inadecuada puede hacer que el sistema sea inestable y oscilatorio.

El CLC es más útil cuando hay un cambio rápido e impredecible en las entradas al sistema o en el comportamiento de la probeta. Por lo tanto, la respuesta transitoria del sistema

en el dominio de tiempo es importante. Normalmente se evalúa esta respuesta imponiendo una señal de entrada cuadrada, obteniendo una respuesta descrita por los parámetros que se muestran en la figura A1.2. Todos esos parámetros están correlacionados y deben ser optimizados para mejorar el comportamiento transitorio. Por otra parte, el rendimiento del sistema bajo condiciones cíclicas y dinámicas está caracterizado por la respuesta en el dominio de la frecuencia, que se caracteriza principalmente por la frecuencia máxima que el sistema puede sostener y por el desfase entre las señales de entrada y salida. Adicionalmente, en controladores digitales, las frecuencias de muestreo (o sea, la velocidad de muestreo de la señal de salida) y de cierre del lazo (es decir, la velocidad de actualización de la señal de control) pueden influir el rendimiento del sistema.

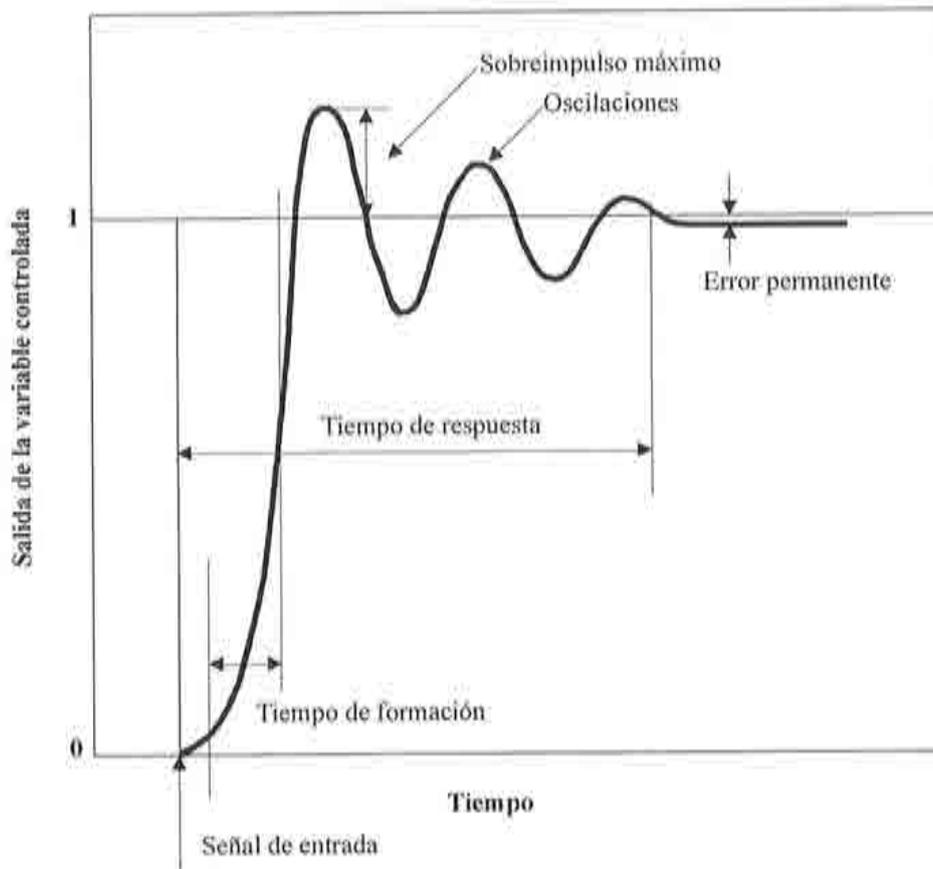


Fig. A1.2- Parámetros que caracterizan la respuesta del sistema

A1.3- MÁQUINAS DE ENSAYO SERVOHIDRÁULICAS

A1.3.1.- La parte electrónica

La figura A1.3 representa la configuración de un sistema de ensayo típico y sus componentes básicos. El primer componente que se activa en un ensayo es el generador de funciones que produce la entrada de referencia predefinida por el usuario y se la transfiere al controlador. El controlador tiene, además, acceso continuo a la señal de salida de la variable

de control y utiliza estas dos señales para generar la señal de control que gobierna la servoválvula.

El controlador puede ser de dos tipos básicos: analógico, en el que, teóricamente, el lazo siempre está cerrado, o digital, donde el lazo se cierra del orden de una a cinco mil veces por segundo correspondiendo al muestreo de los datos. Al parecer, esta velocidad de cierre del lazo es suficiente para realizar ensayos estables en materiales frágiles como rocas y hormigón (Hudson et al., 1972). Se debe notar que, incluso cuando el controlador es digital, se usan algunos componentes analógicos en el sistema, tales como los transductores. El controlador electrónico debe ser diseñado para que los ruidos generados por las variaciones aleatorias de las señales en los distintos componentes no afecten su funcionamiento (MTS, 1988), y en general, se debe mantener el ruido menor que un 0.25% del rango total de los transductores.

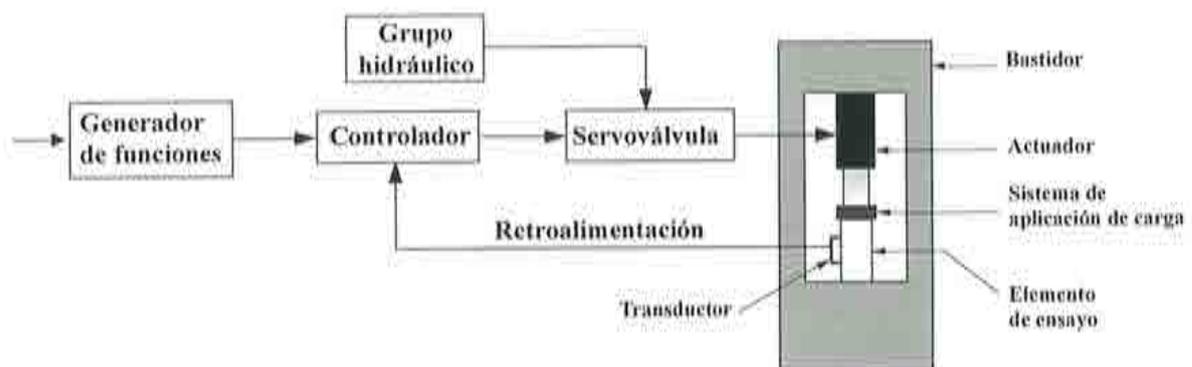


Fig. A1.3- Configuración típica de un sistema de ensayo servohidráulico

Otro aspecto importante es la medición de la variable controlada. Para controlar el ensayo se elige alguna característica del comportamiento de la probeta que puede ser una de las siguientes: la carga, el desplazamiento, la deformación, o la velocidad o la aceleración. Normalmente, se registra la señal de salida de la variable controlada con un transductor que esté en contacto con la probeta o el actuador. Recientemente, para registrar la variable controlada, se han utilizado transductores que no están en contacto con la probeta; por ejemplo, se ha medido el desplazamiento mediante la proyección de rayos láser (Pastor et al., 1995; Winslow, 1994). Otras alternativas incluyen el uso de la velocidad de emisiones acústicas de la probeta como variable de control (Terada et al., 1984). Por otra parte, la variable controlada puede ser una combinación de distintas medidas, tales como las funciones lineales de carga y desplazamiento axial utilizadas por Okubo y Nishimatsu (1985), o Rokugo et al. (1986) para controlar ensayos de compresión.

