



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

E. T. S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DPTO. DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y DE P.I.C.

INSTITUTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN

TESIS DOCTORAL

FLUENCIA A FLEXIÓN DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO (SFRC) EN ESTADO FISURADO

Autor:

SAMUEL EDUARDO ARANGO CAMPO

Directores:

Dr. Pedro Serna Ros

Dr. José Rocío Martí Vargas

VALENCIA, junio de 2010

Samuel Eduardo Arango Campo
ICITECH, Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil
Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46071 Valencia, España
Tel.: +34 610901808
E-mail: saarcam@upvnet.upv.es
samo_59@hotmail.com

*A mis padres María Claudia y Silvio, que con su amor y educación
me han dado las bases para perseguir mis sueños.*

*A mis hermanos Nana, Kiki y Juanjo
por su apoyo incondicional, respaldo
y admiración.*

*A mi novia Natalia por su inagotable
cariño, comprensión y motivación.*

*A dos amigos que me ayudaron a dar los primeros pasos
y me motivaron a lo largo de este reto, Andrés y César.*

AGRADECIMIENTOS

A mis Directores de Tesis, D. Pedro Serna Ros y D. José Rocío Martí Vargas, por su constante guía y orientación en el desarrollo de esta Tesis Doctoral.

A los profesores y personal administrativo del Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia, así como del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón ICITECH.

Al personal técnico del Laboratorio de Hormigón del Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la UPV, en especial a D. Vicente Miguel Sosa por su amabilidad y buena disposición para ayudar y solucionar dificultades.

A las personas vinculadas al grupo de investigación de Materiales de Construcción, D^a. Estefanía Cuenca Asensio, D. Francisco Martorell y especialmente a D. Emilio García Taengua por su apoyo en el desarrollo del método de ensayo.

A las empresas Dramix, Fibrocev, Asland, Cemex, Isocron, Basf y Prevalesa.

Por el apoyo recibido a través de los proyectos de investigación "Desarrollo de Nuevas Tecnologías en Materiales y Procesos de Fabricación de Componentes Orientados a su Integración en Edificios HABITAT" PS-380000-2008-11 del Ministerio de Educación y Ciencia, y "El Hormigón de Fibras de Acero como Superación del Hormigón Tradicional y sus Perspectivas de Futuro" BIA 2009-12722 del Ministerio de Ciencia e Innovación.

En general a todos aquellos que de una u otra manera llenaron mi vida todos estos años lejos de mi casa, muchas gracias Ali, Andrea, Andrés Caro, Diego, Felipe, Jesús Orlando, Juanito, Lucho, Paulo, Rocío y Yezid.

Finalmente, quiero manifestar muy especialmente mis agradecimientos a Inmaculada Tórtola Burgos por brindarnos su amistad y por su inestimable colaboración, a Andrés Mauricio Núñez López y Giovanna Naranjo por su amistad y apoyo incondicional, y a César Augusto Arbeláez Jaramillo por habernos dejado este reto.

RESUMEN

El hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC) resulta de la acción de adicionar, al hormigón tradicional, fibras relativamente cortas que se distribuyen aleatoriamente. Las consecuencias estructurales de la adición de fibras de acero al hormigón, se manifiestan principalmente en estado fisurado, dotando al hormigón de una capacidad de resistencia residual y una rotura más dúctil.

El comportamiento del SFRC y la determinación de sus propiedades mecánicas ha sido ampliamente estudiado en ensayos a corto plazo, pero la capacidad de garantizar estas propiedades a lo largo del tiempo no se ha estudiado en profundidad.

Así, actualmente existe poco conocimiento sobre la fluencia bajo sollicitaciones a flexión del SFRC en estado fisurado.

Se ha realizado una revisión de la literatura científica, estructurada de la siguiente forma:

- Primero, una introducción a los hormigones reforzados con fibras (FRC), ahondando principalmente en los SFRC: componentes, elaboración, características mecánicas y ensayos para su caracterización.
- Después, se hace una introducción al fenómeno de fluencia en general y en los SFRC, se presentan los resultados de los estudios más afines, las variables empleadas, los métodos de ensayo y se comentan los modelos de predicción de deformaciones diferidas a flexión.

Partiendo de la falta de una metodología y equipo de ensayo estandarizado para evaluar la fluencia a flexión del SFRC en estado fisurado, se ha definido una metodología y diseñado un ensayo para evaluar este fenómeno.

Se ha verificado la viabilidad de la aplicación del ensayo diseñado, siendo una destacable aportación que permitirá profundizar en el estudio de la fluencia a flexión del SFRC en estado fisurado.

Se ha desarrollado un programa experimental para analizar la fluencia a flexión del SFRC en estado fisurado, variando el tipo de hormigón, tipo y contenido de fibras, la abertura previa de fisura y los niveles de carga aplicados. Se ha constatado la capacidad del SFRC en estado fisurado de soportar cargas a lo largo del tiempo, desarrollando deformaciones diferidas que varían en función de las características del material y de la carga aplicada, y se ha cuantificado la respuesta obtenida.

RESUM

El formigó reforçat amb fibres d'acer (SFRC) resulta de l'acció d'addicionar, al formigó tradicional, fibres relativament curtes que es distribuïxen aleatoriament. Las conseqüències estructurals de l'addició de fibres d'acer al formigó es manifesten principalment en estat fissurat, dotant al formigó d'una capacitat de resistència residual i un trencament més dúctil.

El comportament del SFRC i la determinació de les seues propietats mecàniques han estat ampliament estudiades en assajos a curt termini, però la capacitat de garantir eixes propietats al llarg del temps no s'ha estudiat en profunditat.

Així, actualment existeix poc coneixement sobre la fluència sota sollicitacions a flexió del SFRC en estat fissurat.

S'ha realitzat una revisió de la literatura científica, estructurada de la següent manera:

- Primerament, una introducció als formigons reforçats amb fibres (FRC), profunditzant principalment en els SFRC: components, elaboració, característiques mecàniques i assajos per a la seua caracterització.
- Després, es fa una introducció al fenomen de fluència en general i en els SFRC, es presenten els resultats dels estudis més afins, les variables emprades, els mètodes d'assaig i es comenten els models de predicció de deformacions diferides a flexió.

Partint de la falta d'una metodologia i equip d'assaig estandaritzat per a avaluar la fluència a flexió del SFRC en estat fissurat, s'ha definit una metodologia i dissenyat un assaig per a evaluar aquest fenomen.

S'ha verificat la viabilitat de l'aplicació de l'assaig dissenyat, constituint una destacable aportació que permetrà profunditzar en l'estudi de la fluència a flexió del SFRC en estat fissurat.

S'ha desenvolupat un programa experimental per a analitzar la fluència a flexió del SFRC en estat fissurat, variant el tipus de formigó, el tipus i contingut de fibres, l'obertura previa de fisura i els nivells de càrrega aplicats. S'ha constatat la capacitat del SFRC en estat fissurat de soportar càrregues al llarg del temps, desenvolupant deformacions diferides que varien en funció de les característiques del material i de la càrrega aplicada, i s'ha quantificat la resposta obtinguda.

SUMMARY

The steel fibre reinforced concrete (SFRC) is a result of adding short and discontinuous steel fibres to the traditional concrete. The structural impact of the presence of the steel fibres in the concrete mass is experienced mainly in cracked state, giving to the concrete the capacity to develop residual strengths and a more ductile behaviour.

The short term mechanical behaviour of the SFRC has been widely studied, but the capacity to maintain these properties with time has not been studied at the same depth.

Nowadays, there is still a big uncertainty about the knowledge of the flexural creep of the SFRC in cracked state.

A scientific literature review has been done and structured as it follows:

- The FRC is introduced and a detailed description of the SFRC, its components, mechanical properties and tests employed to characterize the material is done.
- Then, the creep phenomenon is introduced from a general point of view and more detailed for the SFRC.
- The results of related studies are analyzed, and the variables, test methods are showed. Also, the main models to predict flexural long-term behaviour presented.

A standardized methodology and equipment to test the performance of flexural creep of SFRC specimens in cracked state has not been developed up to date. In this study a methodology has been defined and a test designed to evaluate this phenomenon.

The feasibility of the application of the test previously designed has been checked. It can be considered a remarkable contribution that will allow an in-depth study of the flexural creep of the SFRC in cracked state.

An experimental program with variable type of concrete, fibre type and content, crack opening and amount of load applied, has been developed. The capacity of the SFRC to bear long-term flexural loads has been observed, increasing the specimen's strains with different behaviour related with material properties and applied load.

ÍNDICE GENERAL

	<i>Pág.</i>
NOTACIÓN	0.1
1. INTRODUCCIÓN	
1.1. JUSTIFICACIÓN	1.1
1.2. OBJETIVO GENERAL	1.3
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1.3
1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	1.4
2. ESTADO DEL ARTE	
2.1. EL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS	2.1
2.2. EL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO	2.4
2.2.1. COMPONENTES DEL SFRC	2.4
2.2.2. ELABORACIÓN DEL SFRC	2.10
2.2.3. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL SFRC	2.14
2.2.4. ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE SFRC ...	2.21
2.3. FLUENCIA DEL HORMIGÓN	2.31
2.3.1. FLUENCIA A COMPRESIÓN	2.32
2.3.1.1. Tipos de fluencia	2.35
2.3.1.2. Mecanismos de la fluencia en el hormigón.....	2.35
2.3.1.3. Factores que influyen en la fluencia.....	2.35
2.3.2. FLUENCIA BAJO DIFERENTES TIPOS DE SOLICITACIÓN	2.37
2.4. FLUENCIA DEL SFRC	2.38
2.4.1. INTRODUCCIÓN A LAS DEFORMACIONES DIFERIDAS DEL SFRC	2.38
2.4.2. FLUENCIA A COMPRESIÓN DEL SFRC	2.40
2.4.3. FLUENCIA A FLEXIÓN DEL SFRC.....	2.41
2.4.3.1. Fluencia a flexión en elementos de SFRC sin fisurar	2.41
2.4.3.2. Fluencia a flexión en elementos de SFRC fisurados	2.42
2.4.3.2.1. Resumen de investigaciones desarrolladas	2.45
2.4.3.3. Fluencia a flexión en vigas de SFRC armadas.....	2.47
2.4.4. MÉTODOS DE ENSAYO DE FLUENCIA A FLEXIÓN	2.49
2.4.4.1. Swamy y Theodorakopoulos (1979)	2.49
2.4.4.2. Chanvillard y Roque (1999)	2.50
2.4.4.3. Kurtz y Balaguru (2000)	2.51
2.4.4.4. Klinkert et al. (2002)	2.51
2.4.4.5. Dalhousie University (Mackay (2002), Cochrane (2003), y Mackay y Trottier (2004))	2.52

2.4.4.6. Bernard (2004).....	2.53
2.4.4.7. Bast et al. (2007).....	2.54
2.4.4.8. Barragán y Zerbino (2008)	2.55
2.4.5. MODELOS DE PREDICCIÓN DE DEFORMACIONES DIFERIDAS A FLEXIÓN.....	2.55
2.4.5.1. EHE 2008/ACI 318-08	2.55
2.4.5.2. Eurocódigo-2.....	2.57
2.4.5.3. Cochrane (2003).....	2.58
2.4.5.4. Chanvillard y Roque (1999)	2.59
2.4.5.5. Modelos basados en el módulo efectivo	2.60
2.4.5.6. Abertura de fisura diferida	2.65
2.5. RESUMEN CRÍTICO Y CUESTIONES SIN RESOLVER.....	2.66

3. METODOLOGÍA DEL ENSAYO DE FLUENCIA

3.1. CRITERIOS DE DISEÑO	3.1
3.2. DISEÑO DEL EQUIPO DE ENSAYO	3.3
3.2.1. BASTIDOR Y COMPONENTES	3.3
3.2.2. DISPOSITIVOS DE MEDIDA	3.7
3.2.3. EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS	3.9
3.2.4. EQUIPOS AUXILIARES	3.10
3.3. PROCEDIMIENTO OPERATIVO DE ENSAYO	3.12
3.3.1. AMASADO.....	3.13
3.3.2. HORMIGONADO.....	3.13
3.3.3. CONSERVACIÓN Y PREPARACIÓN.....	3.14
3.3.4. PREFISURACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYOS DE FLUENCIA	3.15
3.3.5. ENSAYO DE FLUENCIA.....	3.16
3.3.5.1. Etapa de carga	3.17
3.3.5.2. Etapa de descarga y recuperación	3.20
3.3.6. ROTURA POST-FLUENCIA DE LAS PROBETAS	3.22
3.4. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO	3.23
3.4.1. GRÁFICO DE ENSAYO.....	3.23
3.4.2. FICHA DE ENSAYO	3.24

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1. VARIABLES CONSIDERADAS	4.1
4.1.1. VARIABLES RELATIVAS AL MATERIAL	4.1
4.1.2. VARIABLES RELATIVAS AL ENSAYO DE FLUENCIA	4.3
4.2. MATERIALES UTILIZADOS	4.4
4.3. PROBETAS	4.5
4.4. DEFINICIÓN Y DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES	4.6
4.5. DEFINICIÓN DE ELEMENTOS ARMADOS	4.8
4.6. PROGRAMA DE ENSAYOS DE FLUENCIA	4.8

5. ENSAYOS COMPLEMENTARIOS

5.1. ENSAYOS PREVIOS	5.1
5.1.1. METODOLOGÍA DE ENSAYOS PREVIOS	5.1
5.1.1.1. Ajuste granulométrico del hormigón de partida	5.1
5.1.1.2. Ajuste de la dosificación de aditivo	5.3
5.1.2. RESULTADOS DE ENSAYOS PREVIOS	5.3
5.1.2.1. Ajuste granulométrico del hormigón de partida	5.3
5.1.2.2. Ajuste de dosificaciones a estudiar	5.4
5.2. ENSAYOS MECÁNICOS	5.4
5.2.1. METODOLOGÍA DE ENSAYOS MECÁNICOS COMPLEMENTARIOS	5.4
5.2.1.1. Resistencia a compresión	5.5
5.2.1.2. Módulo de deformación	5.5
5.2.1.3. Flexotracción	5.5
5.2.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS	5.6
5.2.2.1. Resistencia a compresión y módulo de deformación	5.6
5.2.2.2. Ensayos de flexotracción	5.7
5.2.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	5.10
5.2.3.1. Resistencia a compresión y módulo de deformación	5.10
5.2.3.2. Ensayos de rotura a flexotracción	5.11

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS DE FLUENCIA

6.1. CONDICIONES OPERATIVAS	6.1
6.1.1. EVOLUCIÓN DE LA HUMEDAD Y TEMPERATURA A LO LARGO DEL TIEMPO EN LA CÁMARA DE ENSAYOS	6.1
6.1.2. CONTROL DE CONTINUIDAD DE LA CARGA APLICADA A LO LARGO DEL TIEMPO	6.3
6.2. RESULTADOS DEL PROCESO DE PREFISURACIÓN	6.8
6.2.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	6.9
6.2.2. ANÁLISIS DE LA FASE DE DESCARGA TRAS LA PREFISURACIÓN	6.13
6.3. ENSAYO DE FLUENCIA EN ETAPA DE CARGA	6.16
6.3.1. ABERTURA DE FISURA EN ENSAYO DE FLUENCIA	6.17
6.3.2. DEFORMACIONES EN COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN	6.20
6.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE FLUENCIA EN PROCESO DE CARGA	6.22
6.4.1. CARGA APLICADA DURANTE EL ENSAYO DE FLUENCIA	6.22
6.4.2. ABERTURA DE FISURA INICIAL	6.24
6.4.3. ABERTURA DE FISURA DIFERIDA	6.26
6.4.4. COEFICIENTES DE FLUENCIA PARA LA ABERTURA DE FISURA	6.30
6.4.4.1. Análisis de conjunto	6.32
6.4.4.2. Análisis de los coeficientes de fluencia según el tipo de hormigón	6.36
6.4.4.2.1. Elementos I-80/35-40-10	6.36
6.4.4.2.2. Elementos I-80/35-70-10	6.39
6.4.4.2.3. Elementos I-80/50-40-10	6.42
6.4.4.2.4. Elementos I-2 ϕ 8-10	6.44
6.4.4.2.5. Elementos II-80/50-40-20	6.45
6.4.4.2.6. Elementos II-65/40-40-20	6.46
6.4.4.2.7. Elementos II-45/50-40-20	6.47
6.4.4.2.8. Elementos II-50/30-40-10	6.50

6.4.4.2.9. Elementos II-2φ6-20.....	6.52
6.4.4.2.10. Conclusiones generales	6.53
6.4.5. VELOCIDAD DE ABERTURA DE FISURA	6.53
6.4.6. ANÁLISIS DE LA FLUENCIA A PARTIR DE LA DEFORMACIÓN EN LA ZONA COMPRIMIDA DEL HORMIGÓN	6.59
6.4.6.1. Deformación inicial en compresión del hormigón.....	6.59
6.4.6.2. Deformación diferida en compresión del hormigón	6.60
6.4.6.3. Coeficientes de fluencia en función de las deformaciones en compresión	6.64
6.4.6.4. Velocidad de deformación en compresión del hormigón	6.68
6.5. PROCESO DE DESCARGA Y RECUPERACIÓN	6.69
6.5.1. RESULTADOS DE LOS ELEMENTOS ENSAYADOS A FLUENCIA: PROCESO DE DESCARGA Y RECUPERACIÓN	6.69
6.6. ROTURA POST-FLUENCIA	6.74
6.6.1. RESULTADOS DE ENSAYOS DE ROTURA (POST-FLUENCIA) A FLEXOTRACCIÓN	6.74
6.7. ANÁLISIS PARAMÉTRICO	6.77
6.7.1. PROCESO DE PREFISURACIÓN.....	6.77
6.7.1.1. Influencia del tipo de hormigón.....	6.77
6.7.1.2. Influencia del tipo de fibras	6.77
6.7.1.3. Influencia del contenido de fibras	6.79
6.7.1.4. Influencia de la abertura de fisura	6.79
6.7.2. FLUENCIA EN ETAPA DE CARGA.....	6.80
6.7.2.1. Influencia del tipo hormigón	6.80
6.7.2.2. Influencia del tipo de fibras	6.81
6.7.2.3. Influencia del contenido de fibras	6.85
6.7.2.4. Influencia de la abertura de fisura	6.88
6.7.2.5. Influencia del índice de carga.....	6.91
6.7.2.6. Influencia del valor de carga aplicada.....	6.95
6.8. CONSIDERACIONES SOBRE EL MÉTODO DE ENSAYO DE FLUENCIA.....	6.99
7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	
7.1. CONCLUSIONES	7.1
7.1.1. CONCLUSIONES GENERALES.....	7.1
7.1.2. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA METODOLOGÍA DEL ENSAYO DE FLUENCIA.....	7.2
7.1.3. CONCLUSIONES RELATIVAS A LAS DOSIFICACIONES	7.3
7.1.4. CONCLUSIONES RELATIVAS A PARÁMETROS Y CONDICIONES OPERATIVAS DEL ENSAYO DE FLUENCIA.....	7.3
7.1.5. CONCLUSIONES RELATIVAS AL PROCESO DE PREFISURACIÓN	7.3
7.1.6. CONCLUSIONES RELATIVAS A LOS ENSAYOS DE FLUENCIA.....	7.4
7.2. RECOMENDACIONES PARA FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	7.5
REFERENCIAS	8.1

ANEJOS

ANEJO 1. CÁLCULO DEL ARMADO EQUIVALENTE	A1.1
ANEJO 2. RESULTADOS DE ENSAYOS DE ROTURA A FLEXOTRACCIÓN	A2.1
ANEJO 3. RESULTADOS DE ENSAYOS DE PREFISURACIÓN	A3.1
ANEJO 4. CURVAS DE FLUENCIA	A4.1
ANEJO 5. GRÁFICOS COMPLETOS Y FICHAS DE ENSAYO	A5.1

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

NOTACIÓN

Los símbolos más empleados y su significado se consignan en orden alfabético en la presente lista.

Mayúsculas Romanas

ARS :	resistencia residual media (Average Residual Strength), definida por ASTM C1399.
A_f :	área de la sección transversal de la fibra (mm^2).
A/C :	relación agua-cemento.
$COR^{j_1-j_2}$:	velocidad de abertura de fisura (Crack Opening Rate), evaluado en el rango de tiempo $j_1 - j_2$ (mm/día).
$\overline{COR}^{j_1-j_2}$:	velocidad de abertura de fisura específica, evaluada en el rango de tiempo $j_1 - j_2$ (mm/día.MPa).
E :	módulo de deformación longitudinal del hormigón.
E_{28} :	módulo de deformación longitudinal del hormigón a los 28 días.
E_{cf} :	módulo de deformación del hormigón reforzado con fibras (MPa).
E_f :	módulo elástico de las fibras (MPa).
EAD :	equipo de adquisición de datos.
F :	carga (kN).
F_a :	carga aplicada a la probeta en ensayo de fluencia (kN).
F_j :	carga correspondiente a valores de CMOD de 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5 mm.
F_L :	carga de primera fisura (kN).
F_{\max} :	carga máxima en la zona post-pico soportada por la probeta prismática en el ensayo de caracterización a flexotracción (kN).
F_{pc} :	carga en la que en el ensayo de rotura se llega al nivel de abertura de fisura w_{ct}^{ff} y de deformación de ε_{pc} .
$F_{p\max}$:	carga máxima soportada en el ensayo final de rotura post-fluencia (kN).
F_w :	carga soportada a un nivel de abertura de fisura w (kN).
F_{wn} :	carga media soportada en ensayos de rotura a flexotracción en el nivel de prefisuración nominal w_n .
FRC :	hormigón reforzado con fibras.
Gr/Ar :	relación grava-arena.
IF_a :	nivel de carga aplicada en ensayo de fluencia (F_a / F_w) (%).