A1.3.2.- La parte hidráulica

La capacidad de un sistema de ensayos para responder exactamente al controlador depende de las características de las servoválvulas. El rendimiento de la válvula, para cada combinación de la señal de entrada y tipo de actuador, depende de la velocidad máxima del flujo, la cual generalmente está en el rango de 5 a 1500 litros por minuto. En los sistemas dinámicos, se emplean válvulas más grandes debido a que el desplazamiento rápido del

actuador requiere un mayor flujo de aceite. Las servoválvulas más pequeñas son más sensibles y estables, y se utilizan en sistemas estáticos, donde controlan más bien la presión del aceite que su flujo (Albright et al., 1990). La capacidad de la bomba se elige para producir un flujo suficiente en la válvula durante la operación normal. Las demandas repentinas por mayor volumen, originados por movimientos bruscos del actuador, se compensan normalmente con acumuladores tipo membrana cargados con nitrógeno. Con el uso de servoválvulas de alto flujo estos acumuladores deben situarse cerca del actuador para obtener un suministro de presión hidráulica estable y sin ruidos (Bezaf, 1986).

A1.3.3.- La parte mecánica

La configuración mecánica del sistema es importante para obtener un buen rendimiento de la prensa. El bastidor o pórtico de carga se debe diseñar con el mínimo de uniones y componentes móviles, y la rigidez del sistema debería ser lo más alto posible para garantizar la máxima estabilidad durante el ensayo. Además, una mayor rigidez permite la aplicación de carga con el desplazamiento mínimo de actuador y en menos tiempo. La rigidez esta influida por todos los componentes incluyendo el actuador, el bastidor de la prensa, la célula de carga, la columna de aceite, algunas piezas del sistema hidráulico y el sistema de aplicación de carga. La presión del aceite también tiene un efecto debido a que una presión baja conduce a menores deformaciones de la columna de aceite y a una mayor rigidez total (Gettu et al., 1996).

A1.4.- APLICACIÓN DE CLC EN ENSAYOS DE HORMIGÓN

Los procedimientos experimentales para la caracterización de las propiedades del hormigón han evolucionado considerablemente en alcance y precisión desde los años 1970. Una de las razones que ha originado esta tendencia ha sido el desarrollo de nuevos compuestos con base de cemento, tales como el hormigón de alta resistencia y hormigones reforzados con fibras, que requieren procedimientos de ensayo más versátiles. Por otra parte, los avances en la informática han permitido el desarrollo de prensas controladas por sistemas electrónicos, y la formulación de sofisticados modelos matemáticos y técnicas numéricas de análisis que frecuentemente requieren complejos ensayos para su calibración y verificación.

Para cualquier tipo de ensayo, se puede alcanzar el mejor rendimiento del sistema únicamente con un conocimiento completo de la máquina de ensayo. Además, se deben utilizar las variables de control y configuración adecuadas. Las opciones de variables de control más frecuentes son el desplazamiento del actuador, la carga, la deformación de la probeta o alguna combinación de ellas. Para garantizar un control estable del ensayo, la variable controlada debe ser un parámetro sensible a la rotura de la probeta, en otras palabras, la variable debe aumentar monótonamente en la medida que se va desarrollando el ensayo (Gettu et al., 1996).

En este apartado se presenta la aplicación del CLC al estudio de unos aspectos del comportamiento del hormigón, relevantes al presente trabajo. Se presentan en detalle unas aplicaciones de CLC realizadas en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras (UPC,

Barcelona) para la determinación del comportamiento post-rotura a compresión uniaxial, la caracterización del ablandamiento y la tenacidad con el ensayo de tracción indirecta, y la caracterización del comportamiento bajo flexotracción de vigas sin y con entallas. Además, se reseñan unas recientes aplicaciones de CLC en estudios experimentales sobre estructuras existentes y componentes estructurales.

A1.4.1.- Ensayo de compresión

El ensayo de compresión uniaxial es probablemente el método más común para caracterizar el hormigón. A pesar de que se lo utiliza convencionalmente para obtener solamente la tensión máxima (o resistencia) y módulo de deformación, se puede extender el ensayo al régimen post-pico. Consecuentemente, se puede determinar la completa relación tensión-deformación a compresión. Esto ha permitido identificar un fenómeno conocido como ablandamiento (*strain-softening*, en inglés), que consiste en la disminución gradual de la tensión con aumento de la deformación. Sin embargo, la interpretación de las curvas tensión-deformación obtenidas de este modo no es obvia debido a que la parte post-pico de la curva está influida significativamente por la geometría de la probeta y la configuración del ensayo. Además, la deformación post-pico no es homogénea ya que el daño se localiza dentro de una zona. Estos aspectos mantienen el interés científico en el tema de la caracterización de la respuesta completa del hormigón bajo compresión.

Al observar la curva carga-desplazamiento, se pueden distinguir dos clases de comportamiento en el régimen post-pico, uno en el cual hay un aumento continuo del desplazamiento axial (Clase I en la figura A1.4) y otro con un *snap-back*, el cual es la disminución del desplazamiento en la rama descendente de la curva (Clase II en figura A1.4).

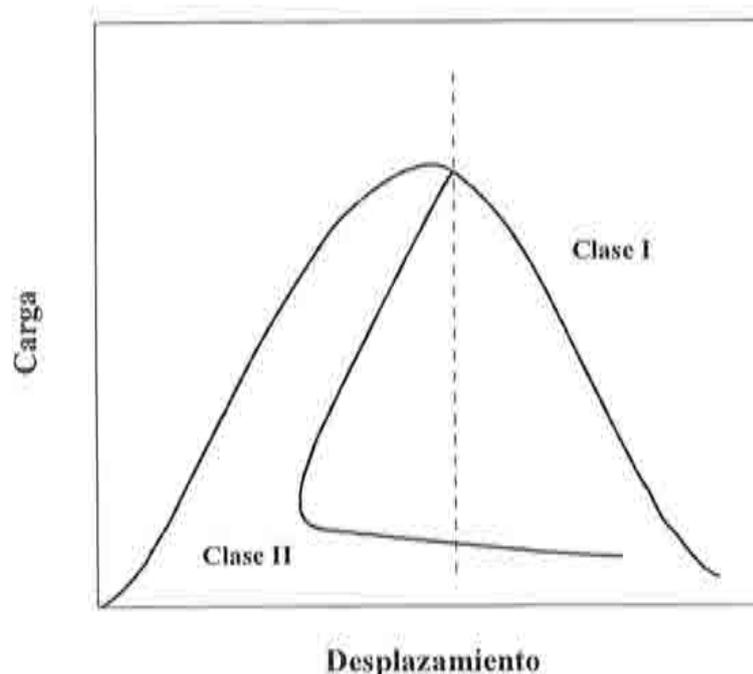


Fig. A1.4 - Clasificación de la respuesta post-pico

La configuración del ensayo necesaria para obtener la respuesta post-pico en compresión depende de la clase de comportamiento. Como se puede ver en la figura A1.2 anteriormente presentada, no tiene sentido utilizar el control de carga en ningún caso, debido a que ello no permite la disminución de la carga después del pico. Por lo tanto, las opciones disponibles para la variable de control son: el desplazamiento del actuador, los desplazamientos axiales y transversales (o dilatación) de la probeta, y sus combinaciones. En el caso del comportamiento Clase I, la respuesta post-pico se puede determinar controlando el desplazamiento de actuador. Sin embargo, se requiere una prensa con rigidez suficientemente alta, de modo que garantice que la energía liberada por la máquina sea menor que la consumida por la probeta durante deformación. Otra alternativa para mantener la estabilidad es garantizar que el sistema nunca descargue. Esta técnica fue utilizada durante las décadas de los 1960 y 1970 para obtener la respuesta post-pico en compresión, aplicando carga a la probeta en paralelo con barras o tubos de acero (Grimer y Hewitt, 1971; Wang et al., 1979).

En sistemas servohidráulicos, se puede obtener la respuesta post-pico de la Clase I utilizando el desplazamiento axial de la probeta como la variable de control. Se puede medir esto entre los platos de carga o directamente sobre la probeta. Cuando la respuesta post-pico demuestra un comportamiento Clase II, la variable de control debería ser un desplazamiento más sensible a la evolución del daño que el desplazamiento axial. Entre las posibles variables de control se incluyen la deformación transversal o circunferencial, y las combinaciones de carga y desplazamiento que aumentan monótonamente durante el ensayo (Gettu et al., 1996 y 1998; Okubo y Nishimatsu, 1985; Rokugo et al., 1986; Bezat, 1986; Shah et al., 1981; Jansen et al., 1996; Dahl y Brinker, 1989; Glavind y Stang, 1991).

En los primeros ensayos realizados en la UPC para obtener el comportamiento post-pico del hormigón bajo compresión uniaxial, se utilizó (Carmona, 1997) una prensa servohidráulica con capacidad de 4,5 MN, controlada por un sistema analógico de lazo cerrado (MTS 458). La variable de control fue la deformación circunferencial medida utilizando una cadena con rodillos que se dispone alrededor de la probeta y entre sus extremos se monta un extensómetro. Además, se registró la carga aplicada y desplazamiento de la probeta entre los platos de carga para determinar la curva carga-desplazamiento.

En la figura A1.5, se presentan las curvas obtenidas para dos hormigones. Se observa que la deformación circunferencial es creciente durante todo el ensayo y, al contrario, la deformación axial de la probeta presenta *snap-back* justo después del pico. Por lo tanto, se puede concluir que el control por deformación axial puede ser inadecuado y originar roturas bruscas. Al comparar las dos curvas de la figura A1.5, se puede ver que el aumento de resistencia conduce a un cambio en el comportamiento observado, desde uno de Clase I para el hormigón de resistencia normal (denominado C-3) hacia el Clase II en el hormigón de alta resistencia (denominado C-4). Esta tendencia también ha sido observada por otros investigadores (Jansen et al., 1996; Gettu et al., 1998).

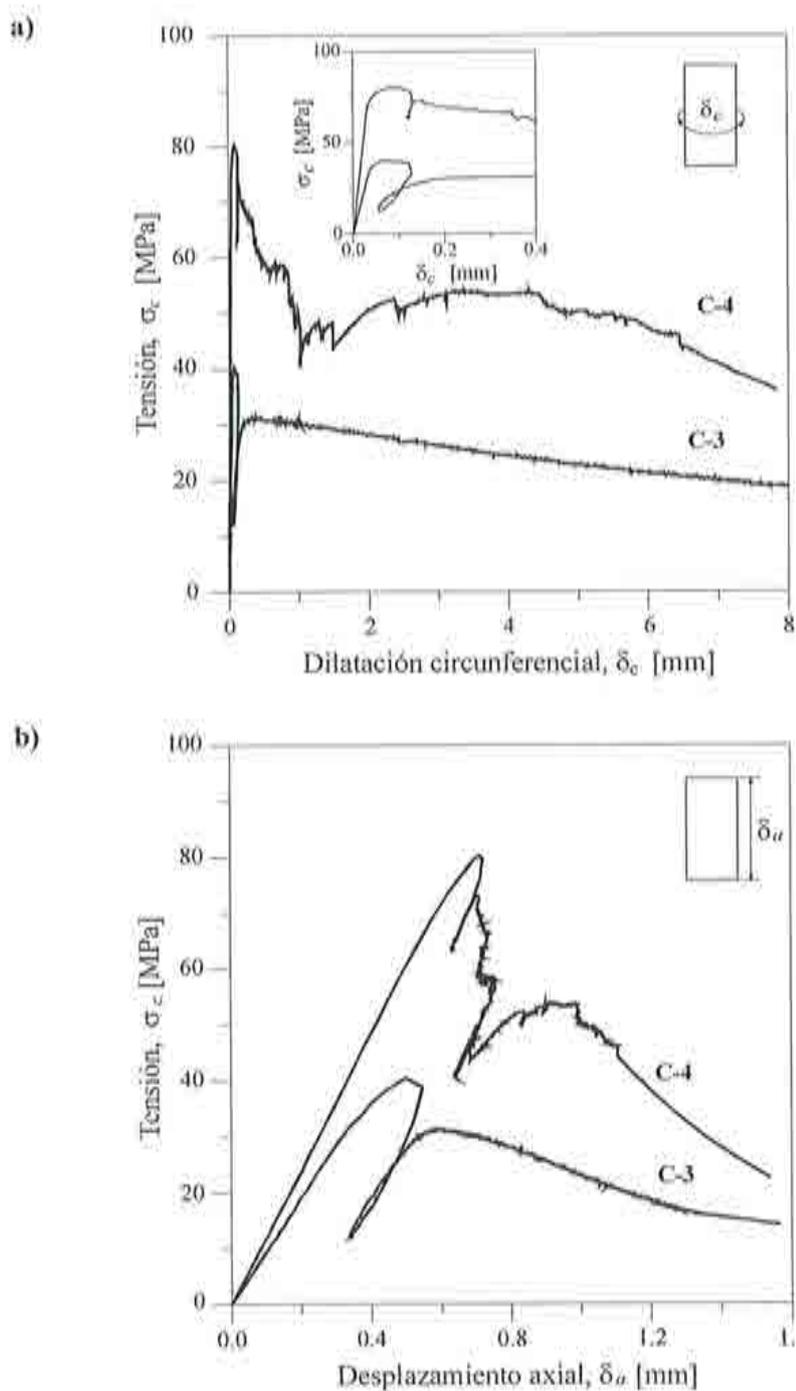


Fig. A1.5.- Resultados de ensayos a compresión uniaxial. (a) Curvas tensión-desplazamiento circunferencial, (b) Curvas tensión-desplazamiento axial

A1.4.2. Ensayos de tracción

Tracción directa

La respuesta completa del hormigón sometido a tracción uniaxial se obtuvo por primera vez en los años 1960 utilizando un control pasivo del régimen post-pico del ensayo, es decir aplicando carga a la probeta en paralelo a barras de acero (Evans y Marathe, 1968). Pero esta manera de controlar el ensayo no siempre conduce a resultados precisos (Li et al., 1993), y es preferible emplear prensas servohidráulicas con CLC. En las tendencias más actuales en los ensayos a tracción indirecta, reseñadas en otros trabajos (Gettu et al., 1996), tratan principalmente de controlar la deformación de una prisma con una reducida sección central para localizar la fisuración y controlar el ensayo con la deformación de esta zona como variable de control (Wecharatana, 1990). También, se han realizado ensayos donde se evita inestabilidades debidas a fisuración asimétrica mediante cambios apropiados en la variable de control (Li et al., 1993), y donde se eliminan los efectos secundarios de flexión utilizando tres actuadores independientes (Carpinteri y Maradei, 1995).

Tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta o ensayo brasileño es el método más común para caracterizar la resistencia a tracción del hormigón debido a que el cilindro es una probeta estandarizada y que el procedimiento es sencillo, consistiendo en someter la probeta a una compresión diametral. El ensayo se realiza normalmente con control de carga y se termina cuando se alcanza la carga máxima, de la cual se utiliza para calcular la tensión máxima de tracción o la resistencia a tracción.

Con el objetivo de prolongar este ensayo al régimen post-pico y caracterizar mejor el comportamiento del hormigón a tracción, se ha desarrollado recientemente una metodología (Carmona, 1997), en la cual se utiliza una prensa servohidráulica con CLC. La longitud de la probeta cilíndrica (con diámetro de 150 mm) se limita a un valor comprendido entre tres y cinco veces el tamaño máximo del árido o la longitud de las fibras utilizadas. Con ello se pretende reducir asimetrías durante el proceso de iniciación y propagación de las fisuras con el incremento de carga manteniendo un volumen representativo y minimizando el efecto pared.