IF_n :	nivel de carga teórico a aplicar en ensayo de fluencia, respecto a F_w (%).
L :	distancia entre apoyos (mm).
R_c :	capacidad de recuperación de las deformaciones de compresión.
R_f :	capacidad de recuperación de la abertura de fisura.
R_m :	resistencia a tracción de la fibra (N/mm^2).
$SFRC$:	hormigón reforzado con fibras de acero.
TMA :	tamaño máximo de árido (mm).
V_f :	contenido de fibras en volumen (%).

Minúsculas Romanas

b :	ancho de probeta (mm).
d_f :	diámetro o diámetro equivalente de la fibra (mm).
f_c :	resistencia a compresión del hormigón (MPa).
f_{cl}^f :	resistencia de primera fisura en el ensayo de flexotracción (MPa).
f_{Fa} :	tensión de tracción producida por la carga aplicada F_a (MPa).
$f_{R,1}$:	resistencia residual a flexión en tracción, para abertura de fisura de 0.5 mm (MPa).
$f_{R,2}$:	resistencia residual a flexión en tracción, para abertura de fisura de 1.5 mm (MPa).
$f_{R,3}$:	resistencia residual a flexión en tracción, para abertura de fisura de 2.5 mm (MPa).
$f_{R,4}$:	resistencia residual a flexión en tracción, para abertura de fisura de 3.5 mm (MPa).
h_{sp} :	altura de la sección en la zona entallada (altura de la sección original menos la altura de la entalla) (mm).
l_f :	longitud de la fibra (mm).
l_d :	longitud desarrollada de la fibra (mm).
t_f :	duración del ensayo de fluencia a flexión en etapa de carga (días).
t_t :	duración total del ensayo de fluencia a flexión incluyendo etapas de carga, descarga y recuperación (días).
spc :	sobre el peso del cemento, empleado para definir la cantidad de aditivo (%).
w :	abertura de fisura.
w_{cd}^j :	abertura de fisura diferida a tiempo j (días), medida en captador (mm).
$w_{cd}^{t_f}$:	abertura de fisura diferida a tiempo final t_f del ensayo de fluencia en etapa de carga (mm).

- w_{ci} : abertura de fisura inicial (al principio del ensayo de fluencia tras estabilizar la carga durante 1 minuto), medida en captador (mm).
- w_{ci}^o : abertura de fisura inicial a origen (mm), $w_{ci}^o = w_{pr} + w_{ci}$.
- w_{cr}^{ff} : abertura de fisura residual al final del ensayo de fluencia (tiempo t_f), al finalizar la etapa de recuperación, medida en captador (mm).
- w_{cri} : abertura de fisura residual inicial, valor obtenido después de la etapa de descarga y dejar estabilizar las medidas durante 1 minuto (mm).
- w_{ct}^j : abertura de fisura total a tiempo j (días), medida en captador (mm).
- w_{ct}^{ff} : abertura de fisura total en el instante previo a la descarga (tiempo final t_f), medida en captador (mm).
- w_{cud} : abertura de fisura diferida recuperada durante la etapa de recuperación (2 semanas), medida en captador (mm).
- w_{cui} : abertura de fisura inicial recuperada al descargar (tras estabilizar la descarga durante 1 minuto), medida en captador (mm).
- w_{cut} : abertura de fisura total recuperada medida en captador (mm), que se puede expresar como $w_{cut} = w_{cui} + w_{cud}$.
- w_{max} : abertura de fisura a la que se presenta la carga máxima (mm).
- w_n : abertura de fisura nominal (mm).
- w_p : abertura de fisura máxima en ensayo de prefisuración, medida en captador (mm).
- w_{pc} : abertura de fisura acumulada a origen en curva ensamblada correspondiente a abertura de fisura máxima en ensayo de fluencia (mm).
- w_{pci} : abertura de fisura acumulada a origen en curva ensamblada correspondiente a abertura de fisura inicial en ensayo de fluencia (mm).
- w_{pmax} : abertura de fisura acumulada a origen en curva ensamblada correspondiente a la abertura de fisura a la que se presenta la carga máxima en el ensayo de rotura (mm).
- w_{per} : abertura de fisura acumulada a origen en curva ensamblada correspondiente a abertura de fisura residual en ensayo de fluencia (mm).
- w_{pr} : abertura de fisura residual en ensayo de prefisuración, medida en captador (mm).

Minúsculas Griegas

- δ : flecha (mm).
- ε_{cd}^j : deformación en compresión diferida a tiempo j (‰).
- ε_{cd}^{ff} : deformación diferida en compresión a tiempo final t_f del ensayo de fluencia en carga (‰).

- ε_{ci} : deformación en compresión inicial producida durante la puesta en carga (medida tras estabilizar la carga durante 1 minuto) (‰).
- ε_{ci}^o : deformación en compresión inicial a origen (‰), que se obtiene como $\varepsilon_{ci}^o = \varepsilon_{pr} + \varepsilon_{ci}$.
- ε_{cr}^{tt} : deformación en compresión residual al final del ensayo de fluencia (tiempo t_t), después de la etapa de recuperación (‰).
- ε_{cri} : deformación residual inicial, valor obtenido después de la descarga y dejar estabilizar la descarga durante 1 minuto.
- ε_{ct}^{tf} : deformación en compresión total en el instante previo a la descarga (tiempo final t_f) (‰).
- ε_{cud} : deformación en compresión diferida recuperada durante la etapa de recuperación (‰).
- ε_{cui} : deformación en compresión inicial recuperada al descargar (tras estabilizar la descarga durante 1 minuto) (‰).
- ε_{cut} : deformación en compresión total recuperada (‰), que se puede expresar como $\varepsilon_{cut} = \varepsilon_{cui} + \varepsilon_{cud}$.
- ε_p : deformación en compresión correspondiente al nivel de prefisuración w_p definido (‰).
- ε_{pc} : deformación en compresión acumulada a origen en curva ensamblada correspondiente a abertura de fisura máxima en ensayo de fluencia (‰).
- ε_{pci} : deformación en compresión acumulada a origen en curva ensamblada correspondiente a abertura de fisura instantánea en ensayo de fluencia (‰).
- ε_{pcr} : deformación en compresión acumulada a origen en curva ensamblada correspondiente a abertura de fisura residual en ensayo de fluencia (‰).
- ε_{pmax} : deformación en compresión acumulada a origen en curva ensamblada correspondiente a la deformación a la que se presenta la carga máxima en el ensayo de rotura (‰).
- ε_{pr} : deformación en compresión residual a compresión en el hormigón en el ensayo de prefisuración (‰).
- ε_{sh}^j : deformación en compresión del hormigón debida a la retracción a tiempo j (‰).
- λ : esbeltez o relación de aspecto de la fibra.
- η_0 : factor de orientación de las fibras.
- η_1 : factor de eficiencia de las fibras en función de su longitud.
- τ : tensión de adherencia fibras-matriz.
- ψ : perímetro de la fibra (mm).
- ϕ_{sj}^o : coeficiente de fluencia a tiempo j a origen de ensayo, obtenido a partir de los valores de deformación en compresión.

- $\varphi_{\bar{\epsilon}_j}^c$: coeficiente de fluencia a tiempo j considerando exclusivamente las deformaciones desarrolladas en la etapa de carga.
- $\varphi_{w_j}^o$: coeficiente de fluencia a tiempo j a origen de ensayo, obtenido a partir de los valores de abertura de fisura.
- $\varphi_{w_j}^c$: coeficiente de fluencia a tiempo j considerando exclusivamente las aberturas de fisura desarrolladas en la etapa de carga.

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción, pues ofrece una serie de ventajas que lo hacen muy atractivo. El hormigón es un material que toma casi cualquier forma deseada, posee una alta resistencia a compresión, monolitismo, relativa facilidad de obtención de sus componentes, es relativamente económico, ampliamente estudiado, con posibilidad de desarrollo y difundido. Dentro de las desventajas que presenta el material, está principalmente su baja resistencia a tracción (respecto de la de compresión es aproximadamente de 1:10), generando comportamientos frágiles en su estado no reforzado. La resistencia de diseño a tracción del hormigón es generalmente considerada como cero, por lo que cuando se tienen tensiones de tracción en el hormigón se debe disponer de algún mecanismo de refuerzo (usualmente acero en barras, fibras, mallas).

La técnica de mezclar fibras con materiales frágiles para reforzarlos no es algo novedoso, ni que requiera imprescindiblemente de procedimientos sofisticados para su utilización. Se conocen construcciones con miles de años de antigüedad realizadas con técnicas similares, y en la actualidad en lugares aislados y con bajos recursos económicos se continúa construyendo con materiales como barro, paja, estiércol de animales, entre otros.

Los materiales compuestos reforzados con fibras están constituidos por unas fibras embebidas o ancladas en una matriz generando una interfase entre las partes (fibras y matriz). En este esquema, las fibras y la matriz mantienen sus características físicas y mecánicas, produciendo una combinación de propiedades que no podrían ser alcanzadas con cada uno de los constituyentes por separado. En general, las fibras son las que asumen las tensiones de tracción mientras que la matriz que las rodea mantiene su localización y orientación, actuando como un medio de transferencia de carga entre ellas, además de proteger a las fibras de los agentes agresivos del medio ambiente como la humedad y la temperatura, entre otros.

Durante la segunda mitad del siglo XIX surgen las primeras patentes de elementos de hormigón reforzados con armaduras de acero. En el año 1918 H. Alfesen patentó un proceso para aumentar la resistencia del hormigón a tracción utilizando fibras pequeñas (Hannant, 1978). Partiendo de un material

como el cemento Portland y por consiguiente de morteros y hormigones, se combina con un sistema de refuerzo discreto como lo son las fibras y se obtiene el Hormigón Reforzado con Fibras de Acero (SFRC). Los SFRC tal como se entienden hoy empezaron a emplearse en la década de 1960.

Los SFRC han sido ampliamente estudiados en relación a sus propiedades mecánicas como la tenacidad, la resistencia y el comportamiento a cargas instantáneas después de fisurado, la resistencia a la fisuración por retracción, el comportamiento a los ciclos hielo-deshielo, entre otros.

Sin necesidad de incrementar la carga aplicada, los elementos de hormigón estructural sufren deformaciones a lo largo del tiempo que pueden llegar a ser significativas y causar una serie de efectos perjudiciales, que deben ser conocidos y cuantificados previamente, para así evitar problemas en servicio y accidentes en estados límite. Sin embargo, el comportamiento de los hormigones sometidos a cargas sostenidas a lo largo del tiempo responde a una serie de fenómenos complejos que no son fáciles de estudiar experimentalmente, y en particular, no se ha profundizado de igual manera en el comportamiento mecánico del SFRC cuando se aplican cargas durante periodos de tiempo prolongado.

En muchas de sus aplicaciones el hormigón reforzado con fibras desarrolla fisuras, llegando el material a niveles de comportamiento fisurado en los que gracias a su capacidad de resistencia residual queda controlada la propagación de las fisuras. Ahora bien, la capacidad de mantener bajos los valores de abertura de fisura para que así la multifisuración sea efectiva a lo largo del tiempo debe ser evaluada.

Las anteriores situaciones generan diferentes panoramas, estructuralmente hablando, debiéndose estudiar la respuesta de los elementos de SFRC fisurados sometidos a cargas sostenidas para así aportar herramientas de diseño y garantizar la satisfacción y cumplimiento de los estados límite de servicio (fisuración) y rotura (carga última).

En esta Tesis Doctoral se pretende analizar el comportamiento de elementos prismáticos de SFRC previamente fisurados sometidos a cargas mantenidas de flexión. En la actualidad no existe una metodología y equipo de ensayo estandarizado para evaluar este fenómeno. Se cuenta con escasas publicaciones directamente relacionadas con el tema: Chanvillard y Roque (1999), Granju et al. (2000), Mackay (2002), Cochrane (2003), Bast et al. (2007) y Barragán y Zerbino (2008); las dos primeras son producto del mismo proyecto (BEFIM) y las dos siguientes son Tesinas de Master (Dalhousie University).

En este contexto, adquiere relevancia la realización de una investigación experimental que defina al detalle un equipo y una metodología de ensayo, que contemple diferentes dosificaciones de SFRC para generar distintos comportamientos mecánicos, y que aborde diversos niveles de carga y aberturas de fisura.

1.2. OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es el estudio del comportamiento diferido en flexión de elementos de hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC) en estado fisurado.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos se han establecido como consecuencia de la revisión del estado del arte que se presenta en el Capítulo 2 y en congruencia con el objetivo general definido en el apartado anterior. Los objetivos específicos son los siguientes:

- Dado que no existe un método de ensayo estandarizado para evaluar el fenómeno de la fluencia a flexión del SFRC en estado fisurado, uno de los principales objetivos de este trabajo es diseñar y poner en marcha los equipos necesarios y una metodología experimental para estudiar el comportamiento del SFRC ante el fenómeno mencionado.
- Definir una terminología y establecer parámetros de análisis de resultados, que unifiquen criterios en las definiciones y en la determinación de fenómenos de importancia, como las deformaciones instantáneas y la estabilización de las deformaciones, entre otros.
- Generar un proceso de ensayo que sea susceptible de constituir la base para una propuesta de normalización.
- Plantear y desarrollar un programa experimental definiendo y ajustando las variables más representativas relativas al ensayo y al material, de modo que permitan evaluar la validez de los equipos diseñados y la metodología de ensayo propuesta.
- En el programa experimental se pretende analizar hormigones con distintos tipos y cantidades de fibras, con la finalidad de obtener SFRC con diferentes comportamientos post-fisura (ablandamiento y endurecimiento por deformación).
- Con el programa se pretende obtener resultados experimentales que permitan analizar el fenómeno y cuantificar las deformaciones y las aberturas de fisura en elementos de SFRC, de diferente composición, sometidos a diferentes niveles de carga a lo largo del tiempo.
- Analizar el comportamiento de los diferentes SFRC, relacionando los parámetros de dosificación, los resultados de los ensayos de rotura a flexotracción, el comportamiento en el proceso de

prefisuración y en la rotura post-fluencia, con la evolución de la abertura de fisura lo largo del tiempo.

- Analizar y comparar los resultados obtenidos entre sí y con modelos aplicados a hormigón tradicional.
- No se pretende llegar a conclusiones definitivas sobre la evolución de la fluencia de forma general para los SFRC, pero sí detectar las variables fundamentales cuyo efecto deberá ser evaluado en posteriores trabajos.

1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento se compone de 7 capítulos, el apartado de Referencias y Anejos, que se estructuran de la siguiente forma:

- Capítulo 1. Introducción.
- Capítulo 2. Estado del Arte.
- Capítulo 3. Metodología del Ensayo de Fluencia.
- Capítulo 4. Programa Experimental.
- Capítulo 5. Ensayos Complementarios.
- Capítulo 6. Resultados y Análisis de Ensayos de Fluencia.
- Capítulo 7. Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación.
- Referencias.
- Anejos.

En el Capítulo 1 se hace una breve introducción al tema de la Tesis Doctoral, desarrollando una justificación para llevar a cabo la investigación; se define el objetivo general, los objetivos específicos y se presenta la estructura del documento con la explicación de lo que comprende cada capítulo.

El Capítulo 2 contiene una completa revisión bibliográfica. Se expone el estado actual del conocimiento de los SFRC, sus propiedades mecánicas, se describe el fenómeno de fluencia del hormigón, resaltando los aspectos relativos a los SFRC. Para finalizar se realiza un resumen crítico, donde se exponen comentarios y cuestiones sin resolver.

El Capítulo 3 presenta la metodología empleada para realizar el ensayo de fluencia, los fundamentos y la concepción del ensayo de fluencia (uno de los apartados más significativos de la presente Tesis Doctoral), se expone cómo se van a presentar los resultados de los ensayos de fluencia y los criterios para su interpretación.

El Capítulo 4 describe el programa experimental en el que se definen las variables del programa, los materiales empleados, las probetas a ensayar, los ensayos previos, los hormigones a estudiar y el programa de ensayos que combina las variables a considerar.

El Capítulo 5 presenta los ensayos complementarios, clasificados en ensayos previos y ensayos mecánicos; se expone su metodología, y se presentan y analizan los resultados obtenidos.

El Capítulo 6 corresponde a la presentación y análisis de resultados de los ensayos de fluencia, donde figuran las condiciones operativas del ensayo, la metodología, el proceso de prefisuración, la fluencia en etapa de carga y en etapa de descarga y recuperación, así como la rotura post-fluencia.

En el Capítulo 7 se establecen las conclusiones y las futuras líneas de investigación.

A continuación se presentan las referencias bibliográficas empleadas en el desarrollo de la presente Tesis Doctoral.

Y por último, se incluyen Anejos que contienen información complementaria sobre ciertos aspectos de la Tesis Doctoral.

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se aborda el estado actual del conocimiento, como producto de las investigaciones relacionadas con el hormigón reforzado con fibras (FRC), orientado más específicamente a lo relativo a la fluencia a flexión del hormigón reforzado con fibras de acero SFRC en estado fisurado.

Para empezar se realiza una introducción al material, donde se trata de forma general el FRC y más detalladamente el SFRC, definiendo el material, sus características mecánicas y los ensayos existentes más relevantes para determinarlas y cuantificarlas. A continuación se entra de lleno en los aspectos relativos a la fluencia del hormigón, primero de forma general y después de forma detallada en la fluencia a flexión del SFRC en estado fisurado, presentando los escasos y relativamente recientes estudios desarrollados en el tema.

Para finalizar, y con el objetivo de facilitar la comprensión del capítulo, se desarrolla un resumen crítico del estado actual del conocimiento, comentando e identificando las cuestiones sin resolver y los posibles campos de actuación.

2.1. EL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (FRC)

A efectos del Anejo 14 de la Instrucción EHE 2008, los FRC se definen como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa.

Las fibras soportan esfuerzos de tracción que transmiten por adherencia al hormigón, controlan la fisuración y reducen la intensidad de la misma a la vez que mejoran la tenacidad. La Figura 2.1 presenta el comportamiento conceptual carga-abertura de fisura de un ensayo a flexión en matrices con y sin fibras.

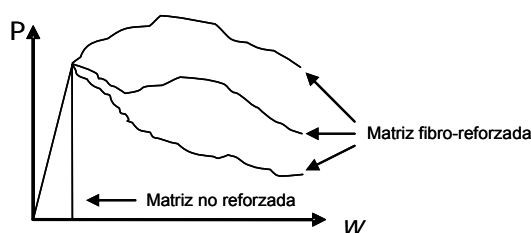


Figura 2.1. Curvas típicas carga-abertura de fisura, para matrices con y sin fibras.

Las fibras son empleadas en aplicaciones estructurales en busca de beneficios adicionales en cuanto a reducción de mano de obra, incremento de la durabilidad, y reducción o eliminación del refuerzo tradicional (Massicotte, 2000¹).

Esencialmente, la naturaleza y el tipo de fibras determinan la efectividad de la acción reforzante y la eficacia de la transmisión. En la actualidad se utilizan diversos tipos de fibras. La Tabla 2.1 muestra algunos de los materiales más comunes empleados para fabricar fibras, con indicación de sus principales características.

Tabla 2.1. Tipos de fibras más comunes y sus propiedades (ACI 544.5R-10, 2010).

Tipo de Fibra	Diámetro Equivalente (mm)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a Tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alargamiento de Rotura (%)
Acrílico	0.02-0.35	1100	200-400	2	1.1
Asbesto	0.0015-0.02	3200	600-1000	83-138	1-2
Algodón	0.2-0.6	1500	400-700	4.8	3-10
Vidrio	0.005-0.15	2500	1000-2600	70-80	1.5-3.5
Grafito	0.008-0.009	1900	1000-2600	230-415	0.5-1
Aramida	0.01	1450	3500-3600	65-133	2.1-4
Nylon	0.02-0.4	1100	760-820	4.1	16-20
Poliéster	0.02-0.4	1400	720-860	8.3	11-13
Polipropileno	0.02-1	900-950	200-760	3.5-15	5-25
Polivinil alcohol	0.027-0.660	1300	900-1600	23-40	7-8
Carbón	-	1400	4000	230-240	1.4-1.8
Rayón	0.02-0.38	1500	400-600	6.9	10-25
Basalto	0.0106	2593	990	7.6	2.56
Poliétileno	0.025-1	960	200-300	5.0	3
Sisal	0.08-0.3	760-1100	228-800	11-27	2.1-4.2
Coco	0.11-0.53	680-1020	108-250	2.5-4.5	14-41
Yute	0.1-0.2	1030	250-350	26-32	1.5-1.9
Acero	0.15-1	7840	345-3000	200	4-10

La elección del tipo de fibra generalmente está condicionada por la aplicación que se le vaya a dar, pero también influyen factores económicos, de disponibilidad de materiales y de durabilidad.

Los Hormigones Reforzados con Fibras de Vidrio (GFRC) son empleados principalmente en paneles de fachada para edificaciones, tuberías, depósitos de líquidos, separaciones como paredes y puertas, elementos resistentes al fuego, tejas, mobiliario urbano, pavimentos, encofrados, reparaciones arquitectónicas, generalmente prefabricados.

Los Hormigones Reforzados con Fibras Sintéticas (SNFRC), son empleados en soleras, pavimentos, recubrimientos de túneles, paneles de fachada, bóvedas, hormigones proyectados, piscinas y otros.

Los Hormigones Reforzados con Fibras Naturales (NFRC), son elaborados con fibras generalmente obtenidas mediante procesos muy económicos, con baja demanda de energía y sin necesidad de técnicas complejas. Los NFRC son empleados en la fabricación y construcción de: tejas, paneles, tuberías, silos, tanques, casas de bajo costo, paneles de recubrimiento, como aislante de sonido y temperatura (ACI 544.1R:96, 2009).

Los Hormigones Reforzados con Fibras de Acero (SFRC) se emplean en construcción in-situ principalmente en túneles, estabilización de taludes, losas apoyadas (pavimentos de carreteras, aeropuertos, instalaciones militares o pisos industriales), tableros de puentes, bases para equipos pesados (turbinas generadoras de energía), reparaciones y construcción de estructuras hidráulicas (cavitación y erosión severa), reparación y rehabilitación en estructuras marinas, y recubrimientos en general. También se emplean SFRC en elementos prefabricados como dovelas para túneles, rompeolas, bóvedas de seguridad, nichos, muros prefabricados para vivienda, y en elementos en general para evitar fisuración, reducir refuerzo tradicional y acelerar procesos de fabricación.

Además de los FRC mencionados anteriormente, también se ha experimentado con hormigones reforzados con mezclas de fibras (Hybrid Fibre Reinforced Concrete). Se han obtenido experiencias interesantes, como las encontradas al mezclar fibras de acero y polipropileno (Kobayashi y Cho (1982) y Yoo et al. (2003)).

También se han obtenido resultados satisfactorios con la mezcla de microfibras de acero (25 μm de diámetro y 3 mm de longitud) y microfibras de carbono (18 μm de diámetro y 6 mm de longitud), aportando en conjunto las mismas cualidades que muestran por separado. Esto abre la posibilidad de poder controlar las propiedades de las fibras y combinarlas en proporciones adecuadas, para así diseñar compuestos reforzados a medida (ACI 544.1R-96, 2009).

La pérdida de trabajabilidad que la adición de fibras provoca en el hormigón condiciona el contenido máximo de fibras que se puede incorporar en la dosificación, que suele situarse para las fibras de acero, en función de la aplicación y de las fibras empleadas, alrededor de los 100 kg/m^3 . Por otro lado suele aplicarse un límite inferior al contenido de fibras, pues las dosificaciones con bajos contenidos de fibras han dejado experiencias negativas en la construcción (ACI 544.1R-96, 2009).

Las fibras más empleadas son las de acero, tanto para morteros como para hormigones, por su eficacia y economía. Bien conocidas las propiedades del acero, como el módulo de deformación (hasta 7 veces mayor que el del hormigón), la buena adherencia a la pasta de cemento, su gran capacidad de deformación y la relativa facilidad con que son introducidas en la matriz, hacen de este tipo de fibras una opción muy atractiva tanto en el caso de hormigones tradicionales (SFRC), como en el caso de hormigones autocompactantes (SCFRC), en hormigones de altas y ultra altas prestaciones (HPFRC y UHPFRC) y en hormigones proyectados (FRS).

2.2. EL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO (SFRC)

La inclusión de las fibras de acero induce algunas exigencias adicionales al hormigón, las cuales tendrán que ser tenidas en cuenta en el momento de la dosificación, y también modifica sus propiedades mecánicas. En los siguientes apartados se abordan estos aspectos.

2.2.1. COMPONENTES DEL SFRC

Los SFRC están constituidos esencialmente por los mismos componentes que un hormigón tradicional y adicionalmente fibras de acero. La inclusión de las fibras, además de alterar el comportamiento del hormigón en estado endurecido, también lo hace en estado fresco, por lo que a algunos de los componentes se les exigen condiciones que en los hormigones tradicionales no son necesarias.

En función de la cantidad de fibras que se van a adicionar al hormigón y de la geometría de éstas, el material compuesto tendrá que sufrir ciertas modificaciones respecto de un hormigón tradicional. Estas modificaciones pasan principalmente por una limitación en el tamaño máximo del árido, menores valores de relación grava-arena, mayores cantidades de aditivos reductores de agua, y mayor demanda de finos, entre otros.

La Tabla 2.2 muestra el rango de proporciones para un SFRC según el ACI Committee 544 1R-96 (2009).

Tabla 2.2. Rango de proporciones de componentes para un SFRC (ACI 544.1R-96, 2009).

Componentes de la mezcla	Tamaño máximo de árido (mm)		
	10	20	40
Cemento (kg/m^3)	350-600	300-530	280-415
Agua/cemento	0.35-0.45	0.35-0.50	0.35-0.55
% árido fino-grueso	45-60	45-55	40-55
% aire ocluido	4-8	4-6	4-5
Fibras conformadas (V_f %)	0.4-1.0	0.3-0.8	0.2-0.7
Fibras planas (V_f %)	0.8-2.0	0.6-1.6	0.4-1.4

Cemento

El cemento es un componente decisivo en la docilidad del material en estado fresco y, posteriormente, en las características mecánicas del hormigón endurecido. Se puede emplear cualquier cemento que cumpla con los requisitos establecidos para un hormigón tradicional, siempre que sea capaz de proporcionar al hormigón las características que exige el proyecto.

Cuanto mayor sea el contenido de fibras y menor el tamaño máximo del árido, será necesario emplear una mayor cantidad de cemento con la finalidad de proporcionar más pasta.

Agua

Se puede emplear agua que cumpla los mismos requisitos exigidos en el caso de hormigones tradicionales armados, poniendo especial atención a los agentes que puedan afectar a las fibras. La Instrucción EHE 2008 establece, en el Anejo 14, que el aumento de la consistencia debido al uso de las fibras debe ser compensado siempre con la adición de aditivos reductores de agua, sin modificar la dosificación prevista de agua.

Áridos

Además de cumplir los requerimientos de composición, resistencia, durabilidad, estabilidad y limpieza establecidos para el empleo en hormigones tradicionales, los áridos deben tener unos tamaños de partícula, granulometría y formas adecuadas para la elaboración de un SFRC.

Se pueden emplear áridos rodados o machacados, siendo más adecuado el empleo de los primeros (especialmente en la arena) ya que para valores idénticos de relación agua/cemento se obtiene mejor docilidad que con los áridos machacados.

Respecto del contenido de finos, cuando se adicionan fibras de acero es aconsejable incorporar mayor cantidad de finos para reducir el riesgo de segregación, aumentar la cohesión y favorecer la movilidad de las fibras.

La movilidad potencial de las fibras depende de la proporción de árido grueso y del tamaño máximo de árido (Figura 2.2). Cuanto mayor sean estos dos parámetros menor será la movilidad potencial de las fibras (Hannant, 1978). La JSCE (Japan Society of Civil Engineers) plantea que el valor óptimo de tamaño máximo de árido es aproximadamente igual a la mitad de la longitud de la fibra (JSCE, 1984).

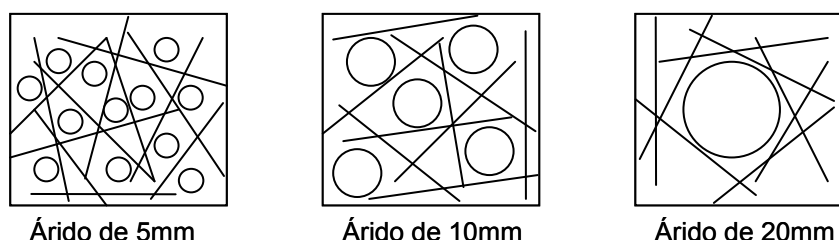


Figura 2.2. Efecto del tamaño del árido en la distribución de las fibras (de 40 mm de longitud) (Hannant, 1978).

Tamaños máximos de árido mayores que 20 mm no son recomendados, aunque en algunos estudios se han empleado áridos de hasta 38 mm con

resultados satisfactorios (ACI 544.3R-08, 2008). Se recomienda también que el tamaño máximo de árido no supere:

- 2/3 de la longitud máxima de la fibra.
- 1/5 del lado menor del elemento.
- 3/4 de la distancia libre entre las barras de armado.

La relación árido grueso/árido fino (Gr/Ar) suele reducirse respecto de lo especificado para un hormigón tradicional con las mismas exigencias de resistencia, ya que un mayor volumen de mortero facilita la movilidad de las fibras. Se debe buscar una relación Gr/Ar óptima que proporcione la docilidad y resistencia deseadas.

Aditivos

En los SFRC se emplean principalmente aditivos reductores de agua (superfluidificantes) y aireantes. El Anejo 14 de la EHE 2008 establece que, cuando las fibras utilizadas sean metálicas, el ión cloruro total aportado por los componentes no debe exceder del 0.4% del peso del cemento.

Al adicionar fibras al hormigón (principalmente en altas proporciones), éste sufre una reducción sustancial de docilidad. Con el fin de no adicionar agua, ni afectar la resistencia y durabilidad esperadas, se emplean superfluidificantes.

De cualquier manera, si se pretende hacer muy fluido un hormigón con un volumen de fibras alto y no se controla adecuadamente la granulometría de los áridos y la distribución de las fibras en el hormigón, puede producirse apelotonamiento (erizos o spalling).

Cuando los SFRC van a estar sometidos a ciclos hielo-deshielo, todas las prácticas conocidas para el hormigón tradicional son aplicables, por lo que el uso de un aditivo aireante es una necesidad.

Ensayos previos a la puesta en obra son indispensables sobre todo cuando se combinen adiciones, aditivos y fibras, ya que la efectividad de los componentes al combinarse es desconocida. Se han detectado en algunos casos problemas de incompatibilidad que provocaban la inestabilidad del aire ocluido, debido a la reacción de sustancias químicas que contienen las fibras con las adiciones y los aditivos (Massicotte, 2000²).

Adiciones

Las adiciones usualmente empleadas en los SFRC son materiales puzolánicos tales como puzolanas naturales, cenizas volantes y humo de sílice.

La adición de estos materiales se hace con el fin de reducir la permeabilidad del hormigón, aumentar la durabilidad, mejorar la cohesión del material y en consecuencia la adherencia fibra-matriz, controlar la retracción,

disminuir el riesgo de segregación y, en el caso particular de los hormigones proyectados, disminuir el rebote. Por todo esto y por la formación de silicatos similares a los producidos por el cemento, estos materiales dan lugar a hormigones con mayor resistencia.

Como método para mejorar la trabajabilidad de los SFRC, se ha propuesto la adición de puzolanas como ceniza volante, escoria y humo de sílice, como una adición o como sustitución de parte del cemento (ACI 544.1R-96, 2009).

Adiciones de humo de sílice (HS) al hormigón de entre 7-10 % como sustitución de cemento son recomendables en los hormigones proyectados en seco, no solo por las propiedades puzolánicas del HS sino también por las modificaciones reológicas que produce en el hormigón en estado fresco debido a la alta superficie específica del HS, razón por la que reduce el rebote. El HS en SFRC proyectados en seco puede reducir la pérdida de fibras hasta valores del 20% (Bindganavile y Banthia, 2000).

Fibras de acero

Las fibras de acero son elementos de corta longitud y pequeña sección que se adicionan al hormigón con el fin de conferirle ciertas propiedades específicas, con las características necesarias para dispersarse aleatoriamente en una mezcla de hormigón en estado fresco empleando metodologías de mezclado tradicionales.

La efectividad del refuerzo matriz-fibras, exige a las fibras las siguientes propiedades (Naaman, 2000):

- Una resistencia a tracción significativamente mayor que la del hormigón.
- Una adherencia con la matriz del mismo orden o mayor que la resistencia a tracción de la matriz.
- Un módulo de elasticidad significativamente mayor que el del hormigón.

El Anejo 14 de la Instrucción EHE 2008 clasifica las fibras de manera general en estructurales y no estructurales, en función de la capacidad de aumentar la resistencia del hormigón. Las fibras serán estructurales si la contribución de las mismas puede ser considerada en el cálculo de la respuesta de la sección de hormigón. Las fibras serán no estructurales en caso contrario. Las fibras suponen una mejora ante determinadas propiedades como el control de la fisuración por retracción, y el incremento en la resistencia al fuego, abrasión e impacto, entre otras.

Las especificaciones estándar, clasificación y definiciones relativas a las fibras de acero, se encuentran normalizadas en UNE-EN 14889-1:2008 y ASTM A820/A820M-06.

Las convenciones empleadas para describir las fibras geoméricamente son:

- l_f : longitud de la fibra (mm).
- l_d : longitud desarrollada de la fibra (mm).
- d : diámetro o diámetro equivalente de la fibra (mm).
- λ : esbeltez o relación de aspecto de la fibra (también se denota como l/d).
- A_f : área de la sección transversal de la fibra (mm^2).

El diámetro equivalente es el diámetro de un círculo con un área igual al área de la sección transversal de la fibra. El diámetro efectivo es el diámetro de una circunferencia con un perímetro igual al perímetro de la sección transversal de la fibra. Esta diferenciación de diámetros adquiere relevancia en el caso de fibras con secciones transversales diferentes a las circulares.

Además de las características geométricas también se especifica:

- R_m : resistencia a tracción de la fibra (N/mm^2).
- Previsiones de espacio (espesor, recubrimiento y espacio entre barras de armado en el elemento, si es el caso).
- Forma de suministro: sueltas o en paquetes.

Las fibras deben cumplir con algunos requerimientos mecánicos de resistencia a tracción, doblado y condiciones de superficie. Los ensayos para evaluar estos factores y los criterios de aceptación o rechazo se encuentran en UNE-EN 14889-1:2008.

En función del material base utilizado para la producción de las fibras de acero, se clasifican en los siguientes grupos según la UNE-EN 14889-1:2008:

- Grupo I: alambres estirados en frío (cold drawn wire).
- Grupo II: láminas cortadas (cut sheet).
- Grupo III: extractos fundidos (melt-extracted).
- Grupo IV: conformados en frío.
- Grupo V: aserrados de bloques de acero (milled from steel blocks).

Las fibras de acero pueden ser de acero al carbono (en ocasiones con aleaciones con el fin de mejorar prestaciones técnicas y mecánicas) o acero inoxidable. También se pueden encontrar fibras con revestimientos de zinc o galvanizadas, que resultan menos costosas que las de acero inoxidable y presentan resistencia a la corrosión.

Las fibras de acero pueden tener formas muy variadas: rectas, onduladas, corrugadas, con extremos conformados, dentadas y otras. Las secciones también pueden ser muy variadas: circulares, cuadradas, rectangulares y planas (Figura 2.3).

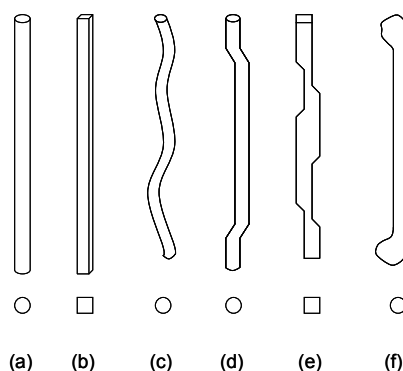


Figura 2.3. Formas de las fibras de acero: a) sección circular, b) sección rectangular, c) ondulada, d) extremos conformados, e) de extractos fundidos y f) extremos ensanchados (Hannant, 1978).

Además de las limitaciones relacionadas con el tamaño máximo de árido ya comentadas, cuando el hormigón va a ser bombeado, la longitud de la fibra no debe superar $2/3$ del diámetro interior del tubo. Otro factor limitante de la longitud de las fibras es la separación entre las barras de armado cuando éstas están presentes (en estos casos la longitud de las fibras no debe superar la separación mínima entre barras a no ser que se demuestre con ensayos previos que no presenta inconvenientes).

La sección transversal de las fibras depende principalmente del material usado en la fabricación (proceso de fabricación). El grupo I suele tener diámetros de 0.25 a 1 mm, en función de la sección del cable del que son obtenidas (generalmente secciones circulares). El grupo II (por lo general planas y rectas) tienen secciones transversales con espesores de 0.15 a 0.64 mm y anchos de 0.25 a 2 mm. Independientemente del tipo de fibras, la gran mayoría tienen diámetros entre 0.4 y 0.8 mm y longitudes de 25 a 60 mm. Su índice de esbeltez por lo general es menor que 100, generalmente entre 40 y 80 (Naaman, 2000).

El contenido de fibras de un SFRC tradicional oscila entre el 0.25 y el 2%. El límite inferior es utilizado para losas con bajas solicitaciones y el límite superior para aplicaciones de seguridad o militares. En algunos casos extraordinarios con HPFRC se llega a utilizar entre un 2 y un 15% (Naaman, 2000).

Con volúmenes de fibras inferiores al 0.5% y fibras de esbeltez inferior a 50, el incremento de la resistencia a rotura a flexotracción puede ser despreciable (ACI 544.4R-88, 2009). Por lo tanto, se requiere de un contenido mínimo de fibras, que resultará menor a medida que aumente la capacidad adherente y la esbeltez de las fibras (Hannant, 1978). Se propone (Johnston, 1974):

$$V_{f \text{ min}} \cdot \lambda \approx 30$$

Para fibras de igual longitud, la reducción en el diámetro aumenta el número de ellas por unidad de peso y hacen más denso el entramado o red de fibras. El espaciamiento entre fibras se reduce cuando la fibra es más fina,

siendo más eficiente y permitiendo una mejor redistribución de la carga o de los esfuerzos (Anejo 14 EHE, 2008).

Rossi (2000) plantea que el efecto de las fibras en las diferentes etapas del proceso de fisuración del hormigón se refleja a dos escalas: material y estructural. Así, en la fase de fisuración aleatoria, las fibras cosen las fisuras activas y retardan el desarrollo, incrementando la resistencia y la ductilidad a escala del material, mientras que en la etapa en que las macrofisuras se propagan las fibras también cosen las fisuras y así aportan mayor capacidad resistente y ductilidad a escala estructural.

Cuando se requiere que las fibras actúen en las microfisuras, se debe adicionar un gran número de fibras y su diámetro debe ser pequeño. La trabajabilidad del material, que está mucho más ligado a la relación l/d , conduce a preferir fibras cortas. Por otro lado, para controlar las macrofisuras las fibras deben ser lo suficientemente largas para estar adecuadamente ancladas en la matriz, si bien por requerimientos de trabajabilidad las fibras largas deben ser usadas en menores proporciones que las cortas.

En definitiva, la resistencia a tracción y la ductilidad del material pueden ser incrementadas empleando una alta proporción de fibras cortas y, para mejorar la capacidad resistente y la ductilidad de la estructura, se debe añadir una cierta cantidad más baja de fibras largas (Rossi, 2000).

2.2.2. ELABORACIÓN DEL SFRC

Las fibras de acero actúan en la masa de hormigón como elementos rígidos, de gran área superficial y geometría muy esbelta, mejorando algunas propiedades en estado endurecido y exigiendo modificaciones en los procesos tradicionales de dosificación, fabricación, transporte, vertido, compactación y acabado (ACHE, 2000).

El hecho de adicionar fibras al hormigón tiene un peso importante en el costo total del SFRC, por lo que se hace necesaria la optimización de la dosificación para emplear la cantidad estrictamente necesaria de fibras y así obtener un material que sea más atractivo comercialmente.

Cuando la cantidad de fibras a adicionar es baja (20-30 kg/m³), los SFRC pueden ser trabajados sin realizar ninguna modificación sobre las exigencias establecidas para un hormigón tradicional. A medida que aumenta la cantidad de fibras a dosificar, la exigencia a los ajustes necesarios es mayor.