También, se ha modificado ligeramente la configuración del ensayo para evitar el aumento de la superficie de contacto en el régimen post-fisuración, colocando dos barras de acero de 25 mm de ancho entre los platos de carga y la probeta, tal como se ilustra en la figura A1.6. Al igual que en el ensayo convencional, se utilizan láminas de cartón o madera para acomodar las barras de carga a las irregularidades superficiales.

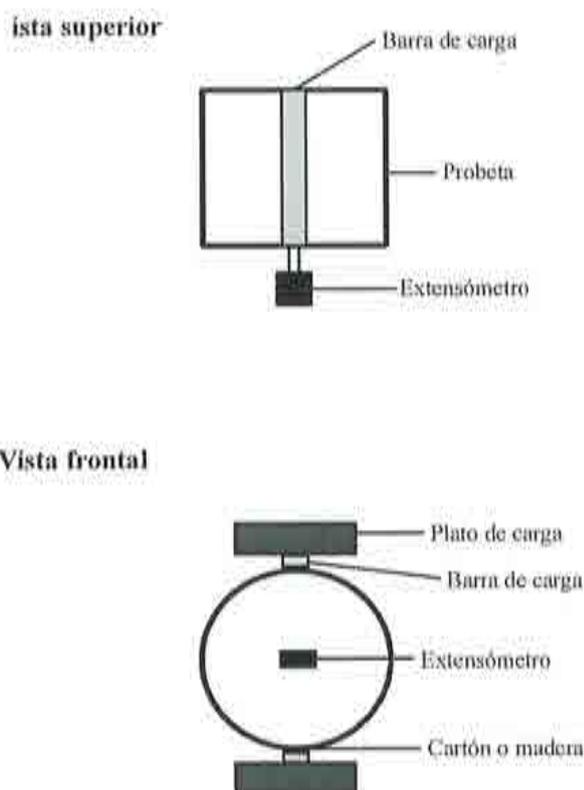


Fig. A1.6.- Configuración del ensayo de tracción indirecta

En este ensayo, la apertura de la fisura es la deformación más crítica de la probeta y, por lo tanto, se puede obtener una respuesta post-pico estable utilizando esta deformación como variable de control. El extensómetro que mide la apertura de la fisura en el plano de carga se coloca preferiblemente en el centro, tal como se visualiza en la figura A1.6 anteriormente presentada. Para asegurar que la fisuración ocurra dentro de la base de medición del extensómetro, ésta longitud debe ser mayor que el tamaño máximo del árido si bien, debe ser la menor posible, para maximizar la sensibilidad del parámetro de control. La deformación medida por el extensómetro se toma como la apertura de la fisura (COD).

Una de las aplicaciones de este método ha sido en el estudio de la tenacidad de hormigones de alta resistencia reforzados con fibras. Los ensayos se realizaron en una prensa servohidráulica con control adaptativo (INSTRON 8505 Plus). En el centro de una de las caras de las probetas y perpendicularmente a la línea de aplicación de carga, se colocó un extensómetro tipo clip (de ± 2 mm); el mismo se fijó entre dos cuchillas de acero pegadas a una distancia de 65 mm. La deformación medida por este extensómetro se utilizó como variable de control.

Se ensayaron tres tipos de hormigones: el patrón sin fibras (HSC-0.0), con 0.5 y 1.0% de fibras de acero (HSC-0.5 y HSC-1.0, respectivamente). Las fibras de acero incorporadas eran del tipo DRAMIX ZC 30/50 (de 30 mm de largo, 0.5 mm de diámetro, resistencia a tracción de 2000 MPa). Como probetas de ensayo se utilizaron discos de 150 mm de diámetro y 100 mm de espesor obtenidos a partir de corte de cilindros de 150×300 mm, descartando los

extremos de los cilindros para evitar efectos de pared. Las curvas carga-COD obtenidas en los ensayos se presentan en la figura A1.7, donde se puede observar una respuesta estable tanto en el régimen pre- como post-pico de los tres hormigones. De las curvas, se aprecia claramente el efecto que produce la incorporación de fibras en el régimen post-fisuración. A partir de una disminución de la carga justo después del primer pico, los dos tipos de hormigones con fibras presentan un comportamiento tipo endurecimiento (*hardening*). A una COD de 400 μm , la capacidad de carga de los HSC-0.0 se ha reducido en un 50% del máximo, mientras los HSC-0.5 soportan casi el 100% y los HSC-1.0 cerca del 180% de la carga correspondiente al primer pico. Los dos hormigones con fibras alcanzan un segundo pico a una COD cercana a 500 μm , más de 50 veces la COD del primer pico y de la carga máxima del hormigón sin fibras (HSC-0.0).

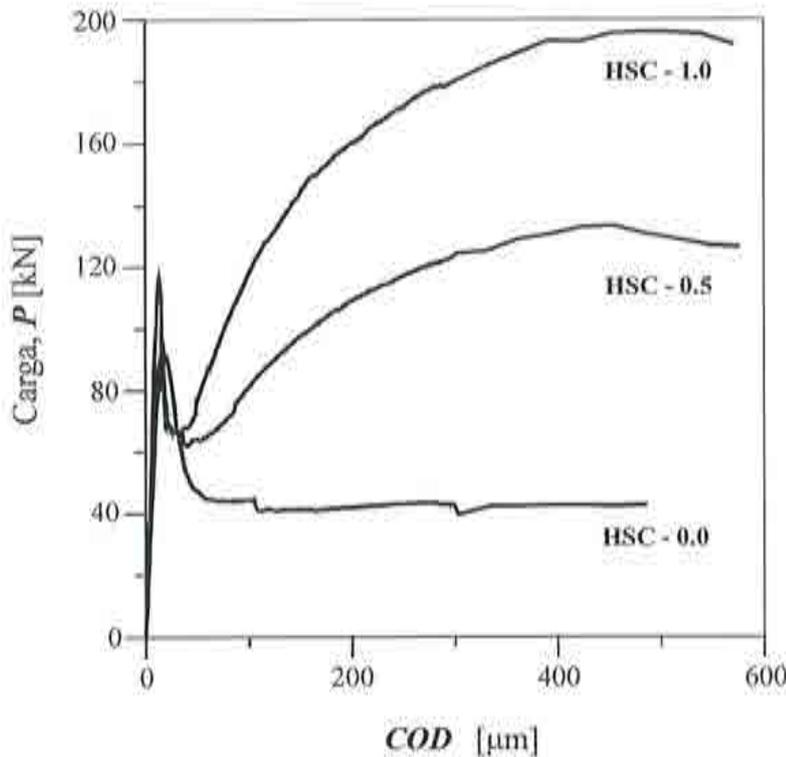


Fig. A1.7.- Resultados obtenidos en ensayos de tracción indirecta

A1.4.3.- Ensayos de flexotracción

En el presente sub-apartado se discuten dos tipos de ensayos basados en CLC: ensayos sobre vigas a flexotracción, y ensayos de fractura realizados con vigas con entallas o fisuras iniciales donde el comportamiento está regido exclusivamente por la fisuración.

En los ensayos de fractura, la deformación se localiza en la punta de la entalla y, con la propagación de la fisura, en una zona alrededor de la fisura. Debido a que la deformación más importante es de la propia fisura, la mejor variable para controlar el ensayo de fractura es la apertura de la fisura o un desplazamiento similar (Gettu et al., 1996; Swartz et al., 1978).