Por medio del ensayo del maneabilímetro, Baron y Lesage (1976) desarrollaron una metodología para la optimización de dosificaciones de hormigones tradicionales, que ha sido aplicada al SFRC (Serna (1984²) y Massicotte (2000²)), del siguiente modo:

1. Selección de los parámetros constantes de la mezcla: A/C, tamaño máximo de árido, tipo y volumen de fibras.

2. Determinación del valor óptimo de la relación grava/arena (Gr/Ar) como aquella para la que se obtiene el menor tiempo de flujo cuando la cantidad empleada de aditivo superplastificante permite una trabajabilidad adecuada.
3. Ajuste del volumen de pasta, aditivos y adiciones: a partir del valor óptimo de Gr/Ar se varía el volumen de pasta y se ajusta el volumen de superplastificante y de las otras adiciones.

Amasado

Se debe evitar a toda costa la formación de pelotas de fibras o de fibras y mezcla, también conocidas como erizos (spalling). Para evitar la formación de pelotas y lograr una buena dispersión de las fibras se recomienda adicionarlas a una mezcla ya fluida (ACI 544.3R-08, 2008), dosificar los hormigones con suficiente contenido de árido fino, no emplear fibras muy esbeltas y evitar tiempos de transporte excesivamente largos.

Cuando se prevea un transporte largo, puede plantearse la adición de las fibras en obra. El vertido de las fibras se debe realizar lentamente, entre 20 y 60 kg por minuto, con la amasadora girando a su máxima velocidad hasta garantizar la distribución homogénea de las fibras en la masa de hormigón (Anejo 14 EHE, 2008).

Pueden emplearse diferentes metodologías para fabricar los SFRC, la elección depende principalmente del tipo de aplicación que se va a realizar, del tipo y contenido de las adiciones, de los recursos disponibles y/o del sistema de colocación.

Una opción consiste en fabricar el hormigón como se realiza tradicionalmente sin adicionarle las fibras: en ACI 544.3R-08 (2008) se recomienda que el asiento en Cono de Abrams sea entre 50 y 75 mm mayor que el cono final deseado, mientras que ACHE (2000) propone que sea entre 20 y 40 mm mayor.

La experiencia ha mostrado que para lograr una dispersión adecuada de las fibras en un SFRC con un contenido en fibras hasta de un 1% por volumen, es necesario un cono de por lo menos 180 mm antes de adicionar las fibras (Cochrane, 2003). Con la amasadora funcionando a su máxima velocidad se le adicionan las fibras al hormigón, poniendo especial cuidado en que se de una distribución homogénea. Es recomendable emplear una malla de 100 mm de luz para que las fibras pasen por ella y se dispersen antes de incorporarse a la mezcla de hormigón. Después de que todas las fibras han sido introducidas, la amasadora debe girar a su velocidad normal de amasado.

El método anterior es usualmente empleado para trabajos menores. Sin embargo, si se van a emplear cantidades de hormigón considerables se recomienda adicionar las fibras a la amasadora a medida que se adicionan los áridos y luego continuar con el proceso tradicional de fabricación del hormigón.

Este método no requiere de tanto cuidado como el anterior, pero igualmente se debe garantizar que se de una distribución homogénea.

Consistencia

Mediante ensayos experimentales se ha constatado que la consistencia del SFRC resulta restringida con la adición de fibras en función del volumen de fibras adicionado y su esbeltez (Yazici et al., 2007).

La consistencia se puede evaluar con los siguientes métodos: Cono de Abrams (UNE-EN 12350-2:2006, ASTM C143/C143M-09), Tiempo de Flujo en el Cono Invertido (UNE 83503:2004), Consistómetro VeBe (UNE-EN 12350-3:2009) y Maneabilímetro (NF P18-455:2003).

Partiendo de que la presencia de las fibras restringe la fluidez de la matriz, es importante evaluar la consistencia de los SFRC con métodos dinámicos como el Cono Invertido, el Consistómetro VeBe y el Maneabilímetro.

En la Figura 2.4 puede observarse que para un mismo asiento en el Cono de Abrams, el tiempo necesario de vibrado en el Cono Invertido de un SFRC es menor que el de un hormigón tradicional.

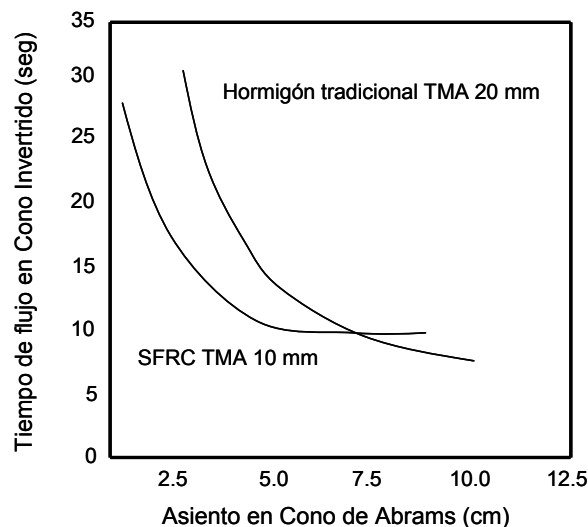


Figura 2.4. Correspondencia de valores de Cono de Abrams y Cono Invertido (ACHE, 2000).

Las Figuras 2.5 y 2.6 muestran la influencia de la esbeltez de las fibras, del tamaño máximo de árido y del contenido de fibras sobre la consistencia medida con el Consistómetro VeBe. Así, se define como volumen crítico de fibras aquel valor que hace imposible la correcta compactación de los SFRC.

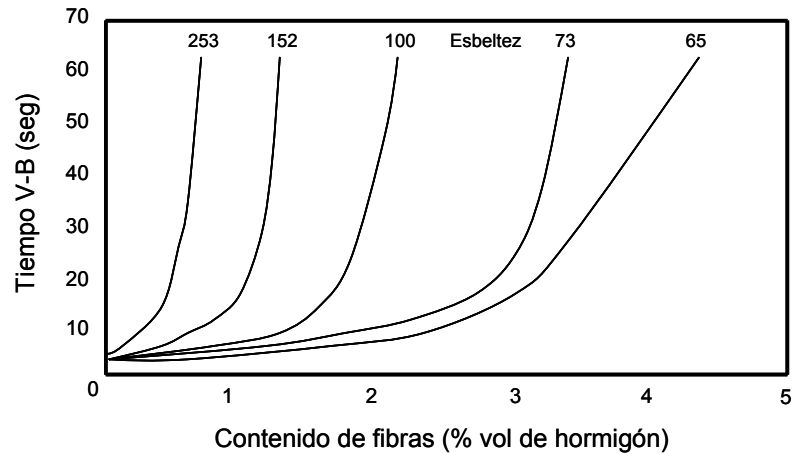


Figura 2.5. Efecto de la esbeltez de las fibras sobre la consistencia del hormigón evaluada con el Consistómetro VeBe (Hannant, 1978).

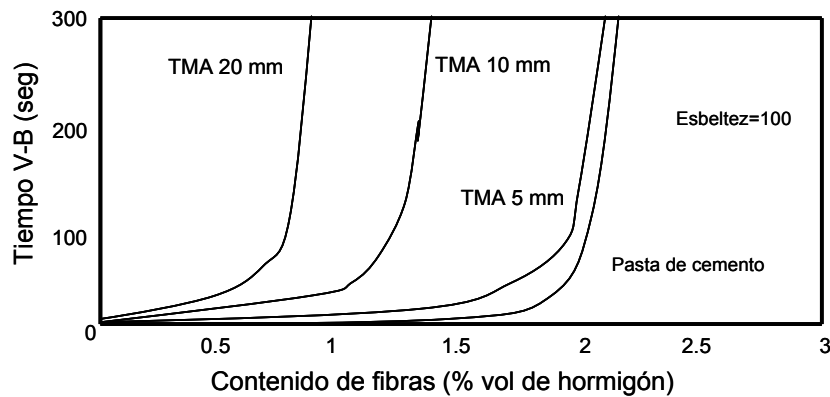


Figura 2.6. Influencia del tamaño máximo de árido sobre la consistencia del hormigón evaluada con el Consistómetro VeBe (Hannant, 1978).

Puesta en obra

Generalmente los SFRC son menos dóciles que los hormigones tradicionales y demandan mayor energía en la compactación. Es necesario utilizar vibrador y no se debe emplear barra para picar el SFRC.

Cuando se emplean vibradores internos, las fibras tienden a orientarse alrededor del vibrador, lo que puede provocar distribuciones circulares y dar lugar a contenidos de fibras y orientaciones heterogéneas entre puntos próximos del elemento.

Los vibradores externos son más recomendados, principalmente cuando se trabaja con piezas de pequeñas dimensiones.

Curado

Los cuidados en el curado son esencialmente los mismos que en el caso de un hormigón tradicional, con el agravante de que las principales ventajas

que se obtienen con la adición de fibras al hormigón están directamente relacionadas con el incremento de la tenacidad, propiedad particularmente sensible al proceso del curado.

2.2.3. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL SFRC

Resistencia a compresión

Es de común aceptación que la adición de fibras al hormigón no conlleva un incremento significativo de la resistencia del hormigón a compresión, si bien suelen producirse ligeros incrementos o incluso descensos de ésta. Yazici et al. (2007) en SFRC con fibras de esbeltez 45, 65 y 80, y volúmenes de fibras de 0.5%, 1.0% y 1.5% encontraron incrementos de la resistencia a compresión entre 4-19% respecto de hormigones idénticos sin fibras.

En hormigones jóvenes (antes de los 28 días) la capacidad de mantener la carga máxima a compresión se incrementa significativamente con la adición de fibras, a medida que madura el hormigón este incremento se reduce y la capacidad de absorción de energía y la ductilidad se concentran principalmente en la región post-fisura (Ding y Kusterle, 2000).

Cuanto menor es el tamaño de las probetas se obtienen mayores resistencias a compresión, debido a que acentúan un alineamiento preferente de las fibras. El efecto se hace mucho más sensible a medida que se aumenta la longitud de la fibra (ACI 544.3R-08, 2008). Probetas con mayor esbeltez soportan tensiones sensiblemente mayores, pero presentan respuestas menos dúctiles a compresión (Figura 2.7). Se debe tener especial cuidado con estas situaciones para no generar falsos panoramas con resultados excesivamente optimistas.

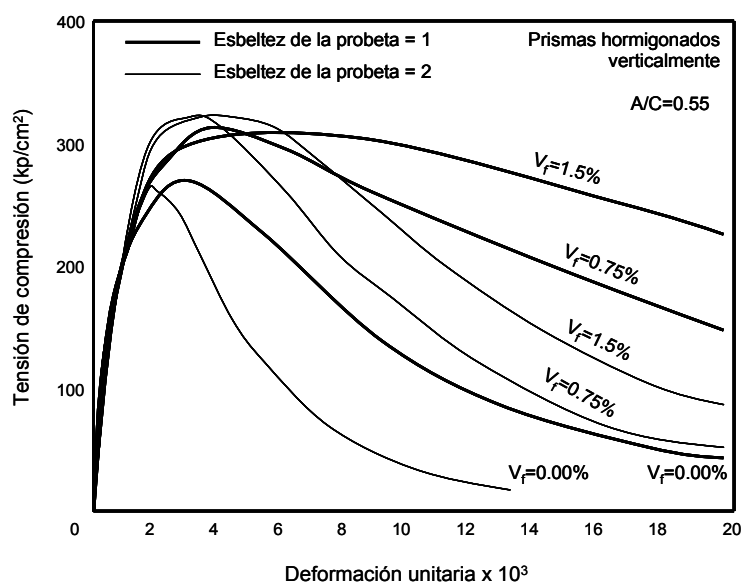


Figura 2.7. Respuesta a compresión simple de SFRC con diferentes V_f y con diferente esbeltez de probeta (ACHE, 2000).

Módulo de deformación

El módulo de deformación para los SFRC con contenidos habituales de fibras ($V_f < 1\%$) no presenta modificaciones significativas respecto al de los hormigones tradicionales. Generalmente se adopta un módulo de deformación igual al de la matriz o se efectúa una estimación de su valor mediante el uso de formulaciones que relacionan la resistencia a compresión con el módulo de deformación (Dehouse, 1975).

Aplicando la teoría de los materiales multifase y dado que se trata de fibras cortas aleatoriamente distribuidas en una masa, se establece que (Tan et al., 1994²):

$$E_{cf} = (1 - \eta_1 \eta_0 V_f) E_c + \eta_1 \eta_0 V_f E_f$$

Donde:

- E_{cf} : módulo de deformación del SFRC.
- E_c : módulo de deformación del hormigón sin fibras.
- E_f : módulo de deformación de las fibras.
- V_f : volumen de fibras.
- η_1 : factor de eficiencia de las fibras en función de su longitud.
- η_0 : factor de orientación de las fibras.

Resistencia a tracción

En el diagrama tensión-deformación a tracción directa del SFRC, las fibras rigidizan sensiblemente la respuesta en fase de pre-fisura respecto de la de un hormigón tradicional y, de forma destacada, aportan una capacidad de resistencia residual post-fisura debida el efecto de cosido entre las dos caras de la fisura (Figura 2.8).

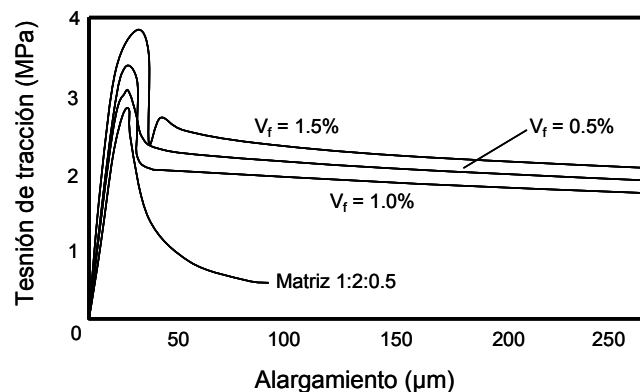


Figura 2.8. Curvas tensión de tracción-alargamiento de morteros en función del V_f a tracción directa (ACI 544.1R-96, 2009).

El efecto más importante en el comportamiento mecánico del hormigón, debido a la presencia de las fibras, se manifiesta en la resistencia a tracción post-fisura. La resistencia a tracción post-fisura, a su vez, afecta a muchas otras propiedades mecánicas como la adherencia de armaduras, la resistencia a cortante, la fatiga, etc. (Massicotte, 2000¹).

Adicionando fibras en un 1.5% por volumen en hormigones o morteros se obtienen incrementos en la resistencia a tracción directa del orden del 30-40% (ACI 544.1R-96, 2009).

Según Naaman (2000), la resistencia a tracción del SFRC se puede estimar mediante:

$$\sigma_{PC} = \Lambda \cdot \tau \cdot V_f \frac{l_f}{d}$$

Donde:

- σ_{PC} : tensión máxima después de fisurar el hormigón.
- Λ : coeficiente (longitud esperada de arrancamiento, factor de orientación, factor de reducción de grupo asociado con un número de fibras traccionadas por unidad de área).
- τ : tensión de adherencia fibras-matriz.
- V_f : volumen de fibras.
- $\frac{l_f}{d}$: esbeltez de las fibras.

Naaman (2000) introduce una nueva consideración en la anterior expresión: se consideran todas las fibras circulares y las que no lo son se relacionan con un círculo de diámetro equivalente que presenta la misma área. Para tener en cuenta la forma de la fibra, se plantea la siguiente expresión:

$$\sigma_{PC} = \frac{\Lambda}{4} \tau \cdot V_f \frac{\psi \cdot l_f}{A_f}$$

Donde:

- Λ : coeficiente (longitud esperada de arrancamiento, factor de orientación, factor de reducción de grupo asociado con un número de fibras traccionadas por unidad de área).
- τ : tensión de adherencia fibras-matriz.
- V_f : volumen de fibras.
- ψ : perímetro de la fibra.
- A_f : área de la sección transversal de la fibra.

Una forma de caracterizar la influencia del índice $\frac{\psi}{A_f}$ es por medio de una variable definida como el índice de eficiencia intrínseca de la fibra (FIER).

$$FIER = \frac{\psi \cdot l_f}{A_f}, \quad \text{entonces } \sigma_{PC} = \frac{\Lambda}{4} \tau \cdot V_f \cdot FIER$$

Si se incrementa V_f se obtendrán valores mayores de σ_{PC} , pero este incremento conduce inevitablemente a matrices elaboradas solamente con partículas finas, sin árido grueso, lo que implica módulos de deformación menores.

Mejorando τ (texturizando las fibras, conformando sus extremos, con fibras retorcidas, entre otras) también se consiguen incrementos de σ_{PC} . Es importante garantizar que las medidas que se tomen para incrementar la tensión de adherencia de las fibras en el hormigón τ , mantengan un mecanismo de rotura del hormigón por arrancamiento de las fibras y no por rotura de éstas.

La tenacidad del SFRC a tracción directa se potencia debido a la energía disipada por el rozamiento fibras-matriz, a la flexión de las fibras inclinadas ancladas a ambos lados de las fisuras y a la multifisuración (ACI 544.4R-88, 2009).

Resistencia a flexión

El incremento de la resistencia a flexotracción al adicionar fibras de acero al hormigón es considerablemente mayor que el de la resistencia a compresión y a tracción. Esto se debe al comportamiento dúctil del SFRC en la zona fisurada por tracción, desarrollando resistencias residuales (Figura 2.9) (Hannant, 1978).

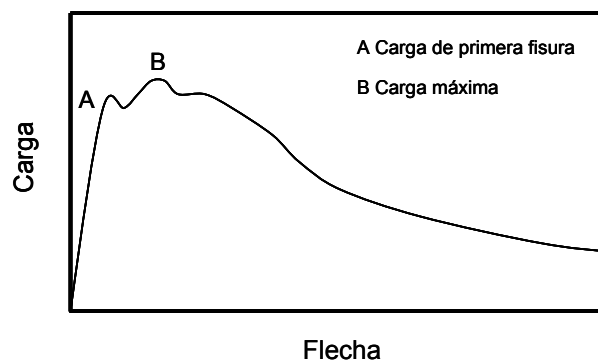


Figura 2.9. Curva carga-flecha a flexotracción para un SFRC (ACHE, 2000).

Los ensayos de flexotracción en SFRC se realizan principalmente sobre probetas prismáticas. Normalmente, se determina la resistencia a primera fisura, la resistencia a rotura por flexotracción y la resistencia residual a flexotracción.

Para contenidos habituales de fibras (0.5 a 1%) el incremento de la resistencia a primera fisura obtenido con la adición de fibras de acero es mínimo, lo cual indica que esta propiedad depende básicamente de la matriz y muy poco del contenido de fibras, del tamaño y de la forma de éstas, por lo que resulta más rentable mejorar las características de la matriz con el uso de, por ejemplo, aditivos, humo de sílice, entre otros (ACHE, 2000).

Desarrollando un programa de ensayos a flexotracción en prismas de SFRC de 100x100x600 mm con fibras de esbeltez 45, 65 y 80, y volúmenes de fibras de 0.5%, 1.0% y 1.5%, Yazici et al. (2007) han encontrado incrementos en la resistencia a flexión entre un 3% y un 81%, respecto de un hormigón de control sin fibras.

La resistencia a rotura depende principalmente del volumen de fibras y de la esbeltez de éstas, logrando incrementos de hasta el 100% respecto de la resistencia de la matriz, si se utilizan fibras de extremos conformados (Giménez, 1987).

El empleo de mayores volúmenes de fibras, ensayos con sistemas de carga en el centro de la luz, probetas de menores dimensiones, fibras de mayores longitudes con orientación preferencial (cuando el ancho y/o la altura es menor que tres veces la longitud de las fibras) en la dirección longitudinal del elemento, da lugar a mayores incrementos en la resistencia, llegando hasta valores del 150%. Con contenidos de fibras bajos y fibras de esbeltez baja, no es de esperar incrementos significativos de resistencia (Hannant, 1978).

Los ensayos con orientación preferencial son representativos cuando se experimenta una orientación similar en el elemento en el que se empleará el hormigón.

Tenacidad

Según Banthia y Trottier (1995) la variable que más influye en la tenacidad es la capacidad adherente de las fibras.

La tenacidad es tradicionalmente cuantificada como el área bajo la curva carga-flecha obtenida experimentalmente. El ensayo de tracción directa, por la dificultad que implica realizarlo, no es muy empleado para evaluar esta propiedad. El ensayo de flexotracción, además de ser más simple que el de tracción directa, simula las condiciones de carga para muchas aplicaciones prácticas.

La curva carga-flecha depende principalmente de las dimensiones del elemento (ancho, alto y longitud), de la configuración de carga (punto medio o a tercios), del criterio de control del ensayo (carga, flecha, abertura de fisura, carrera de la prensa, etc.) y de la velocidad de carga. Los métodos de ensayo más utilizados evalúan la tenacidad mediante una flecha máxima establecida o con unos índices de tenacidad (I_t) en función de diferentes valores de flecha obtenidos como múltiplos de la flecha a primera fisura.

El valor de los I_f , depende principalmente del contenido de fibras, del tipo y de la esbeltez de éstas y poco o nada de que la matriz sea hormigón o mortero, es decir, los índices reflejan principalmente el incremento de tenacidad debido a las fibras y no a cualquier otro mecanismo como por ejemplo el incremento de la resistencia a primera fisura (ACI 544.4R-88, 2009).

Otras características mecánicas

Cortante y torsión:

Las fibras de acero en el hormigón generalmente aumentan la resistencia a cortante y torsión, aunque la gran mayoría de investigaciones se han centrado en evaluar estas propiedades mecánicas en elementos de SFRC armado.

El comportamiento del SFRC a cortante ha sido estudiado por Serna (1984¹), Barragán (2002), Meda et al. (2005) y Minelli y Plizzari (2008).

Barragán (2002), de ensayos experimentales de vigas de SFRC armadas, concluye que las fibras propician una fisuración más distribuida y además, incrementan la capacidad de carga última a cortante.

El empleo de sistemas combinados de refuerzo (fibras y estribos) conduce a notables incrementos en la ductilidad, aunque con aumentos resistentes a cortante poco significativos (del 0% al 15% para hormigones ordinarios y de alta resistencia, respectivamente) respecto de las vigas con solo estribos como armadura de cortante (Valle y Büyüköztürk, 1993).

Cargas dinámicas:

El comportamiento del SFRC ante impactos ha sido estudiado por Almansa y Canovas (1999), Wang et al. (2008) y Mohammadi et al. (2009).

Una de las principales características del SFRC es su resistencia a los impactos por absorción de energía, siendo en este caso su resistencia de 3 a 10 veces la resistencia del hormigón en masa (ACI 544.4R-88, 2009). Además, el SFRC presenta una menor tendencia a la desfragmentación y el desprendimiento. Todo lo anterior se debe a la sensibilidad de la matriz, a la resistencia de las fibras al arrancamiento y a la deformación.

Punzonamiento:

Al emplear volúmenes de fibras superiores al 0.5% se han experimentado roturas por punzonamiento más graduales y dúctiles, con un incremento considerable de la fisuración previa al agotamiento y de la resistencia después de la fisuración, en función del contenido de fibras, la esbeltez y la capacidad adherente de éstas. Las fibras permiten aumentar la

resistencia a la rotura por punzonamiento, habiéndose obtenido incrementos de hasta un 42% (ACI 544.4R-88, 2009).

Adherencia fibras-matriz:

La adherencia fibras-matriz es el fenómeno que gobierna el comportamiento del SFRC después de la fisuración, cuando las fibras cosen las fisuras retrasando y haciendo más dúctil el fenómeno de agotamiento del material compuesto. Entonces se entiende la importancia de la adherencia química, mecánica y del rozamiento que comienza tras el despegue total de las fibras. Para elevar la absorción de energía se debe propiciar fenómenos de arrancamiento (pull-out) y evitar la rotura de las fibras.

La adherencia aumenta con la esbeltez de las fibras. Se ha comprobado que utilizando fibras de extremos conformados, la resistencia al arrancamiento de tres fibras de esbeltez igual a 100 es un 50% mayor que la obtenida al ensayar una sola fibra de esbeltez igual a 75 y con el mismo volumen que el conjunto de las tres fibras anteriores (Giaccio et al., 1986).

Se han comparado tres tipos de fibras elaboradas del mismo material y con la misma área, una circular recta, otra circular con extremos conformados y una tercera triangular retorcida. Realizando ensayos de tracción a una sola fibra, se encontró que la fibra triangular retorcida dio una resistencia de adherencia un 400% y 200% mayor que la fibra recta y que la de extremos conformados, respectivamente. Además, la energía de arrancamiento fue 2.5 veces mayor en el caso de la fibra triangular respecto de la conformada (Naaman, 2000).

Adherencia SFRC-armadura:

Las fibras confinan (resistencia extra frente a dilatación o expansión) el hormigón aumentando la resistencia al inicio y en la propagación de las fisuras principales y de las microfisuras internas de adherencia (Swamy, 1985). Con ello se mantiene la integridad del hormigón en un entorno próximo de las armaduras después de haberse alcanzado la tensión máxima de adherencia. Por consiguiente, se experimentan incrementos en la capacidad adherente de las armaduras pasivas y una menor degradación de la capacidad de respuesta tras alcanzarse la tensión máxima, lo que se traduce en cierta resistencia residual, en mayores deslizamientos y en mayor absorción de energía, es decir, un comportamiento más dúctil y con menor tendencia al agotamiento por splitting del hormigón (Soroushian y Bayasi, 1990). Las fibras influyen más si las barras son corrugadas (pues son mayores la fisuración interna y las presiones radiales), cuanto mayor es el diámetro de las barras, con barras hormigonadas en vertical (por la favorable orientación de las fibras) y si las fibras son de adherencia mejorada (Swamy, 1974).

La adherencia de armaduras pretensas en SFRC ha sido estudiada por Martí et al. (2008). Los resultados obtenidos en ensayos realizados con cordones de pretensado de siete alambres han puesto de manifiesto que, respecto de los hormigones tradicionales, en SFRC resultan longitudes de

transmisión menores y longitudes de anclaje mayores. También han constatado que el efecto de reducción de la longitud de transmisión con el aumento de la edad de destesado es más acusado en el caso del SFRC y que, como era de esperar, se consigue una mejor transmisión del pretensado en SFRC cuando se produce fisuración durante el destesado. Finalmente apuntan que es necesario realizar más estudios para generalizar las conclusiones obtenidas.

Durabilidad del SFRC

La adición de fibras de acero en el hormigón genera comportamientos mecánicos caracterizados por presentar un mayor número de fisuras con menores valores de abertura de fisura, factor importante en los requerimientos de durabilidad.

Uno de los aspectos más preocupantes es la corrosión. En hormigones sin fisuras se ha constatado que la corrosión de las fibras se limita a la superficie del hormigón. Una vez que la superficie está corroída, el efecto de la corrosión no se propaga más de 2 mm a partir de la superficie. Las fibras muestran una buena resistencia a la corrosión en elementos no fisurados, aun cuando los elementos se encuentren expuestos a agua de mar (Serna y Arango, 2008) (ACI 544.1R-96, 2009). Mediante análisis de rayos X y microscopía electrónica, se ha observado que las reacciones entre el SFRC y el agua de mar se limitan a unos pocos milímetros bajo la superficie del hormigón. Estos cambios microquímicos aparentemente no tienen ningún efecto negativo en la durabilidad y el comportamiento del hormigón bajo cargas sostenidas en ambiente marino (O'Neil et al., 1999).

Cuando se emplean fibras con recubrimiento de zinc, se ha experimentado efectos positivos frente a la corrosión (Nemegeer et al., 2000), tanto desde el punto de vista estético como mecánico (Serna y Arango, 2008).

Granju (2005) ha detectado incrementos en la resistencia a flexotracción en elementos fisurados sometidos a ambientes marinos, efecto que atribuye al autocurado (autohealing) del hormigón y a la leve corrosión de las fibras que hace que la superficie sea menos limpia y más rugosa, haciendo el deslizamiento más difícil y generando ese incremento adicional.

Respecto de la carbonatación, la profundidad de penetración depende del hormigón, no del hecho de tener o no fibras (Nemegeer et al., 2000).

El uso de fibras para reforzar el hormigón no reduce la necesidad de inclusión de aire para resistir los efectos de los ciclos hielo-deshielo en ambientes severos (O'Neil et al., 1999).

2.2.4. ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE SFRC

Diferentes ensayos para determinar las características mecánicas del SFRC han sido propuestos, desarrollados y modificados con el fin de conseguir

ensayos apropiados para caracterizar propiedades relevantes necesarias para la realización de análisis racionales y diseños de elementos de SFRC.

En los SFRC, la capacidad de un ensayo de representar el comportamiento del material en una aplicación definida, depende de la distribución y orientación de las fibras y de la relación entre las dimensiones de la probeta y las del elemento estructural de la aplicación.

Ensayo de tracción

El ensayo de tracción directa es conceptualmente la forma más sencilla de conocer el comportamiento mecánico del SFRC a tracción (Figura 2.10), pero su ejecución entraña diversas dificultades. El problema principal es que la rotura se presenta en muchos casos en los extremos de la probeta, debido a las concentraciones de tensiones y a las tensiones multiaxiales (Gettu et al., 2001).

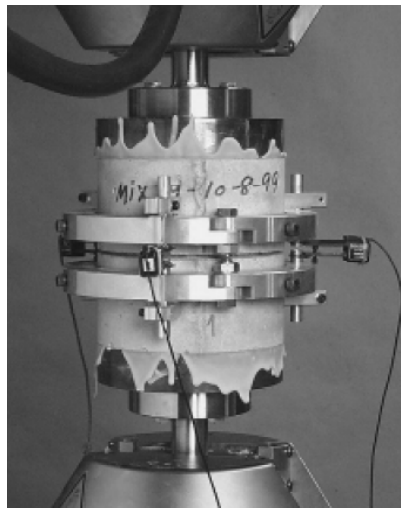


Figura 2.10. Ensayo a tracción uniaxial (Stang et al., 2000).

Otros ensayos han sido llevados a cabo sin mucho éxito, intentando reemplazar el de tracción directa. El ensayo de tracción indirecta o ensayo Brasileño (Figura 2.11) ha sido empleado para determinar indirectamente la resistencia a tracción del SFRC (Wafa y Ashour, 1992). Se considera inapropiado para los SFRC (ACI 544.2R-89, 1989), básicamente por tres razones: el área de carga para grandes deformaciones se incrementa continuamente dando lugar a incrementos de carga (que no son asumidos por las fibras) cuando la matriz ya ha fisurado, el ensayo es inestable para ser controlado por desplazamientos, y la probeta tiene una longitud considerable que hace que la medida de la abertura de fisura y el control de estabilidad sea complicado.

El empleo del ensayo de tracción indirecta, por su simplicidad en términos de probeta y equipo necesario para su realización, hace que sea interesante y que se hayan formulado soluciones a los problemas encontrados. Así, se ha limitado el área de aplicación de la carga a un ancho constante

(Carmona et al., 1998) (Barragán, 2002), se ha propuesto medir la deformación transversal (cuando ésta se mide a través del plano de la fisura, se puede tomar como abertura de fisura) y emplearla como criterio de control (Cho et al., 1992), y se ha reducido la longitud de la probeta para lograr ensayos más estables.

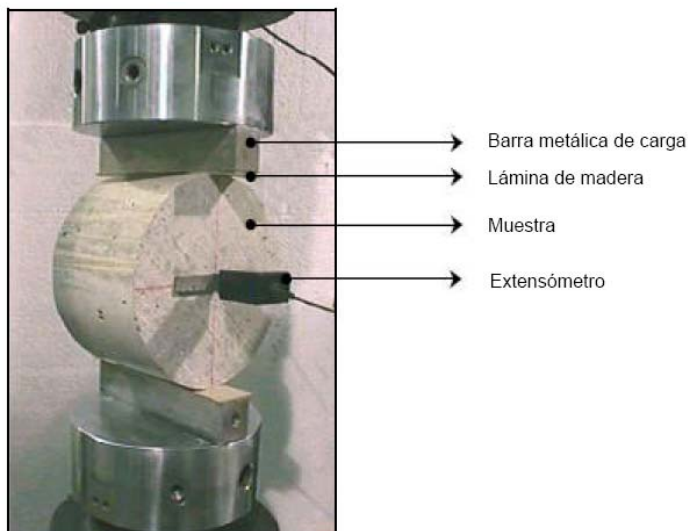


Figura 2.11. Ensayo a tracción indirecta para SFRC (Barragán, 2002)

Ensayos de flexotracción

Este es por excelencia el ensayo de caracterización de las propiedades mecánicas del SFRC y en su momento el sustituto del ensayo de tracción directa. En esencia se trata de ensayar un prisma apoyado en dos puntos y con algunas variaciones en función de la normativa empleada y de lo que se pretenda obtener. Este ensayo presenta el inconveniente de que no resulta adecuado para evaluar hormigones de estructuras ya existentes, debido a la dificultad de obtener probetas de la geometría y dimensiones requeridas.

Los ensayos más empleados y que son de interés para esta investigación son los siguientes:

- UNE-EN 14651:2007+A1:2008.
- NBN B 15-238.
- UNI 11039-2.
- JCI-SF4.
- ASTM C1609/C1609M-07.
- ASTM C1399/C1399M-10.

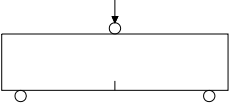
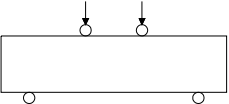
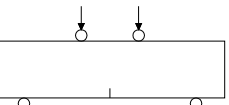
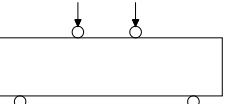
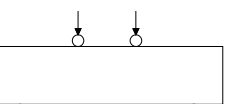
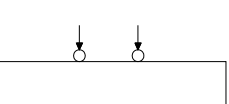
Los principales parámetros que varían entre los diferentes procedimientos son:

- Dimensiones de los elementos a ensayar (prismas).
- Distancia entre apoyos.
- Sistema de carga (centro de luz o a tercios).
- Control del ensayo (flecha y/o abertura de fisura).

El realizarlo de una u otra manera no es indiferente y trae consigo ciertas consideraciones importantes.

En la Tabla 2.3 se presenta una comparación de los principales parámetros para los ensayos más empleados.

Tabla 2.3. Comparación de las variables más significativas para los ensayos de flexotracción.

Ensayo	Esquema	Principales parámetros
UNE-EN 14651		<ul style="list-style-type: none"> - 150x150x550-700 mm - Luz=500 mm - Entalla. - Abertura de fisura o flecha. - Resistencia de primera fisura. - Resistencias residuales.
NBN B 15-238		<ul style="list-style-type: none"> - 150x150x600-750 mm - Luz= 450 mm - Flecha. - Resistencia de primera fisura. - Resistencias equivalentes. - Tenacidad.
UNI 11039-2		<ul style="list-style-type: none"> - 150x150x600 mm - Luz=450 mm - Entalla. - Abertura de fisura o flecha. - Resistencia de primera fisura. - Resistencias equivalentes. - Índices de ductilidad.
JCI-SF4		<ul style="list-style-type: none"> - 100x100x350 mm ($l_f \leq 40$ mm) - Luz=300 mm - 150x150x 500 mm ($l_f > 40$ mm) - Luz=450 mm - Flecha. - Resistencia de primera fisura. - Resistencias equivalentes. - Tenacidad.
ASTM C1609		<ul style="list-style-type: none"> - 100x100x350 mm - Luz=300 mm - 150x150x500 mm - Luz=450 mm - Flecha. - Resistencia de primera fisura. - Resistencias residuales. - Tenacidad.
ASTM C1399		<ul style="list-style-type: none"> - 100x100x350 mm - Luz=300 mm - Flecha. - Precarga sobre placa acero. - Recarga sin placa. - Resistencia residual media (ARS)

UNE-EN 14651

Se realiza una explicación detallada de este ensayo, ya que es el de aplicación en nuestro entorno.

Este ensayo está basado en la propuesta de ensayo del RILEM TC-162 (2002).

Este método de ensayo para FRC determina la resistencia a flexión en términos de límite de proporcionalidad (LOP) y resistencias residuales.

El método está concebido para fibras metálicas con longitud no superior a 60 mm; también puede ser empleado para combinaciones de fibras metálicas y combinaciones de fibras metálicas con otro tipo de fibras. Este ensayo no se debe emplear para hormigones con tamaño máximo de árido mayor que 32 mm.

El comportamiento a tracción de los FRC es evaluado en términos de los valores de resistencia residual a flexión, obtenida de la curva carga-CMOD (Crack Mouth Opening Displacement, abertura de los labios de la entalla) o de la curva carga-flecha, resultante de cargar un prisma entallado simplemente apoyado en el centro de la luz como se presentan en la Figura 2.12.

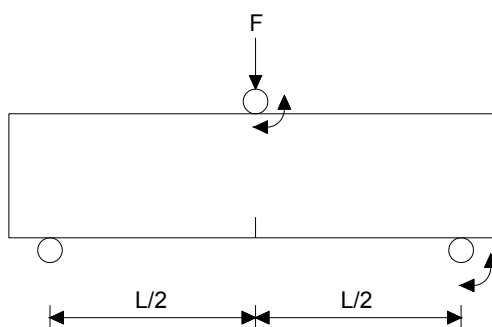


Figura 2.12. Montaje de ensayo a flexotracción según UNE-EN 14651.

Las probetas deben tener una sección de 150x150 mm y una longitud que esté entre 550 y 700 mm, para una distancia entre apoyos de 500 mm.

La entalla se debe realizar rotando la probeta 90° respecto de su posición de hormigonado. El ancho de la entalla debe ser de 5 mm o menos, y la entalla debe tener una altura de 25 mm.

El control del ensayo se debe realizar a una velocidad de incremento de CMOD constante de 0.05 mm/min desde el inicio del ensayo hasta llegar a un CMOD de 0.1 mm; de ahí en adelante se debe operar a 0.2 mm/min hasta finalizar el ensayo. El ensayo se da por terminado cuando el CMOD tenga un valor mínimo de 4 mm.

Si en algún ensayo se desarrolla alguna fisura fuera de la entalla, éste debe ser rechazado.

El límite de proporcionalidad o resistencia de primera fisura se calcula de la siguiente manera:

$$f_{ctL}^f = \frac{3 \cdot F_L \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2}$$

Donde:

- f_{ctL}^f : resistencia de primera fisura (MPa).
- L : distancia entre apoyos (mm).
- b : ancho de la probeta (mm).
- h_{sp} : distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta en la sección de centro de vano (mm).
- F_L : carga de primera fisura, definida como el mayor valor de la carga en el intervalo de CMOD de 0 a 0.05 mm (Figuras 2.13 y 2.14).

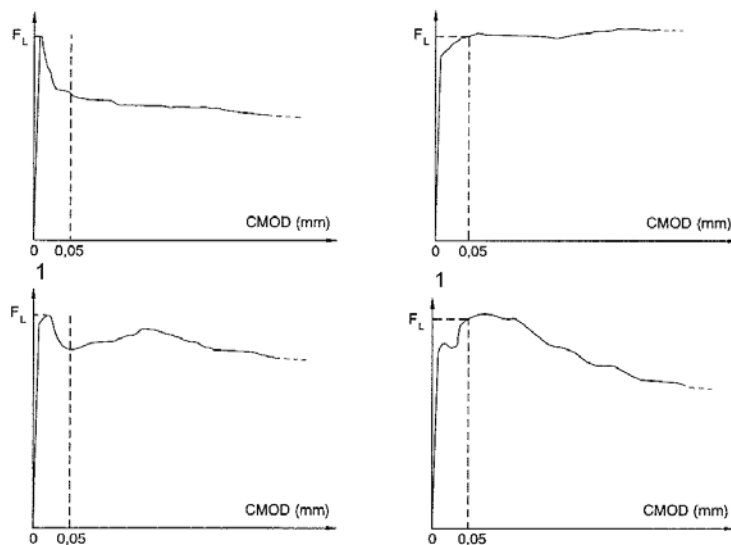


Figura 2.13. Curvas carga-CMOD, obtención de F_L según UNE-EN 14651.

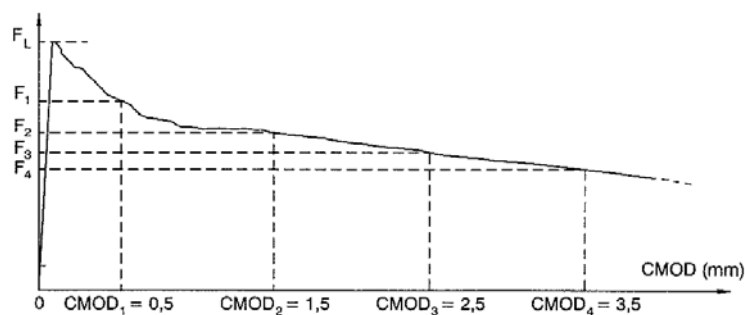


Figura 2.14. Curva carga-CMOD, indicando $CMOD_{1,2,3,4}$ según UNE-EN 14651.

La resistencia residual a flexión se obtiene empleando la siguiente expresión:

$$f_{Rj} = \frac{3 \cdot F_j \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2}$$

Donde:

$f_{R,j}$: resistencia residual a flexión (MPa).

L : distancia entre apoyos (mm).

b : ancho de la probeta (mm).

h_{sp} : distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta en la sección de centro de vano (mm).

F_j : carga correspondiente a valores de CMOD de 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5 mm, para valores de j de 1, 2, 3 y 4, respectivamente (Figura 2.14).

Comentarios sobre ensayos de flexotracción

Los resultados obtenidos en los ensayos de flexotracción en prismas cargados en el centro de la luz y a tercios (Figura 2.15), son muy similares. Realmente el sistema de carga en el centro de la luz tiende sutilmente a sobreestimar la resistencia a flexión y la tenacidad (debido al plano de fisuración predefinido y a la concentración de tensiones en el punto de carga) (Stang et al., 2000), mientras que en el ensayo con carga a tercios la rotura es libre de ocurrir en el tercio central del elemento, permitiendo el desarrollo de la rotura en el punto más débil de una región con tensiones uniformes.