El control de una viga sin entalla es generalmente más difícil que el correspondiente a una viga con entalla. En ese caso, debido a la ausencia de la entalla no se limita la fisuración a una zona pequeña. Por lo tanto, la base de medida de la deformación utilizada como variable de control debe ser amplia para captarla. Sin embargo, esta base debe ser la mínima necesaria para evitar la disminución de la sensibilidad debido a la descarga de tensiones que ocurre en la zona no fisurada a partir del desarrollo de la fisura principal. La base de medida del extensómetro tipo clip (de ± 2 mm) era igual a 65 mm y la salida suya (la apertura de fisura, CMOD) fue utilizada como variable de control. Los ensayos fueron realizados (Carmona, 1997) en una prensa INSTRON 8505 Plus con control adaptativo. Las curvas que se muestran en la figura A1.8 pertenecen a vigas de dos hormigones, denominados C-1 y C-2, con dimensiones de 100×100×400 mm (longitud = 480 mm) cargadas en el centro. En estas curvas se observa un comportamiento estable debido a que la apertura de fisura es siempre creciente sin en *snap-back* demostrado por la curva de carga-flecha en el caso de C-2 y la curva de carga-desplazamiento del actuador en los dos casos.

A1.4.4.- Otros tipos de ensayos

Existen varios otros tipos de ensayos en los cuales la utilización de prensas con CLC es beneficiosa. Por ejemplo, la aplicación de cargas cíclicas en un sistema servohidráulico permite la determinación de las respuestas del material y estructura para un amplio rango de historias y frecuencias. Las funciones de la carga aplicada pueden ser ondas de distintos tipos, incluyendo historias registradas en estructuras reales y señales aleatorias.

Otra clase de aplicaciones es la determinación de la relajación de carga para estudiar los mecanismos de fluencia que sería complicada sin el CLC. En prensas servohidráulicas, se puede mantener prácticamente cualquier deformación o desplazamiento constante y determinar la evolución de la carga en tiempo. Igualmente, se puede mantener la carga constante para determinar la evolución de las deformaciones en ensayos de fluencia, que es de interés especial para el rango no lineal cuando la evolución de la deformación es rápida.

A1.5.- ENSAYOS ESTRUCTURALES

La evaluación experimental del comportamiento de elementos y sistemas estructurales es compleja, y depende del tipo de estructura y los datos requeridos. En este campo, la utilización de actuadores servohidráulicos se ha incrementado significativamente durante los últimos años y sigue una tendencia creciente. Recientemente, se han realizado ensayos a escala real de componentes de puentes y edificios en la Universidad de California en San Diego (EE.UU.), en los cuales se aplicaron cargas monótonas y cíclicas mediante actuadores servohidráulicos (Seible, 1995). En uno de los programas experimentales se simuló cargas sísmicas sobre un modelo 1:2 del viaducto de dos niveles de San Francisco con 14 actuadores y sobre un edificio de mampostería armada de 5 plantas con 10 actuadores. Las acciones sísmicas impuestas fueron las registradas durante terremotos reales.

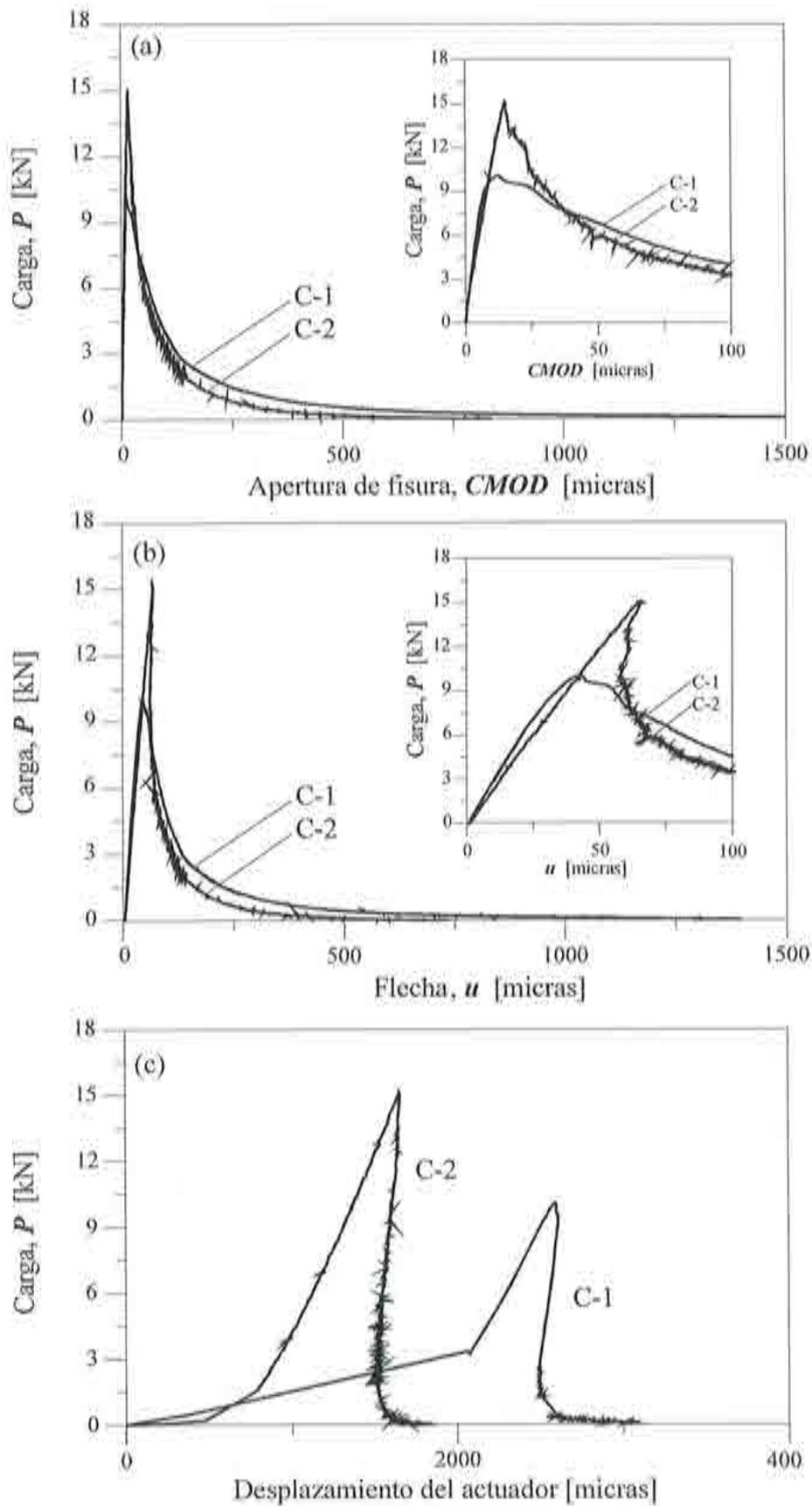


Fig. A1.8.- Resultados de ensayos de flexión sobre probetas sin entalla

En el análisis modal experimental no destructivo para determinar las funciones de respuestas en frecuencias de estructuras reales, investigadores de la Universidad de Cincinnati (EE.UU.) han utilizado un actuador servohidráulico con PLC para aplicar excitaciones de hasta 14 kN de carga y aceleraciones de 0.003 g. En uno de los estudios aplicaron este método para simular las condiciones de viento y acciones sísmicas sobre un edificio de hormigón armado de 27 plantas (Somaprasad et al., 1991). En otras aplicaciones similares, los Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA) han utilizado generadores servohidráulicos de vibraciones para la excitación controlada de puentes con luces de hasta 100 m (Eggimann et al., 1995; Cantieni et al., 1994).

A1.6.- CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones presentan los factores más relevantes en relación con la utilización de prensas servohidráulicas con control por lazo cerrado:

- El conocimiento completo de las capacidades, funciones y limitaciones de los distintos componentes de los sistemas servohidráulicos es esencial para el diseño de procedimientos experimentales en los cuales se emplean este tipo de equipos.
- La utilización de PLC aumenta significativamente el alcance de las máquinas de ensayo y su precisión. Además, se facilita al usuario la capacidad de poder emplear cualquier aspecto cuantificable de la respuesta como variable de control. Esto ha conducido al desarrollo de innovadores procedimientos experimentales para el estudio del comportamiento del hormigón. Con los avances en los campos de la informática e instrumentación, los sistemas de ensayo serán previsiblemente en el futuro todavía más potentes y versátiles.
- El PLC presenta notables ventajas en el análisis experimental del material y de la estructura, especialmente cuando es necesario obtener un comportamiento estable durante rotura, aplicar cargas cíclicas y/o dinámicas, o controlar directamente las deformaciones del elemento de ensayo.

BIBLIOGRAFÍA

- ACI COMMITTEE 544 (1988)

"Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete", ACI Report 544.2R, ACI Mater. J., V. 85, Nº. 6, pp. 583-593.

- AENOR UNE 83-500-1 (1989)

"Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Clasificación y definiciones. Fibras de acero para el refuerzo de hormigones", Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España.

- AENOR UNE 83-501 (1986)

"Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Toma de muestras de hormigón fresco", Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España.

- AENOR UNE 83-502 (1988)

"Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Fabricación en laboratorio", Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España.

- AENOR UNE 83-503 (1988)

"Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Medida de docilidad por medio del cono invertido", Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España.

- AENOR UNE 83-504 (1990)

"Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Fabricación de probetas para los ensayos de laboratorio", Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España.

- AENOR UNE 83-505 (1986)

"Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Extracción y conservación de probetas testigo", Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España.

- AENOR UNE 83-506 (1986)

"Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Refrentado de probetas con mortero de azufre", Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España.

- AENOR UNE 83-507 (1986)

"Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Rotura por compresión", Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España.

- AENOR UNE 83-508 (1990)

"Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Determinación del índice de tenacidad a compresión", Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España.

- AENOR UNE 83-509 (1988)

"Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Rotura por flexotracción", Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España.

- AENOR UNE 83-510 (1989)

"Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Determinación del índice de tenacidad de resistencia a primera fisura", Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España.

- AENOR UNE 83-511 (1989)

"Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Determinación de la resistencia a cortante", Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España.

- AENOR UNE 83-512-1 (1989)

"Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Determinación del contenido de fibras de acero", Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España.

- AENOR UNE 83-514 (1992)

"Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Determinación de la resistencia al impacto", Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España.

- AENOR P 18-409 (1993)

"Béton avec fibres métalliques- Essai de Flexion", Association Française de Normalisation, Paris, France.

- ALBRIGHT, F.J., BENNIN, J., LUCAS, G., y WALLENFELT, T.(1990)
"A study of the resolution of closed loop servohydraulic materials testing systems", MTS Systems Corp., Minneapolis, EE.UU., p. 16
- ASTM C 1018 (1992)
"Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- BALAGURU, P., y RAMAKRISHNAN, V. (1988)
"Properties of Fiber Reinforced Concrete: Workability, Behavior under Long-Term Loading, and Air-Void Characteristics", ACI Mater. J., V. 85, pp. 189-196.
- BALAGURU, P., NARAHARI, R., y PATEL, M. (1992)
"Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete", ACI Mater. J., V. 89, No. 6, pp. 541-546.
- BANTHIA, N., y TROTTIER, J.-F. (1995)
"Test Methods for Flexural Toughness Characterization of Fiber Reinforced Concrete: Some concerns and a proposition", ACI Mater. J., V. 92, No. 1, pp. 48-57.
- BARR, B.I.G. y LIU, K.(1982)
"Fracture of GRC Materials", The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 4, No. 3, August, pp. 163-171.
- BARR, B.I.G., LIU, K. y DOWERS, R.C. (1982)
"A Toughness Index to Measure the Energy Absorption of Fibre Reinforced Concrete", The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 4, No. 4, November, pp. 221-227.
- BARR, B.I.G., y HASSO, E.B.D. (1985)
"A Study of Toughness Indices", Mag. Concr. Res., V. 37, No. 132, pp. 162-174.
- BARR, B., GETTU, R., AL-ORAIMI, S.K.A. y BRYARS, L.S. (1996)
"Toughness Measurement - the Need to Think Again", Cem. Concr. Composites, V. 18, pp. 281-297.
- BATSON, G.B.y EISSA, A.-B.H. (1992)
"Fracture Toughness Measurements of High Strength Steel Fiber Concrete", High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, eds. H.W.Reinhardt and A.E.Naaman, E&FN Spon, London, pp. 325-336.

- BAYASI, M.Z., y SOROUSHIAN, P. (1992)
"Effect of Steel Fiber Reinforcement on Fresh Mix Properties of Concrete", *ACI Mater. J.*, V. 89, No. 4, pp. 369-374.
- BEZAT, F.A.(1986)
"Recent developments in the application of closed loop servohydraulic control technology to post failure testing of uniaxially loaded cylindrical rock specimens", *MTS Systems Corp.*, Minneapolis, EE.UU., p. 16.
- BRYARS, L., GETTU, R., BARR, B. y ARIÑO, A. (1994-a)
"Size Effect in the Fracture of Fiber-Reinforced High-Strength Concrete", *Fracture and Damage in Quasibrittle Structures (Europe-U.S. Workshop, Prague)*, Edited by Z.P. Bazant, Z. Bittnar, M. Jirásek and J. Mazars, E & FN Spon, London, U.K., September, pp. 319-326.
- BRYARS, L., GETTU, R., BARR, B. y AGUADO, A. (1994-b)
"Influence of a Low Volume Fraction of Steel Fibers on the Fracture of Silica Fume Concrete", *Anales de Mecánica de la Fractura*, Vol. 11, March, CEIT, San Sebastián, Spain, pp. 318-325.
- CANTIENI, R., DEGER, Y. y PIETRZKO, S. (1994)
"Modal analysis of a concrete arch bridge: Linking experiment and analysis ", *Developments in short and medium span bridge engineering'94*, Canadian Society for Civil Engineering, Canadá, pp. 557-567.
- CARMONA, S. (1997)
"Caracterización de la fractura del hormigón y de vigas de hormigón armado", Tesis doctoral, E.T.S. Ing. de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.
- CARPINTERI, A. y MARADEI, F. (1995)
"Three-jack solution to obtain a truly stable and symmetric tensile concrete test", *Expt. Mech.*, 35, pp. 19-23.
- CDCECLM (1993)
"Recommendation for Design and Construction of Extruded Concrete Lining Method," *Committee on Design and Construction of Extruded Concrete Lining Method, City Tunnel Series*, Yoshii Shoten Publishers, Tokyo Japan (en japonés).
- CHEN, L., MINDESS, S., MORGAN, D.R., SHAH, S.P., JOHNSTON, C.D., y PIGEON, M. (1995)
"Comparative Toughness Testing of Fiber Reinforced Concrete", *Testing of Fiber Reinforced Concrete*, ACI SP-155, eds. D.J.Stevens et al., American Concrete Institute, Detroit, USA, pp. 41-75.
- CHERN J.-C. y TARNG, K.-M. (1990)
"Size Effect in Fracture of Fiber Reinforced Concrete", *Micromechanics of Failure of Quasi-Brittle Materials*, Edited by S.P. Shah, S.E. Swartz, and M.L. Wang, Elsevier Applied Science Publishers, London, U.K., June, pp. 244-253.

- CSS (1990)

"The Design and Construction Manual for Steel Fiber reinforced Concrete," Corporation of Steel Society, Road Pavement Series, Gihodo Publishing, Japan (en japonés).

- CUR (1994)

"Bepaling van de Buigtreksterke, de Buigtaaiheid en de Equivalente Buigtreksterke van Staalvezelbeton", Aanbeveling 35, Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, Gouda, The Netherlands. (Determination of the Flexural Strength, the Toughness and the Equivalent Flexural Strength of Steel Fiber Concrete).

- DAHL, H., Y BRINCKER, R.(1989)

"Fracture energy of high-strength concrete in compression", Fracture of concrete and rock: Recent developments, Elsevier, Amsterdam, Paises Bajos, pp. 523-536.