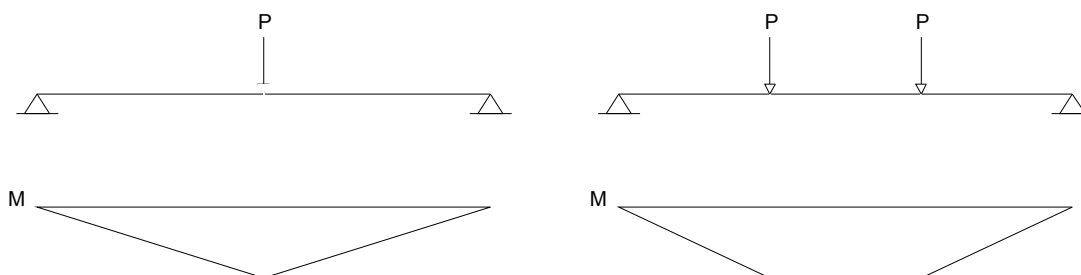


Figura 2.15. Esquemas de carga en ensayo de flexotracción.

Para los ensayos con carga a tercios, el hecho de tener un área de rotura mayor genera una falta de control sobre la posición de la fisura, resultando en ángulos de rotación diferentes en la fisura para una flecha central dada. Aunque la posición de la fisura permanece incontrolada para el ensayo con carga en el centro de la luz (sin entalla), el hecho de imponer una carga centrada da como resultado un pico marcado para la flexión alrededor del centro del prisma. De esta manera se produce generalmente el fallo muy cercano al centro de aplicación de dicha carga. El resultado es una rotación de fisura más constante para una flecha central dada.

Respecto de la tenacidad en ensayos con carga a tercios, se puede sobreestimar la energía de fractura verdadera del compuesto, particularmente si ocurren deformaciones no lineales en más de un punto (múltiple fisuración en el tercio medio del elemento).

Cuando se determina la flecha en los ensayos de flexotracción, la medida se debe tomar directamente sobre el elemento y con referencia a la fibra extrema en tracción. El control del ensayo en la región post-fisura,

empleando flechas, no siempre lleva a un control estable del ensayo (Saldivar, 1999).

El empleo de prismas entallados y el control del ensayo mediante la abertura de fisura (CMOD) generan un mejor control del ensayo, reducen la dispersión en los resultados y garantizan un plano de fisuración, reduciendo el impacto de los problemas en la región post-fisura ya comentados. La entalla demanda especial atención en el momento de interpretar los resultados, ya que genera concentración de tensiones en la zona de la entalla. Debido a esto, la resistencia a flexotracción (f_{ctL}^f) obtenida de ensayos con entalla es alrededor de un 10% menor que la obtenida en probetas sin entallar (Gettu et al., 2000) (Gettu et al., 2001).

Al realizar ensayos con entalla, registrando flecha y abertura de fisura, el costo del ensayo de flexotracción se incrementa alrededor de un 20%. El ensayo con entalla puede llegar a ser más competitivo en términos económicos si se mide únicamente la abertura de fisura, se realiza a una mayor velocidad y se logra reducir el número de probetas necesario para lograr resultados fiables (dados los menores coeficientes de variación que éste arroja respecto de los elementos sin entalla) (Gettu et al., 2001).

Ensayos en los que se mide la abertura de fisura a flexión y a tracción directa, son más útiles cuando el control de fisura juega un papel importante en el diseño. Ensayos en prismas con entalla que miden la abertura de fisura y/o la carga-flecha, arroja una propiedad indirecta del material que puede ser empleada para derivar en la respuesta tensión-abertura de fisura a tracción (Massicotte, 2000¹).

El ensayo de tracción es simple de interpretar, el de flexión necesita ser analizado. En el ensayo propuesto por ASTM C1609/C1609M-07, los resultados son cualitativos y no proveen al diseñador el tipo de información necesaria para obtener propiedades relevantes del material para el análisis y diseño, llevando en muchos casos a métodos de diseño empíricos.

Al comparar los parámetros propuestos por la norma NBN B 15-238 (1992) y la JCI-SF4 (1984) (f_{f300} y f_{f150}) con los propuestos por el RILEM TC-162 TDF (2002) ($f_{eq,3}$ y $f_{eq,2}$), no se identifica una relación clara. Los propuestos por RILEM dan generalmente valores menores y el efecto se acentúa a medida que se va a contenidos de fibras menores. De cualquier manera, la variación en los resultados es comparable (Gettu et al., 2001).

Empleando probetas con base de entre 150 y 300 mm de anchura, se ha constatado que no hay diferencia en las dispersiones de los resultados y que los valores obtenidos no tienen influencia significativa debida a los anchos de probeta (Gettu et al., 2001).

Otros ensayos

Ensayo Barcelona de doble punzonamiento

Saludes (2006) estudió la aplicación de este ensayo al SFRC. La Instrucción EHE 2008, en el Anejo 14, menciona como un posible procedimiento alternativo de control del SFRC el ensayo Barcelona de Doble Punzonamiento.

Este método tiene por objeto determinar la resistencia a primera fisura, tenacidad y resistencia residual a tracción indirecta del FRC sobre una probeta cilíndrica de igual diámetro que altura (150 mm) que se somete a un ensayo de doble punzonamiento mediante una carga transmitida según el eje central de simetría de la misma (Figura 2.16).

Al cargar se genera un estado triaxial bajo el disco de carga y una tracción perpendicular a los planos que contienen el eje de simetría de la probeta (Figura 2.16), lo que permite obtener un valor de resistencia a tracción (Saludes, 2006).

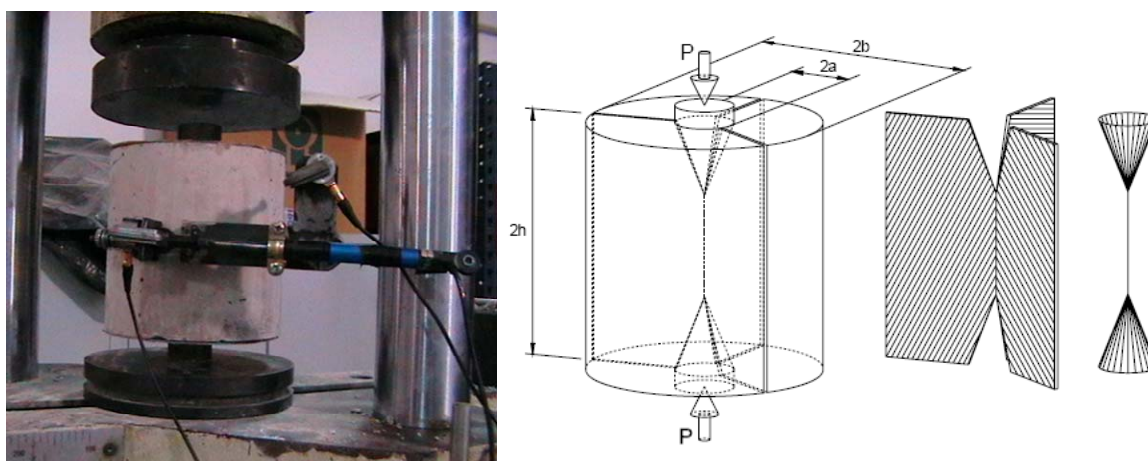


Figura 2.16. Ejecución ensayo Barcelona (izq.) y esquema idealizado del modo de rotura donde se pueden observar la formación de los planos radiales y los conos de rotura (der.) (Saludes, 2006).

Para realizar este ensayo se requiere una prensa de compresión, un equipo muy común en laboratorios de materiales. Emplea probetas cilíndricas, elementos muy comunes para el control de hormigones en obra o de fácil extracción en estructuras ya existentes (núcleos). Es necesario realizar una caracterización previa del material con otro ensayo como el de flexotracción y lograr una equivalencia con el ensayo Barcelona, cuando se desee hacer controles de obra.

Emplea una probeta que demanda alrededor 3 litros de hormigón y pesa alrededor de 7 kg, obteniendo en consecuencia una muestra de menor volumen y más manejable en laboratorio en comparación con otros métodos de ensayo.

Es un ensayo que presenta facilidad de montaje. La carga se aplica a velocidad controlada de elongación circunferencial de 1 ± 0.1 mm/min durante todo el ensayo, lo que hace que además sea un ensayo rápido de llevar a cabo.

El ensayo se realiza con las probetas sin refrentar, aplicando la carga directamente sobre la superficie de las caras de la probeta. Se produce en consecuencia una reducción del tiempo de preparación de la probeta y una mejora medioambiental al no ser necesaria la aplicación de un mortero de azufre.

ASTM C1550-08

Es un método de ensayo concebido para la obtención de la tenacidad a flexión de FRC (empleando paneles circulares cargados en su centro) (Figura 2.17).

Se emplean paneles circulares moldeados o proyectados de FRC, sometidos a una carga centrada y apoyados en tres puntos perimetrales simétricamente dispuestos. La carga es aplicada por medio de un pistón de acero con extremo redondeado. Se mide la carga, y la flecha en el centro del elemento.

Las medidas del panel deben ser de 75 mm de espesor y 800 mm de diámetro. Los apoyos constan de tres puntos en una circunferencia de 75 mm, simétricamente dispuestos (describiendo ángulos de 120°) (Figura 2.17).



Figura 2.17. ASTM C 1550, soporte (izq.) y disco ensayado (der.).

El ensayo se debe llevar hasta una flecha central mínima de 45 mm, y se considera válido cuando la rotura se da con tres fisuras radiales.

Se emplea principalmente para caracterizar hormigones con aplicación en placas que trabajen a flexión, losas apoyadas directamente al suelo, recubrimientos de túneles delgados y hormigones proyectados.

Una de las ventajas que presenta el panel es su gran superficie de rotura, llevando a una dispersión de resultados menor. Las zonas de fallo no

son inducidas por el sistema de carga sino que se dan libremente por las zonas más débiles (Dupont et al., 2004). Puede ser empleado para el diseño si se calibra con otras metodologías de ensayo.

Es un ensayo que en laboratorio requiere de cantidades considerables de hormigón para fabricar probetas, unos 38 litros por elemento, lo que a su vez lo hace un elemento muy pesado (de alrededor de 90 kg) que requiere de esfuerzo y cuidado para ser manipulado.

Los resultados obtenidos para flechas de 5 mm son representativos del comportamiento para niveles de deformación bajos, aplicables en elementos donde un control de fisura es importante. Con flechas de 40 mm, se pueden abordar aplicaciones en las que se permitan altos valores de deformaciones (aberturas de fisura generosas), como en estabilizaciones en minas y taludes, aplicaciones para las que este tipo de ensayos es ideal.

2.3. FLUENCIA DEL HORMIGÓN

Las deformaciones en el hormigón a lo largo del tiempo se representan en la Figura 2.18 donde se pueden distinguir las siguientes partes: deformación elástica (producto de la puesta en carga), retracción (compuesta por retracción autógena y de secado) y fluencia (compuesta por fluencia básica y de secado).

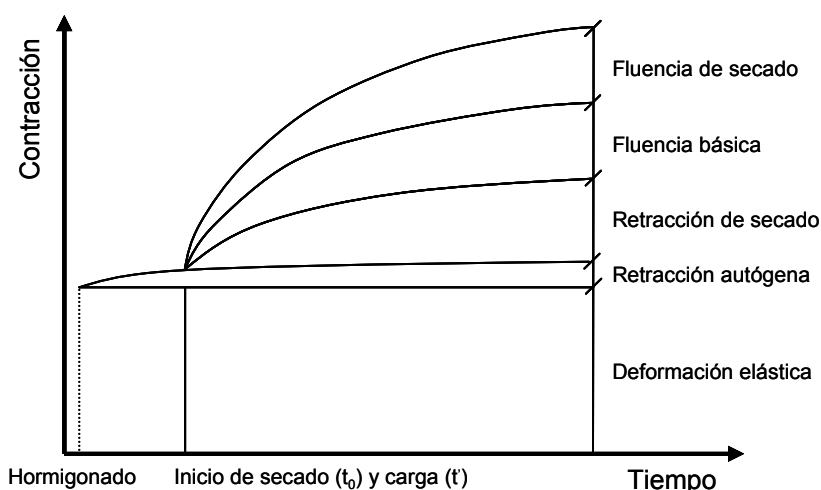


Figura 2.18. Deformaciones en el hormigón a lo largo del tiempo (López, 2005).

Como se puede ver en la Figura 2.18, los fenómenos de fluencia y retracción pueden darse simultáneamente. Estos se originan en la pasta de cemento y tienen tendencias similares a lo largo del tiempo. Ha sido muy común considerar los dos fenómenos como aditivos, asumiendo la deformación total de un elemento sometido a desecación y cargado como la suma de las deformaciones debidas a la retracción (igual en magnitud a las deformaciones de un elemento sin carga y sometido a las mismas condiciones de desecación) y a las sollicitaciones (fluencia). La anterior suposición, aunque no es del todo

correcta, es simple y funciona bien para muchas aplicaciones prácticas donde la fluencia y la retracción suceden simultáneamente (Neville et al., 1983).

2.3.1. FLUENCIA A COMPRESIÓN

El incremento de las deformaciones a lo largo del tiempo en el hormigón endurecido sometido a esfuerzos constantes es definido como fluencia por el ACI (ACI 209.1R-05, 2005).

Los primeros reportes sobre la fluencia del hormigón datan de 1905, cuando Ira H. Woolson realizó ensayos en una serie de columnas cortas materializadas con tubos de acero rellenos de hormigón, les aplicó diferentes niveles de carga sostenida y obtuvo como resultado grandes deformaciones; además observó que el hormigón había fluido tomando exactamente la forma del tubo de acero deformado y mantenía su solidez (Cochrane, 2003).

De una forma muy general, el fenómeno de fluencia en los materiales que llegan a rotura por este motivo, se desarrolla en tres etapas: fluencia primaria, fluencia secundaria y fluencia terciaria, tal y como se presenta en la Figura 2.19.

- En la etapa primaria se reduce la velocidad de deformación de fluencia con el paso del tiempo.
- En la etapa secundaria, también llamada fluencia estacionaria, se experimenta una velocidad de deformación de fluencia constante; cuando el fenómeno de fluencia no finaliza en rotura por deformaciones excesivas de fluencia, ésta es la etapa final.
- En la etapa terciaria (cuando se da), se experimenta un incremento en la velocidad de deformación de fluencia hasta llegar a la rotura.

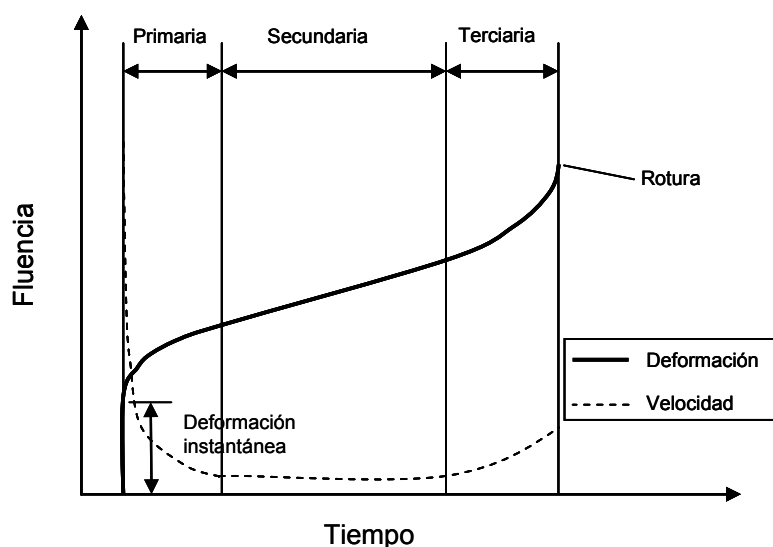


Figura 2.19. Representación de etapas del fenómeno de fluencia (López, 2005) (Neville et al., 1983).

En niveles normales de servicio en estructuras de hormigón, la fluencia primaria puede no diferenciarse de la secundaria, y la terciaria no existe. La velocidad de deformación de fluencia disminuye con el tiempo, pero nunca llega a cero (López, 2005).

La deformación en el instante de carga es principalmente elástica y corresponde al módulo de deformación a la edad en la que fue aplicada la carga. Con precisión, debido a que el módulo de deformación incrementa su valor y la deformación elástica disminuye con el tiempo, la fluencia debe ser considerada como una deformación en exceso de la deformación elástica en el instante a evaluar y no en exceso de la deformación elástica en el instante de aplicación de la carga. Ahora bien, ambos métodos son empleados debido a la pequeña diferencia existente entre ellos y a la conveniencia de considerar simplificada que el cambio en la deformación elástica con el tiempo es despreciable (Neville et al., 1983).

Las deformaciones en los materiales se pueden clasificar respecto de dos parámetros: el tiempo y la recuperación. Respecto del tiempo se tienen deformaciones instantáneas y diferidas, y respecto de la recuperación se tienen deformaciones reversibles e irreversibles. Esto lleva a cuatro tipos de deformación (López, 2005): deformación instantánea reversible (elástica), deformación instantánea irreversible (plástica), deformación diferida reversible (elástica retardada) y deformación diferida irreversible (viscosa). Las últimas dos deformaciones (elástica retardada y viscosa) son consideradas como la causa de la fluencia en el hormigón. También se ha asociado la deformación elástica retardada y viscosa con las etapas primaria y secundaria en la fluencia del hormigón, respectivamente.

Cuando se carga una pieza de hormigón, es muy complejo discriminar la deformación que corresponde a la deformación elástica instantánea y la que corresponde a la de fluencia incipiente, dado que la primera depende directamente de la velocidad de carga e incluye algo de deformación de fluencia (Fernández, 2002). Si la carga es aplicada extremadamente rápido, la fluencia incipiente es despreciable (las deformaciones registradas corresponden al módulo de deformación tangente).

Se debe saber que existe diferencia entre la deformación elástica en el instante de aplicación de la carga y la deformación instantánea al cargar, pues esta última incluye deformaciones que nunca serán recuperadas (Neville et al., 1983).

Al descargar un elemento, la recuperación de las deformaciones es de dos tipos: una recuperación instantánea y luego una recuperación en función del tiempo (Figura 2.20). La deformación recuperada elástica y de fluencia son menores que la deformación elástica inicial y la deformación de fluencia bajo carga, permaneciendo una deformación residual después de retirar la carga. Después de cargar, con el tiempo aumenta el módulo de deformación del hormigón, por lo que la deformación elástica será menor que la obtenida cuando se realizó la carga. Los hormigones cargados a edades muy avanzadas tienden a recuperar la totalidad de las deformaciones de fluencia.

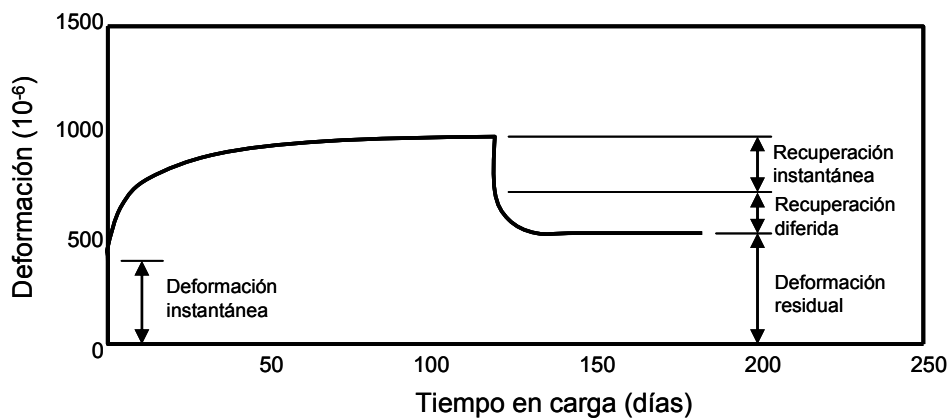


Figura 2.20. Deformación instantánea y recuperación al descargar (Neville et al., 1983).

Las deformaciones elástica y de fluencia se relacionan con el nivel de tensiones, obteniendo deformaciones elástica específica y fluencia específica.

La deformación elástica específica ε_{sp} se define como (ACI 209R-92, 2008):

$$\varepsilon_{sp} = \frac{\varepsilon_{el}(t_0)}{\sigma} = \frac{1}{E_c(t_0)}$$

Donde:

$\varepsilon_{el}(t_0)$: deformación elástica en el instante t_0 de aplicación de la carga.

σ : tensión aplicada.

$E_c(t_0)$: módulo de deformación a la edad t_0 .

La fluencia específica c_{sp} se define como la razón entre la deformación de fluencia y las tensiones aplicadas (ACI 209R-92, 2008):

$$c_{sp} = \frac{c(t, t_0)}{\sigma}$$

Donde:

$c(t, t_0)$: deformación por fluencia en el instante t debido a la aplicación de la carga desde el instante t_0 .