- DBV (1991)

"Grundlagen zur Bemessung von Industriefußböden aus Stahlfaserbeton", Deutschen Beton-Vereins, pp. 258-272. (in German - Basis for Evaluation of Steel Fiber Concrete for Use in Industrial Floors).

- DBV(1992-a)

"Technologie des Stahlfaser-betons und Stahlfaserspritzbetons", Deutschen Beton-Vereins, August, pp. 3-18. (in German - Technology of Steel Fiber Reinforced Concrete and Steel Fiber Shotcrete).

- DBV(1992-b)

"Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau", Deutschen Beton-Vereins, September, pp. 19-43. (in German - Basis for Dimensioning SFRC in Tunnel Construction).

- EDGINGTON, J., y HANNANT, D.J. (1972)

"Steel Fibre Reinforced Concrete. The Effect on Fibre Orientation of Compaction by Vibration", Mater. Struct., V. 5, No. 25, pp. 41-44.

- EFNARC (1993)

"Specification for Sprayed Concrete", Final Draft Published by the European Federation of National Associations of Specialist Contractors and Material Suppliers to the Construction Industry (EFNARC), Hampshire, U.K., October, 35 pp.

- EGGIMAN, F., MEIER, U., y FRITZ, H.W. (1995)

"EMPA and its activities in the field of building materials, elements and structures ", Mater. Struct., 28, pp. 101-124.

- EL-SHAKRA, Z.M. y GOPALARATNAM, V.S. (1993)

"Deflection Measurements and Toughness Evaluations for FRC", Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 6, November, pp. 1455-1466.

- EL-SHAKRA, Z.M., GOPALARATNAM, V.S. y MIHASHI, H. (1994)
"Towards toughness-based design, for FRC," International Journal of Cement and Concrete Composites, Invited article for special issue on Toughness of FRC, September (submitted for publication).
- EVANS, R.H., y MARATHE, M.S. (1968)
"Microcracking and stress-strain curves for concrete in tension", Mater. Struct., 1, pp. 61-64.
- FATTUHI, N.I., y HUGHES, B.P. (1982)
"Effect of Beam Dimensions and Concrete Filling Sequence on the Flexural Strength of Steel Fibre Reinforced Concrete Beams", Int. J. Cem. Composites and Lightwt. Concr., V. 4, pp. 117-122.
- FRAILE MORA, J., y GARCÍA GUTIERREZ, P.(1987)
"Curso de Ingeniería de Control", Cátedra de Electrotecnia, E.T.S. Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
- FRANKLIN, G.F., POWELL, J.D. y EMAMI-NAEINI, A. (1991)
"Control de sistemas dinámicos con retroalimentación", Addison-Wesley Iberoamericana, Wilmington, EE.UU.
- GETTU, R. y SHAH, S.P. (1994)
"Fracture Mechanics," in High Performance Concrete and Applications, Edited by S.P. Shah and S.H. Ahmad, Edward Arnold, London, U.K., pp. 161-212.
- GETTU, R., MOBASHER, B., CARMONA, S. y JANSEN, D.C. (1996)
"Testing of Concrete Under Closed-Loop Control", Adv. Cem. Based Materials, V. 3, No. 2, pp. 54-71.
- GETTU, R., AGUADO, A., ZANGELMI, E., CARMONA, S. y CARBONARI, G.(1998)
"Recientes avances en la caracterización del comportamiento mecánico de hormigones de altas prestaciones", Proc. 1er Symp. Nacional de Hormigón de Altas Prestaciones, ETSICCP, Univ. Poli. de Madrid, pp. 41-51.
- GHAZAVY, M.-K. (1994)
"Size Effect in the Shear Failure of Normal and High Strength Reinforced Concrete Beams," Ph.D. Dissertation, University of Missouri-Columbia, Columbia, Missouri, U.S.A., August.
- GLAVIND, M. y STANG, H.(1991)
"Evaluation of the complete compressive stress-strain curve for high strength concrete", Fracture processes in concrete, rock and ceramics, E&FN Spon, Londres, Reino Unido, pp. 749-759.
- GOPALARATNAM, V.S., SHAH, S.P., BATSON, G.B., CRISWELL, M.E., RAMAKRISHNAN, V. y WECHARATANA, M. (1989)
"Fracture Toughness of Fiber Reinforced Concrete", Report of the Task Group on CMRC/NSF Research, University of Missouri-Columbia, December, 70 pp.

- GOPALARATNAM, V.S., SHAH, S.P., BATSON, G.B., CRISWELL, M.E., RAMAKRISHNAN, V. y WECHARATANA, M. (1991)
"Fracture Toughness of Fiber Reinforced Concrete", *ACI Mater. J.*, V. 88, No. 4, pp. 339-353.
- GOPALARATNAM, V.S. (1994)
"Experimental Aspects and Mechanisms of Size Effect," *Size Effect in Concrete Structures*, Edited by H. Mihashi, H. Okamura and Z.P. Bazant, E & FN Spon, London, U.K., pp.455-464.
- GOPALARATNAM, V.S. y GETTU, R. (1995)
"On the Characterization of Flexural Toughness in Fiber Reinforced Concretes", *Cem. Concr. Composites*, V. 17, pp. 239-254.
- GRIMER, F.J., y HEWITT, R.E.(1971)
"The form of the stress-strain curve of concrete interpreted with a diphase concept of material behavior", *Proc. Southampton Civil Engineering Materials Conf. on Structure, Solid Mechanics and Engineering Design*, Wiley Interscience, pp. 681-691
- HENEGAR, C. H. (1978)
"Toughness Index of Fibre Concrete," *Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites (RILEM Symposium)*, Construction Press Ltd., Lancaster, U.K., pp. 79-86.
- HILLERBORG, A. (1985)
"Determination and Significance of the Fracture Toughness of Steel Fibre Concrete," *Steel Fiber Concrete*, Edited by S.P. Shah and Å. Skarendahl, Elsevier Applied Science Publishers, London, U.K., June, pp. 257-271.
- HUDSON, J.A., CROUCH, S.L. y FAIRHURST, C..(1972)
"Soft, stiff and servo-controlled testing machines: A review with reference to rock failure", *Eng. geology*, 6, pp. 155-189.
- IBN (1992-a)
"Essais des bétons renforcés de fibres - Essai de flexion sur éprouvettes prismatiques", *Norme Belge NBN B 15-238*, Institute Belge de Normalisation (IBN), 1040 Brussels, Belgium, September, 9 pp. (in French - Tests on Fibre Reinforced Concrete - Bending Test on Prismatic Specimens).
- IBN (1992-b)
"Caractérisation d'une fibre d'acier au départ de la résistance conventionnelle à la flexion", *Norme Belge NBN B 15-239*, Institute Belge de Normalisation (IBN), 1040 Brussels, Belgium, September, 7 pp. (in French - Characterisation of Steel Fibers Starting from the Conventional Flexural Strength).

- JAMET, D., GETTU, R., GOPALARATNAM, V.S. y AGUADO, A. (1995)
"Toughness of Fiber-Reinforced High-Strength Concrete From Notched Beam Tests", Testing of Fiber Reinforced Concrete, ACI SP-155, eds. D.J.Stevens et al., American Concrete Institute, Detroit, USA, pp. 23-39.
- JANSEN, D.C., SHAH, S.P. y ROSSOW, E.(1996)
"Stress-strain results of concrete from circumferential strain feedback control testing", ACI Mater. J., 92, pp. 419-428.
- JCI-SF2 (1984-a)
"Method of Making Specimens for Strength and Toughness Tests of Fiber Reinforced Concrete", JCI Standards for Test Methods of Fiber Reinforced Concrete, Japan Concrete Institute.
- JCI-SF4 (1984-b)
"Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete", JCI Standards for Test Methods of Fiber Reinforced Concrete, Japan Concrete Institute.
- JOHNSTON, C.D. (1982)
"Steel Fiber Reinforced and Plain Concrete: Factors Influencing Flexural Strength Measurement", *ACI J.*, V. 79, March-April, pp. 131- 138.
- JOHNSTON, C.D. (1986)
"Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete", Steel Fiber Concrete (Proc. US-Sweden Joint Seminar, Stockholm, 1985), eds. S.P.Shah and A.Skarendahl, Elsevier Applied Science, London, pp. 333-360.
- KHAJURIA, A., EL-SHAKRA, Z.M., GOPALARATNAM, V.S. y BALAGURU, P. (1994)
"Influence of Test Control on the Load-Deflection Behavior of FRC," Fiber Reinforced Concrete - Developments and Innovations, Edited by S.P. Shah and J.I. Daniel, ACI Special Publication SP-142, Detroit, U.S.A., pp. 167-179.
- LEIPHOLZ, H.H.E., y ABDEL-ROHMAN, M.(1986)
"Control of structures", Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, Paises Bajos.
- LI, Z., KULKARNI, S.M., y SHAH, S.P. (1993)
"New test method for obtaining softening response of unnotched concrete specimen under uniaxial tension", *Expt. Mech.*, 33, pp. 181-188.
- MINDESS, S., CHEN, L., y MORGAN, D.R. (1994)
"Determination of the First-Crack Strength and Flexural Toughness of Steel Fiber-Reinforced Concrete", *Adv. Cem. Based Materials*, V. 1, pp. 201-208.
- MOENS, J. y NEMEGEER, D. (1991)
"Designing Fiber Reinforced Concrete Based on Toughness Characteristics", *Concrete International*, November, pp. 38-43.

- MTS (1988)
"How the low noise attributes of the MTS 458 controllers enhance material test system performance", MTS Systems Corp., Minneapolis, EE.UU., p. 8.
- NB (1993)
"Sprayed Concrete for Rock Support - Technical Specification and Guidelines", Norwegian Concrete Association (NB, Norsk Betongforening), Publication No. 7, 0251 Oslo, June, 74 pp.
- NBN B 15-238 (1992)
"Tests on Fibre Reinforced Concrete - Bending Test on Prismatic Samples", Norme Belge, Institut Belge de Normalisation (IBN), Brussels, Belgium.
- NEMEGEER, D.E. y TATNALL, P.C. (1995)
"Measuring Toughness Characteristics of SFRC - A critical view of ASTM C 1018", Testing of Fiber Reinforced Concrete, ACI SP-155, eds. D.J.Stevens et al., American Concrete Institute, Detroit, USA, pp. 77-91.
- OKUBO, S. y NISHIMATSU, Y.(1985)
"Uniaxial compression testing using a linear combination of stress and strain as the control variable", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 22, pp. 323-330.
- PASTOR, J.Y., PLANAS, J. y ELICES, M.(1995)
"A new technique for fracture characterization of ceramics at room and at high temperature", J. Testing and evaluation, 23, pp. 209-216.
- RILEM 49 TFR (1984)
"Testing Methods for Fibre Reinforced Cement-Based Composites," RILEM Draft Recommendations, Materials and Structures, Vol. 17, No. 102, pp. 441-456.
- RILEM TC 50 FMC (1985)
"Determination of Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams", RILEM Recommendation, Mater. Struct., V. 18, No. 106, pp. 285-290.
- RILEM 89 FMT (1990)
"Determination of Fracture Parameters (K_{IC}^S and $CTOD_c$) of Plain Concrete Using Three-Point Bend Tests," RILEM Draft Recommendation, Materials and Structures, Vol. 23, No. 138, pp. 457-460.
- ROKUGO, K., OHNO, S. y KOYANAGI, W.(1986)
"Automatical measuring system of load-displacement curves including post-failure region of concrete specimens", Fracture toughness and fracture energy of concrete, Elsevier Science Publ., Amsterdam, Paises Bajos, pp. 403-411.
- SEIBLE, F. (1995)
"Strengthening and retrofit of existing concrete bridges and buildings", Concrete technology: New trends, Industrial applications, E&FN Spon, Londres, Reino Unido, pp. 319-335.

- SHAH, S.P., GOKOZ, U. y ANSARI, F.(1981)
"An experimental technique for obtaining complete stress-strain curves for high strength concrete", *Cem. Concr. Aggregates (ASTM)*, 3, pp. 21-27.
- SOMAPRASAD, H.R., TOKSOY, T., YOSHIYUKI, H. y AKTAN, A.E. (1991)
"Technical Report-91-0016", National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, EE.UU.
- SOROUSHIAN, P. y LEE, C.-D. (1990)
"Distribution and Orientation of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete", *ACI Mater. J.*, V. 87, pp. 433-439.
- STROEVEN, P. (1977)
"The Analysis of Fibre Distributions in Fibre Reinforced Materials", *J. Microscopy*, V. 111, pp. 283-295.
- STROEVEN, P. (1979)
"Morphometry of Fibre Reinforced Cementitious Materials, Part II: Inhomogeneity, segregation and anisometry of partially oriented fibre structures", *Mater. Struct.*, V. 12, pp. 9-20.
- STROEVEN, P. (1991)
"Effectiveness of Steel Wire Reinforcement in a Boundary Layer of Concrete", *Acta Stereol.*, V. 10/1, pp. 113-122.
- SWAMY, R.N. y STAVRIDES, H. (1976)
"Influence of the Method of Fabrication on Strength Properties of Steel Fibre Concrete", *Mater. Struct.*, V. 9, No. 52, pp. 243-253.
- SWARTZ, S.E., HU, K.-K. y JONES, G.L.(1978)
"Compliance monitoring of crack growth in plain concrete", *J. Eng. Mech. Div. (ASCE)*, 104, pp. 789-800.
- TATNALL, P.C. y KUITENBROUWER, L. (1992)
"Steel Fiber Reinforced Concrete in Industrial Floors", *Concrete International*, December, pp. 43-47.
- TERADA, M., YANAGIDANI, T.y EHARA, S.(1984)
"A.E. rate controlled compression test of rocks", *Proc. Third Conf. on Acoustic emission/Microseismic activity in geological structures and materials*, Trans Tech Publications, pp. 159-171.

- TORALLES-CARBONARI, B., GETTU, R., AGULLÓ, L., AGUADO, A. y ACEÑA, V. (1996)
"A Synthetic Approach for the Experimental Optimization of High Strength Concrete", Proc., Fourth Intl. Symposium on the Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Presses de l'ENPC, Paris, Francia, pp. 161-168.
- TORRENT, R.J. (1977)
"A General Relation Between Tensile Strength and Specimen Geometry for Concrete-Like Materials", Mater. Struct., V. 10, No. 58, pp. 187-196.
- TROTTIER, J.-F. y BANTHIA, N. (1994)
"Toughness Characterization of Steel-Fiber Reinforced Concrete", Journal of Civil Engineering Materials, ASCE, Vol. 6, No. 2, May, pp. 264-289.
- WANG, P.T., SHAH, S.P. y NAAMAN, A.(1979)
"Stress-strain curves of normal and lightweight concrete in compression", J. ACI, 75, pp. 603-611.
- WANG, Y. y BACKER, S. (1989)
"Toughness Determination for Fibre Reinforced Concrete", The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 11, No. 1, February, pp. 11-19.
- WARD, R.J. y LI, V.C.(1990)
"Dependence of Flexural Behavior of Fiber Reinforced Mortar on Material Fracture Resistance and Beam Size", ACI Materials Journal, Vol. 87, No. 6, November-December, pp. 627-637.
- WECHARATANA, M. (1990)
"Brittleness index of cementitious composites". Serviceability and durability of construction materials, American Society of Civil Engineers, New York, EE.UU., pp. 966-975.
- WINSLOW, M.(1994)
"An investigation of non-contacting extensometer products for material testing", MTS Systems Corp., Minneapolis, EE.UU., p. 7.