El coeficiente de fluencia a tiempo t $\varphi(t, t_0)$ se define como la relación entre la deformación por fluencia $c(t, t_0)$ y la deformación elástica $\varepsilon_{el}(t_0)$:

$$\varphi(t, t_0) = \frac{c(t, t_0)}{\varepsilon_{el}(t_0)}$$

2.3.1.1. Tipos de fluencia

- Fluencia básica

La fluencia básica depende de las características del material, pero no de las dimensiones del elemento o de las condiciones ambientales. Debido a que la deformación instantánea se compone de deformación elástica y fluencia incipiente, resulta complejo medir la fluencia básica (López, 2005).

La fluencia básica se define como la diferencia entre la deformación total y la deformación elástica, en un ambiente sin intercambio de humedad (sin secado ni hidratación). A efectos prácticos, es suficiente con determinar con precisión las deformaciones totales.

- Fluencia de secado

La fluencia de secado se considera como uno de los aspectos más complejos de la fluencia. Depende de las características del material, de los parámetros ambientales (humedad relativa y temperatura) y de las dimensiones del elemento. Se puede definir como la deformación de un hormigón sometido a tensiones a lo largo del tiempo que se presenta como complemento de la fluencia básica y la retracción de secado en un ambiente de secado. La única forma de conocer la retracción de secado es, conociendo la deformación total, quitarle la deformación elástica, la fluencia básica, la retracción autógena y de secado (López, 2005).

2.3.1.2. Mecanismos de la fluencia en el hormigón

Han sido propuestos diversos mecanismos de fluencia con el fin de explicar el fenómeno. Algunos de los mecanismos de fluencia formulados son: teoría de la deformación mecánica, flujo plástico, flujo viscoso, filtración del gel acuoso, elasticidad retardada, teoría de la solidificación y microfisuración. Hasta el momento ninguno es capaz de integrar todos los factores que influyen en el fenómeno de fluencia. La solución puede estar en la combinación de dos de ellos o más (Neville et al., 1983).

2.3.1.3. Factores que influyen en la fluencia

El fenómeno de fluencia es sensible a muchos factores en torno al hormigón, como los áridos, la pasta de cemento, la relación agua-cemento, la edad de carga, el curado, las condiciones ambientales, los aditivos, las adiciones y la relación tensión-resistencia.

Los áridos no sufren el fenómeno de la fluencia en sí, pero sí afectan a la fluencia en el hormigón. El poder restrictivo de los áridos es mayor cuanto mayor sea su módulo de elasticidad y también cuanto mayor sea su compacidad.

La influencia del cemento se puede analizar desde dos puntos de vista: el relativo a las propiedades físicas y químicas del cemento y el relativo a la variación en el contenido de la pasta hidratada de cemento. El tipo de cemento no suele tener una influencia apreciable salvo la debida a las resistencias mecánicas que proporcionan a una edad determinada. De la pasta de cemento y los áridos, se puede decir que la pasta de cemento es donde se da la fluencia y que los áridos conforman un esqueleto elástico que restringe la fluencia.

La relación agua-cemento se considera un factor muy importante, ya que determina la estructura y la porosidad en la pasta de cemento (que es donde ocurre la fluencia). El incremento en fluencia al aumentar la relación agua-cemento en el hormigón, es debido a la consecuente reducción en resistencia y al incremento en la permeabilidad (López, 2005). Una relación agua-cemento baja no solo incrementa la resistencia final, sino que además aumenta la ganancia de resistencia en función del tiempo.

La edad de carga influye, debido a que la edad del hormigón condiciona la variación de la resistencia. En hormigones jóvenes se notan mucho más estas variaciones, teniendo velocidades de fluencia mucho mayores en las primeras semanas respecto de hormigones más maduros. A partir de una determinada edad se producen leves alteraciones en el valor de la fluencia, pues las resistencias tienden a estabilizarse (Fernández, 2002).

La temperatura se considera menos influyente que la humedad relativa. El incremento en la temperatura tiene dos efectos en el hormigón: primero acelera la fluencia en el hormigón (debido a un mayor potencial de fluencia de la matriz, ya que el mecanismo de fluencia consiste en rotura de enlaces, siendo estos procesos térmicamente activados a nivel molecular), y segundo causa una aceleración en el proceso de hidratación que indirectamente reduce la fluencia. Si el hormigón sufre un presecado y luego es ensayado a fluencia con temperaturas menores a las empleadas en el presecado, la influencia de la temperatura es prácticamente nula. El incremento y las variaciones de temperatura en general, aumentan los valores de las deformaciones de fluencia.

Los cambios de humedad tienen una notable influencia sobre la fluencia, dando lugar a un incremento de la misma cuando disminuye la humedad relativa. Cuando la humedad relativa oscila, los valores de fluencia aumentan respecto de una situación de humedad constante. Se puede decir que la influencia de la humedad relativa en la fluencia depende de varios factores, entre ellos: el nivel de humedad, las dimensiones del elemento, la dosificación del hormigón y el tiempo bajo carga. Una vez alcanzado el equilibrio de humedad con el ambiente, la velocidad de fluencia se vuelve independiente de la humedad relativa y ésta depende exclusivamente de la fluencia básica con un nivel reducido en el contenido de agua evaporable (Neville, 1983).

Respecto de la relación tensión-resistencia, para una dosificación constante, con el mismo tipo de árido, la fluencia es proporcional al esfuerzo aplicado e inversamente proporcional a la resistencia en el instante de

aplicación de la carga. El esfuerzo aplicado tiene una relación lineal con la fluencia, excepto para hormigones muy jóvenes (entre uno y tres días).

2.3.2. FLUENCIA BAJO DIFERENTES TIPOS DE SOLICITACIÓN

La gran mayoría de estudios y literatura científica sobre la fluencia tratan ésta bajo tensiones de compresión, que es generalmente el estado en el que trabaja el hormigón. De cualquier manera, es importante conocer el comportamiento del material sometido a diversos estados tensionales.

Fluencia a tracción

Los estudios de fluencia a tracción presentan dificultad debido a que la aplicación de tracción axial es compleja, los esfuerzos aplicados deben ser bajos, las deformaciones que se dan también lo son y presentan mayor complejidad al ser medidas. Además, la fluencia a tracción del hormigón no es claramente entendida, debido a la complejidad del material y a la escasez de estudios experimentales que sustenten modelos teóricos (Altoubat y Lange, 2001).

Glanville y Thomas (1939) encontraron que la fluencia total en compresión y tracción es similar bajo tensiones iguales.

Fluencia a flexión

Ensayos desarrollados por la Armada de los Estados Unidos han puesto de manifiesto que la fluencia en tracción directa es menor que la fluencia en la fibra extrema de un elemento a flexión, aun cuando en el elemento a flexión la relación tensión aplicada-resistencia es menor (López, 2005). Los resultados son difíciles de interpretar y resulta complejo establecer conclusiones definitivas sobre el comportamiento de la fluencia a flexión. Se debe tener en cuenta que el comportamiento de la fluencia a flexión se puede ver afectado por el gradiente de deformaciones.

Mediante ensayos a flexión en elementos de hormigón, Le Camus (Neville et al., 1983) encontró que la fluencia a compresión y tracción (corregida por retracción) en las respectivas fibras extremas son esencialmente iguales, pero después de un mes, la velocidad de fluencia a tracción se estabilizó (tendiendo a cero) mientras que la de compresión no, como se presenta en la Figura 2.21.

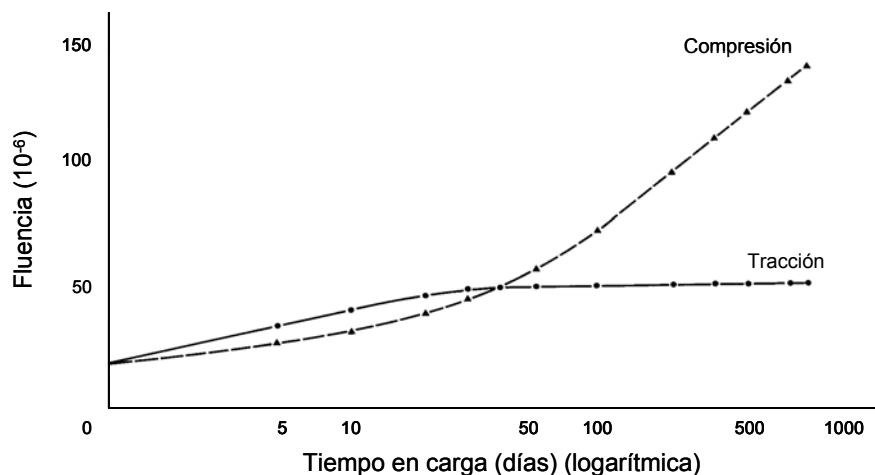


Figura 2.21. Fluencia del hormigón simple a flexión (Neville et al., 1983).

Fluencia a torsión

Los estudios sobre la fluencia a torsión son muy limitados. El primero en demostrar la existencia de la fluencia a torsión fue Andresen (1935), encontrando que ésta es cualitativamente similar a la de compresión.

La relación fluencia a torsión-tiempo presenta una evolución similar a la de compresión (Ishai, 1964).

2.4. FLUENCIA DEL SFRC

El estudio de las propiedades del material que son función del tiempo, es esencial para el empleo del material con responsabilidad estructural.

El conocimiento del comportamiento de los SFRC respecto de las deformaciones diferidas es importante, ya que de este tipo de materiales se espera que controlen la tendencia a la fisuración, que trabajen en estado fisurado y que tengan capacidad de redistribución tensional.

2.4.1. INTRODUCCIÓN A LAS DEFORMACIONES DIFERIDAS DEL SFRC

Cuando se piensa en el control de la fisuración por retracción plástica en el hormigón, el empleo de fibras sintéticas es usual, y es frecuente dejar para las fibras de acero un campo más orientado a nivel estructural. No obstante, dado que la retracción es un fenómeno que también se da a lo largo del tiempo, se exponen a continuación algunos aspectos relativos a la retracción en SFRC.

Algunos investigadores coinciden en que las deformaciones de retracción en el SFRC son menores que en el caso de hormigones sin fibras, y que para mayores volúmenes de fibras y fibras de mayor longitud se experimentan menores deformaciones de retracción libre (Balaguru y

Ramakrishnan (1988), Chern y Young (1989), Tan et al. (1994¹), Abramowicz et al. (1997) y Krátký et al. (2000)).

Las fibras finas son más efectivas que las gruesas para reducir el ancho de las fisuras en la retracción plástica (Swamy y Theodorakopoulos, 1979) (ACI 544.4R-88, 2009). Las curvas retracción-tiempo para hormigones sin y con fibras de acero, presentan tendencias similares (Chern y Young, 1989).

Las fibras reducen el riesgo de fisuración y, si llega a producirse, las fisuras aparecen más tarde desarrollando un número menor de fisuras y/o de menor abertura formando una red discontinua, aportando una capacidad resistente en las regiones fisuradas. Partiendo de lo anterior, se puede aumentar de modo significativo la distancia entre juntas de contracción (ACI 544.4R-88, 2009) y la durabilidad de capas delgadas puede por lo tanto ser mejorada (Laurence et al., 2000).

Respecto de la edad de carga, las fibras de acero resultan ser más efectivas para restringir deformaciones a edades mayores (Chern y Young, 1989). Balaguru y Ramakrishnan (1988) reportaron que las diferencias en las deformaciones se ven más acentuadas con el paso del tiempo (después de 150 días). Además, las fibras tienden a estabilizar las deformaciones de retracción más rápidamente que en el caso de hormigones tradicionales (Tan et al. (1994¹ y²) y Swamy y Theodorakopoulos (1979)).

En resumen, la inclusión de fibras en hormigones y morteros reduce las deformaciones de retracción, la continuidad y abertura de las fisuras, aumenta el tiempo de aparición de las fisuras y acelera su estabilización. Los beneficios anteriormente mencionados se potencian con el empleo de mayor cantidad de fibras y de mayor longitud.

Cuando se aborda el estudio de la fluencia del SFRC, se debe analizar un material compuesto como es el hormigón, al que se le adiciona un componente más que son las fibras. Las deformaciones diferidas del anclaje de las fibras de acero en el hormigón, constituyen un aspecto importante en el estudio de la fluencia en SFRC (Chanvillard y Roque, 1999).

Si se emplean fibras poliméricas para reforzar el hormigón, éstas se consideran como un material viscoelástico debido a que responden de una manera elástica a tensiones aplicadas por poco tiempo. Así, si se mantiene un nivel tensional relativamente alto, las fibras tienen un comportamiento viscoso y se deforman indefinidamente hasta la rotura. Las fibras poliméricas empleadas son capaces de sostener solo un bajo porcentaje de la resistencia después de fisurar (Kurtz y Balaguru, 2000).

Por el contrario, el acero no sufre deformaciones de fluencia bajo condiciones normales de servicio; este fenómeno se observa en los aceros únicamente sometidos a temperaturas superiores a los 370°C, así que para la gran mayoría de las aplicaciones la fluencia del acero no es de importancia (ACI 544.4R-88, 2009).

Los estudios realizados se han centrado principalmente en el comportamiento bajo carga a lo largo del tiempo de elementos sometidos a sollicitaciones de compresión o de flexión. Seguidamente se exponen las investigaciones y los resultados más destacables.

2.4.2. FLUENCIA A COMPRESIÓN DEL SFRC

El efecto de las fibras en la reducción de las deformaciones de fluencia, en morteros y hormigones fibro-reforzados, es debido a la restricción adicional en la pasta. Las fibras pueden ser tomadas como un árido fino adicional, con una geometría especial que rigidiza la matriz cementicia y complementa la adherencia entre el árido fino y la pasta de cemento. Por lo tanto, los factores que influyen en la fluencia son: el módulo de deformación, la cantidad y la forma de las fibras (Neville, 1983).

Generalmente se ha observado que las fibras de acero ejercen efectos positivos en las deformaciones de fluencia a compresión en el hormigón, reduciéndolas. Por otro lado, algunos investigadores han constatado efectos nulos o negativos de las fibras de acero en las deformaciones de fluencia a compresión en el hormigón.

Sobre la fluencia a compresión de los SFRC, se han publicado investigaciones que indican que ésta no se ve afectada por el hecho de adicionar fibras de acero al hormigón. Debido al bajo volumen que representan las fibras respecto del resto de componentes del hormigón, la presencia de las fibras genera una influencia mínima o nula (ACI 544.4R-88, 2009).

Balaguru y Ramakrishnan (1988) comparan dosificaciones con distinto contenido de cemento, con y sin fibras de acero, llegando a la conclusión de que los SFRC sufren mayores deformaciones de fluencia a compresión que los mismos hormigones sin fibras, si bien indican que el comportamiento del hormigón con y sin fibras es esencialmente igual en términos de recuperación elástica y de fluencia al descargar. Sin embargo, un número importante de investigaciones reportan influencias positivas en el comportamiento de los SFRC sometidos a cargas de compresión, respecto de los hormigones sin fibras (Neville et al. (1983), Mangat y Azari (1986), Chern y Young (1989), Tan et al. (1994¹) y Krátký et al. (2000)).

La presencia de las fibras de acero en los SFRC lleva a reducciones significativas en la fluencia del hormigón a compresión (Krátký et al., 2000). Cuando se compara con el hormigón tradicional, el SFRC presenta menores deformaciones de fluencia (menores coeficientes de fluencia) y estas reducciones se acentúan más para mayores contenidos de fibras (Tan et al., 1994¹) (Chern y Young, 1989) (Mangat y Azari, 1986).

Al adicionar fibras, el valor total de las deformaciones de fluencia se reduce en un porcentaje similar al aumento que tiene la resistencia a compresión (Krátký et al., 2000). Las fibras se vuelven más efectivas con el paso del tiempo, con un hormigón más maduro, siendo las deformaciones de

fluencia a compresión mayores para elementos cargados a edades más tempranas (Chern y Young, 1989) (Mangat y Azari, 1986).

Mangat y Azari (1986) estudiaron la fluencia a compresión del SFRC, sometido a relaciones tensión/resistencia entre 0.30 y 0.90, y observaron que las fibras de acero resultan efectivas para restringir las deformaciones de fluencia en todas las relaciones tensión/resistencia empleadas.

La estabilización de las deformaciones de fluencia en compresión se da más pronto para los SFRC (alrededor de 300 días) que para el hormigón sin fibras (Tan et al., 1994¹).

La activación de la fluencia por el aumento de la temperatura en el SFRC, es menos fuerte que en el hormigón sin fibras. El aumento en la temperatura acelera la ganancia de resistencia y, por consiguiente, mejora la adherencia entre las fibras y la matriz, lo que genera una reducción en las deformaciones de fluencia. Este fenómeno implica que las fibras de acero pueden ser empleadas en condiciones de temperatura elevada para contrarrestar excesos de deformación de fluencia, sobre todo si se trata de hormigones jóvenes (Chern y Young, 1989).

2.4.3. FLUENCIA A FLEXIÓN DEL SFRC

La fluencia en elementos de SFRC a flexión se ha estudiado sobre elementos con características distintas:

- Elementos sin fisurar.
- Elementos fisurados.
- Elementos armados de SFRC.

Las investigaciones realizadas, independientemente del tipo de elementos analizados (fisurados o no, reforzados con barras de acero o no), coinciden en la capacidad de los SFRC de sostener niveles de carga importantes a lo largo del tiempo y de reducir flechas diferidas en elementos cargados a flexión respecto de las producidas en hormigón sin fibras (Swamy y Theodorakopoulos (1979), Purkiss y Blagojevic (1993), Tan et al. (1994¹), Chanvillard y Roque (1999), Granju et al. (2000), Mackay (2002), Cochrane (2003), Mackay y Trottier (2004), Bernard (2004), Tan y Saha (2005) y Barragán y Zerbino (2008)).

2.4.3.1. Fluencia a flexión en elementos de SFRC sin fisurar

El primer estudio de fluencia a flexión en elementos no fisurados de FRC fue realizado por Swamy y Theodorakopoulos (1979), quienes realizaron ensayos con morteros y hormigones, reforzados con fibras de acero, vidrio y una mezcla entre vidrio y polipropileno en condiciones de humedad y temperatura no controladas. Reportaron una clara capacidad de los compuestos reforzados con fibras para restringir las flechas producidas por la

fluencia a flexión, obteniendo reducciones sustanciales en los valores de fluencia específica y coeficiente de fluencia (Figura 2.22).

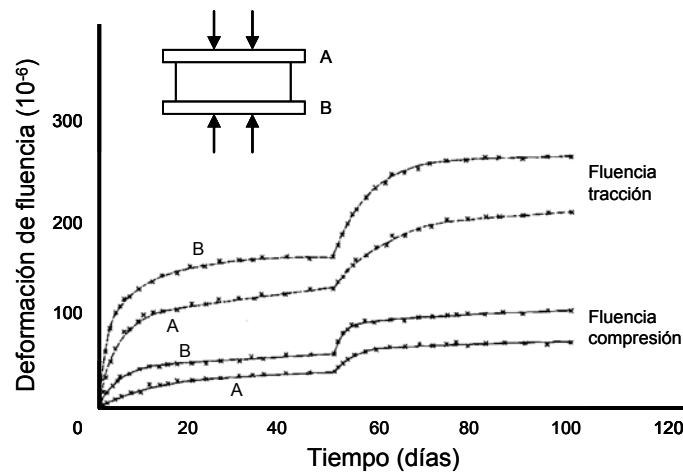


Figura 2.22. Deformaciones de fluencia en probetas de SFRC con 1% de fibras (Swamy y Theodorakopoulos, 1979).

Swamy y Theodorakopoulos (1979) ensayaron prismas de 100x25x500 mm de SFRC cargados hasta un 70% de la resistencia a flexión, y obtuvieron deformaciones de fluencia a tracción entre 50%-60% y de compresión entre un 10%-20% de los elementos de control (sin fibras). Las principales conclusiones obtenidas por Swamy y Theodorakopoulos (1979) son:

- Para la misma intensidad de carga a flexión (relación tensión-resistencia), la deformación de fluencia a compresión es mucho menor que la deformación de fluencia de tracción (contrario a lo experimentado en los hormigones y morteros de control sin fibras).
- La fluencia a compresión tiende en la mayoría de los casos a estabilizarse antes que la de tracción; el hecho de tener valores de deformaciones de fluencia mayores a tracción y que tarde más tiempo en estabilizarse, se considera producto de la formación de diminutas microfisuras en esta zona no presentes en la de compresión.

2.4.3.2. Fluencia a flexión en elementos de SFRC fisurados

Los elementos de SFRC en estado fisurado (Figura 2.23) tienen la capacidad de soportar cargas de flexión a lo largo del tiempo, admitiendo incrementos en las deformaciones a lo largo del tiempo (deformación de compresión, flecha y abertura de fisura), adicionales a las deformaciones iniciales producidas por la acción de la carga impuesta (Chanvillard y Roque (1999), Granju et al. (2000), Gettu (2002), Klinkert (2002), Mackay (2002), Cochrane (2003), Bernard (2004), Mackay y Trottier (2004). Barragán y Zerbino (2008)).

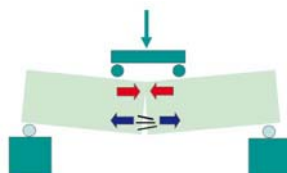


Figura 2.23. Fluencia a flexión del SFRC en estado fisurado.

Chanvillard y Roque (1999) estudiaron el comportamiento del SFRC con sección fisurada bajo carga sostenida, demostrando que los elementos de SFRC fisurados solicitados a flexión presentan deformaciones diferidas a lo largo del tiempo y establecen que factores como la geometría de la fibra, el tipo de matriz, la abertura inicial de fisura, la edad de aplicación de la carga y el nivel de carga aplicado influyen directamente en el fenómeno.

Granju et al. (2000) catalogan el fenómeno de fluencia a flexión en los elementos de SFRC en estado fisurado como un fenómeno perjudicial que no puede ser pasado por alto en el diseño, y que puede llegar a afectar significativamente la capacidad resistente última de las estructuras.

La fluencia a flexión del SFRC en los elementos en estado fisurado, se descompone en los siguientes fenómenos (Mackay y Trottier, 2004):

- Fluencia del hormigón a compresión.
- Fluencia de las fibras a nivel material en tracción (fenómeno que se desestima cuando se trata de fibras de acero).
- Pérdida de adherencia de las fibras con la matriz y su posterior arrancamiento.

El valor de las flechas instantáneas varía de forma significativa para los mismos hormigones con niveles de carga idénticos (Mackay y Trottier, 2004), lo que refleja la dispersión típica en los resultados de los ensayos con elementos de SFRC.

La magnitud y la velocidad de deformación de fluencia a flexión es mayor en los primeros instantes después de la aplicación la carga, y va gradualmente disminuyendo con el paso del tiempo. La magnitud y la velocidad de las flechas se incrementan al aumentar el valor de la carga sostenida (Figura 2.22) (Swamy y Theodorakopoulos (1979), Mackay y Trottier (2004) y Bernard (2004)).

En cuanto a los valores de las deformaciones diferidas, Mackay (2002) obtuvo flechas diferidas a los 120 días de carga de hasta 4.3 veces la flecha inicial (con niveles de carga del 20%, 40%, 60% y 80% del Average Residual Strength (ARS), criterio empleado por la ASTM C1399/C1399M-10). Mackay y Trottier (2004), para elementos cargados al 60% de ARS obtuvieron una flecha media de $L/1150$ y, considerando el modelo EHE (siendo éste coincidente con el propuesto por el ACI) para cálculo de flechas y haciendo una regresión empleando el coeficiente último de fluencia, obtienen una flecha máxima de $L/250$ después de un año de carga, llegando a la conclusión de que la flecha máxima de los SFRC podría satisfacer algunos de los requerimientos del

estado límite de servicio, por lo que cuando se demanden altos niveles de servicio los SFRC pueden no ser una opción viable.

Respecto de la tendencia de las deformaciones a lo largo del tiempo, Chanvillard y Roque (1999) consideran que éstas llegan a estabilizarse. Según Granju et al. (2000) las deformaciones de fluencia se estabilizan después de 6 meses, considerando las condiciones de carga (60% de F_{300} , siendo ésta la carga para $L/300$ en el ensayo de flexotracción) del ensayo como niveles en los que la fluencia no afecta la seguridad de las estructuras. Barragán y Zerbino (2008) observaron, al cargar elementos al 50% de su capacidad de carga al nivel de prefisuración, un leve incremento inicial de la abertura de fisura seguido de una estabilización de las deformaciones. Por otro lado, Klinkert (2002) y Gettu (2002) encontraron estabilización después de 12 semanas de ensayo.

Por el contrario, Mackay (2002) y Cochrane (2003) indican que las deformaciones diferidas continúan incrementándose, producto de la pérdida de adherencia y posterior arrancamiento de las fibras, hasta culminar en la rotura, por lo que no consideran la posibilidad de la estabilización de las deformaciones o la idoneidad de fijar un valor límite. Así mismo, Bernard (2004) tampoco encuentra tendencia a la estabilización de las flechas durante los 3 meses de duración de los ensayos; no identifica una tendencia de aproximación asintótica de las deformaciones, y manifiesta la necesidad de realizar ensayos a más largo plazo.

Barragán y Zerbino (2008) obtuvieron roturas rápidas (en el proceso de carga) y roturas por fluencia de algunos elementos con cargas superiores al 78% de la carga resistida al nivel de pre-fisura. En las roturas por fluencia, se presenta la evolución típica en tres etapas de la fluencia: primaria, secundaria y terciaria (Figura 2.24).

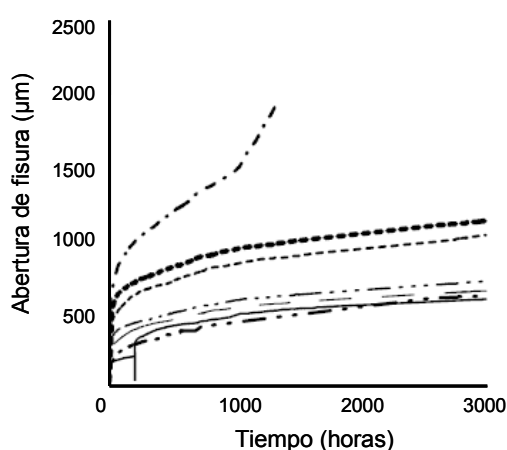


Figura 2.24. Rotura por fluencia (fluencia primaria, secundaria y terciaria) (Barragán y Zerbino, 2008).

Ensayos a rotura en los elementos después de finalizar los ensayos de fluencia, han permitido observar que los elementos no pierden capacidad de carga cuando son sometidos a cargas sostenidas por largos periodos de tiempo (Chanvillard y Roque (1999), Granju et al. (2000) y Bernard (2004)). Los

elementos suelen mostrar una rotura por deslizamiento de las fibras (Bernard, 2004).

Para finalizar, se puede concluir que existe un consenso total respecto de la capacidad del SFRC de soportar cargas de flexión a lo largo del tiempo, y a la ocurrencia del fenómeno de fluencia al presentar deformaciones diferidas. Sin embargo, respecto de la tendencia de las deformaciones diferidas a estabilizarse hay diferentes conclusiones. Además, la dispersión típica de los SFRC en los ensayos de flexotracción es un factor importante a tener en cuenta al analizar los resultados de los ensayos de fluencia.

2.4.3.2.1. Resumen de investigaciones desarrolladas

Se presentan de forma resumida los aspectos más destacables de las investigaciones experimentales sobre fluencia a flexión de elementos fisurados de SFRC (Chanvillard y Roque (1999), Granju et al. (2000), Mackay (2002), Cochrane (2003), Bast et al. (2007), Barragán y Zerbino (2008)), en las siguientes fichas, los aspectos destacados son los siguientes:

- Autor: autor y fecha.
- Objeto estudio: descripción del objeto de estudio.
- Elemento: tipo y dimensiones de probeta, dimensión de la entalla y de la luz.
- Carga: esquema de carga (centro de luz o a tercios).
- Registra: parámetro de control y análisis del ensayo (abertura de fisura w y flecha δ).
- Hormigón: resistencia a compresión f_c o datos relacionados.
- Fibra: fibras empleadas, dimensiones (longitud/diámetro) y contenido.
- Precarga: historia de carga, deformación o abertura de fisura, previo al ensayo de fluencia.
- Nivel de carga: carga aplicada en ensayo de fluencia.
- Duración: duración del ensayo de fluencia.
- Condiciones: temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (%), en el ensayo de fluencia.
- Comentarios: observaciones pertinentes.

Autor:	Chanvillard y Roque, 1999
Objeto estudio:	Evaluar la respuesta de elementos de SFRC fisurados sometidos a cargas diferidas.
Elemento:	Prisma 150x200x700 mm Entalla=10 mm-Luz=600 mm
Carga:	Centro de luz.
Registra:	w y δ
Hormigón:	-
Fibra:	Acero "Twincone" 54 mm-60 kg/m ³
Precarga:	$w=0.6$ y 0.3 mm
Nivel carga:	Momento en pre-fisura 80% y 72%
Duración:	120-200 días (hasta estabilización de deformaciones)
Condiciones:	20 $^{\circ}\text{C}$ y 50% HR
Comentarios:	Prefisuran a largo plazo y a las 24 horas para simular fisuras de trabajo y a edades tempranas (durabilidad).

Autor:	Granju et al., 2000
Objeto estudio:	Evaluar respuesta de elementos de SFRC fisurados sometidos a cargas diferidas.
Elemento:	Prisma 150x200x700 mm Entalla=10 mm-Luz=600 mm
Carga:	Centro de luz.
Registra:	w y δ
Hormigón:	$f_c = 35$ Mpa
Fibra:	Acero "Dramix" 60/0.75 mm-65 kg/m ³
Precarga:	$w = 0.3$ mm
Nivel carga:	60% de F_{300} (carga soportada a una flecha $l/300$ en el ensayo de flexotracción)
Duración:	1 año
Condiciones:	Condiciones interior de laboratorio.
Comentarios:	Plantean el estudio para tres fibras de acero, pero entregan resultados de las Dramix únicamente.

Autor:	Mackay, 2002
Objeto estudio:	Comportamiento de hormigones reforzados con fibras de acero y sintéticas sometidos a cargas de fluencia a flexión.
Elemento:	Prismas 100x100x350 mm Entalla=2 mm-Luz=300 mm
Carga:	Tercios.
Registra:	δ
Hormigón:	$f_c = 35$ Mpa
Fibra:	Sintéticas 50/0.37x1.1 mm-4.5 kg/m ³ Acero 60/0.92 mm-24 kg/m ³
Precarga:	$\delta < 0.2$ mm
Nivel carga:	Sintéticas 20, 40 y 60% ARS (resistencia residual media definida por ASTM C1399) Acero 20, 40, 60 y 80% ARS
Duración:	Mínimo 90 días
Condiciones:	Condiciones de laboratorio 17.8°C±0.3°C y 28.5%±2.9% HR
Comentarios:	-

Autor:	Cochrane, 2003
Objeto estudio:	Comportamiento de hormigones reforzados con fibras de acero y sintéticas sometidos a cargas de fluencia a flexión sometidos a altas temperaturas.
Elemento:	Prismas 100x100x350 mm Entalla=2 mm-Luz=300 mm
Carga:	Tercios.
Registra:	δ
Hormigón:	$f_c = 35$ Mpa
Fibra:	Sintéticas 50/0.37x1.1 mm-4.5 kg/m ³ Acero 60/0.92 mm-24 kg/m ³
Precarga:	$\delta < 0.2$ mm
Nivel carga:	Sintéticas 20, 40 y 60% ARS (resistencia residual media definida por ASTM C1399) Acero 20, 40, 60 y 80% ARS
Duración:	90 días a 35°C y 90 días a 60°C
Condiciones:	Ensayos 35°C y 60°C y 20% HR
Comentarios:	Estudio similar al de Mackay (2002) pero analiza temperaturas mayores.

Autor:	Bast et al., 2007
Objeto estudio:	Ensayos de fluencia de hormigón reforzado con fibras de plástico. Investigación del comportamiento diferido del FRC sometido a cargas de flexión (fibras de acero y de plástico).
Elemento:	Prismas 150x150x600 mm Entalla= si -Luz=450 mm
Carga:	Tercios.
Registra:	δ
Hormigón:	Cemento=370 kg/m ³ - A/C=0.5
Fibra:	Sintéticas (Strux 90/40, Durus PMW 50/1000-K1,2x1,0R y Forta PF 54/300-K1) 4.5 kg/m ³ Acero 50/1 mm-30 kg/m ³
Precarga:	$\delta = 1.75$ mm
Nivel carga:	0.47, 0.6, 0.71 y 0.85 de $P_{1.75}$ (carga soportada a una flecha de 1.75 mm)
Duración:	90 días (cada etapa de carga)
Condiciones:	-
Comentarios:	-

Autor:	Barragán y Zerbino, 2008
Objeto estudio:	Comportamiento de elementos de SFRC a flexión en estado fisurado.
Elemento:	Prismas 150x150x600 mm Entalla=25 mm-Luz=450 mm
Carga:	Tercios.
Registra:	w y δ
Hormigón:	$f_c = 45$ Mpa
Fibra:	Acero "Trefil Arbed HE" 50/1 mm-40 kg/m ³
Precarga:	w entre 0.2 y 3.5 mm
Nivel carga:	Entre 37% y 100% resistencia a nivel de pre-fisura.
Duración:	4 meses
Condiciones:	Ambiente de laboratorio 16-23°C y 22-64% HR
Comentarios:	-

2.4.3.3. Fluencia a flexión en vigas de SFRC armadas

La adición de fibras de acero al hormigón armado reduce significativamente la flecha instantánea, las flechas diferidas y los valores de abertura de fisura a medida que aumenta el contenido de fibras y el tiempo en el que se sostiene la carga (Tan et al., 1994¹) (Tan y Saha, 2005).

En los ensayos realizados por Purkiss y Blagojevic (1993) para vigas cargadas a un 65% de su carga de rotura, a los 10 días los valores de las aberturas de fisura en las vigas solamente armadas (sin fibras) pasaron de tener una abertura de fisura de 0.33 a 0.40 mm y las vigas armadas y con un 1.5% fibras de 0.12 a 0.15 mm. Además, a los 28 días de ensayo, las flechas inicial, total y diferida fueron menores para los elementos con fibras.

Por su parte Tan et al. (1994¹) verificaron que las flechas diferidas se reducen en un 20% para las vigas armadas con un contenido de fibras del 2%. La efectividad de las fibras de acero para controlar las flechas diferidas es mayor para niveles de carga superiores a los de diseño en servicio. Al cabo de 1 año la viga sin fibras tenía una flecha total un 29% mayor que la de una viga

con 2% de fibras, mientras que a los 10 años la diferencia era aproximadamente del 36%. Respecto de las deformaciones diferidas, los niveles son del 41% y del 51%, respectivamente (Tan y Saha, 2005) (Figura 2.25).

El coeficiente de fluencia a 28 días de ensayo (definido como la relación entre la flecha diferida y la instantánea), es mayor para los elementos exclusivamente reforzados con fibras (1.6), seguido de los elementos armados reforzados con fibras (entre 0.60 y 0.88) y menor en el caso de elementos armados sin fibras (0.45 y 0.51) (Purkiss y Blagojevic, 1993). Los mayores valores de coeficiente de fluencia para los elementos de SFRC armados respecto de los elementos armados se deben a que la reducción en los valores de las flechas instantáneas es mucho más importante que en las flechas diferidas.

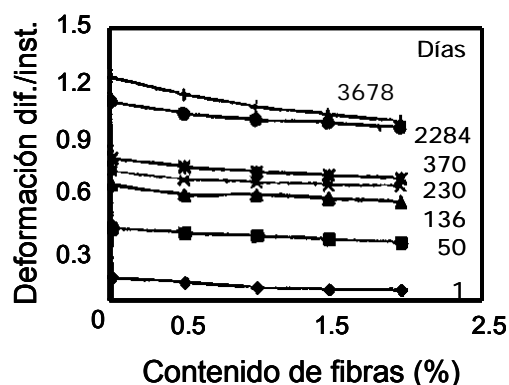


Figura 2.25. Coeficiente de fluencia vs. contenido de fibras (Tan y Saha, 2005).

La efectividad de las fibras en términos de coeficientes de fluencia se hace más evidente para mayores edades de ensayo y mayores valores de carga (Tan et al., 1994²); a 1 año el valor de los coeficientes de fluencia es prácticamente igual (para elementos armados sin fibras y armados con un 2% de fibras), pero a los 10 años, para el elemento armado sin fibras el coeficiente de fluencia es de 1.30 y de 1.03 para el elemento armado con 2% de fibras. Además, al incrementar la carga sostenida, la flecha total y la diferida se incrementan, y la relación flecha diferida-instantánea se reduce (Figura 2.25) (Tan y Saha, 2005).

El incremento de la fisuración diferida se estabilizó más rápidamente en los elementos con mayores contenidos de fibras (para 1.5% se necesitó un año mientras que para contenidos de 0.5% más de 5 años) (Tan y Saha, 2005).

Para elementos armados de SFRC la predicción de las flechas debidas a la fluencia empleando aproximaciones analíticas basadas en el Método del Módulo Efectivo (EMM) (McHenry (1943) y Neville (1983)), el Método del Módulo Efectivo Ajustado (AEMM) (Bazant, 1972) y el ACI modificado, presentaron buenas aproximaciones a los datos experimentales, sobreestimando los resultados. El hecho de que los valores experimentales fueran algo mayores que los teóricos, puede ser debido a una pérdida en la

capacidad de las fibras de transmitir tensiones con el tiempo, que no es tenida en cuenta en los modelos (Tan et al. (1994¹) y Tan y Saha (2005)).

Al finalizar los ensayos de fluencia, los elementos se llevaron a rotura y se compararon con elementos idénticos de control sin haber sido ensayados a fluencia; se observó que, excepto por las deformaciones permanentes y la reducida rigidez inicial, los elementos de control mostraron el mismo comportamiento carga-flecha que las vigas ensayadas a fluencia, en términos de resistencia y rigidez (Tan y Saha, 2005).

Concluyendo, la adición de fibras a vigas armadas, además de mejorar sus propiedades mecánicas instantáneas, mejora su comportamiento a fluencia en términos de flechas instantáneas, totales y estabilización de deformaciones. Las ventajas anteriormente mencionadas, se incrementan con el contenido de fibras, en función del tiempo y de la carga aplicada. Sin embargo, los coeficientes de fluencia se reducen en los elementos con fibras debido a los bajos valores de flechas instantáneas, por lo que no deben ser un criterio definitivo para evaluar su comportamiento.

2.4.4. MÉTODOS DE ENSAYO DE FLUENCIA A FLEXIÓN

No existe un método de ensayo estandarizado para estudiar la fluencia a flexión de los FRC. Entre los distintos equipos de ensayo y procedimientos experimentales desarrollados destacan los siguientes: Swamy y Theodorakopoulos (1979), Chanvillard y Roque (1999), Kurtz y Balaguru (2000), Klinkert (2002), Mackay (2002), Cochrane (2003), Mackay y Trottier (2004), Bernard (2004), Bast et al. (2007) y Barragán y Zerbino (2008).

2.4.4.1. Swamy y Theodorakopoulos (1979)

Estudian el comportamiento a fluencia de compuestos cementicios reforzados con fibras. Los ensayos de fluencia a flexión se realizan en prismas de 100x25x500 mm, que se curan hasta los 28 días y luego se llevan directamente al bastidor de fluencia.

Emplearon un montaje que consiste en cuatro barras roscadas verticales y cuatro muelles en la parte inferior en contacto directo con el suelo que mantienen la carga que se aplica aproximando las roscas superiores. Se ensayan dos probetas simultáneamente, como se presenta en la Figura 2.26.

De este mecanismo de ensayo se puede decir que emplea el sistema de carga a tercios para garantizar la estabilidad del ensayo. El sistema de aplicación de la carga aproximando las tuercas resulta poco práctico, resultando difícil garantizar un valor de carga determinado, así como aplicar un nivel de carga alto (lo que condiciona trabajar con elementos de reducido espesor como es el caso) y que además sea similar en las cuatro barras roscadas. El sistema de apoyos y transmisión de carga no aísla los efectos de cada elemento para evitar la transmisión de momentos inducidos.

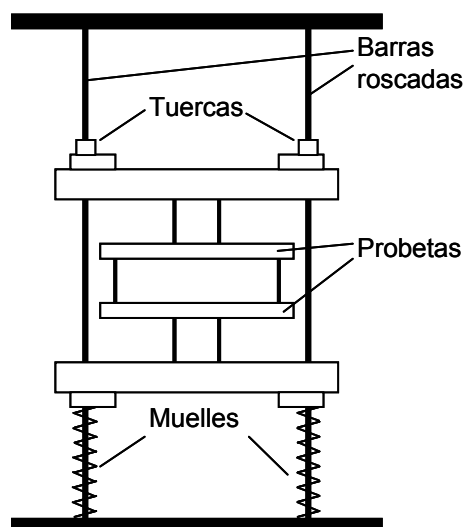


Figura 2.26. Mecanismo de ensayo Swamy y Theodorakopoulos (1979).

2.4.4.2. Chanvillard y Roque (1999)

Estudian el comportamiento de elementos fisurados de SFRC sometidos a cargas sostenidas. Los ensayos se realizan en prismas de 150x200x700 mm entallados a una profundidad de 10 mm, prefisurados.

Emplearon un marco rígido con la capacidad de ensayar tres prismas cargados en el centro de la luz simultáneamente, con un sistema hidráulico de carga para compensar las pérdidas de carga producidas por las flechas de los prismas (Chanvillard y Roque, 1999). En esquema del marco se presenta en la Figura 2.27.

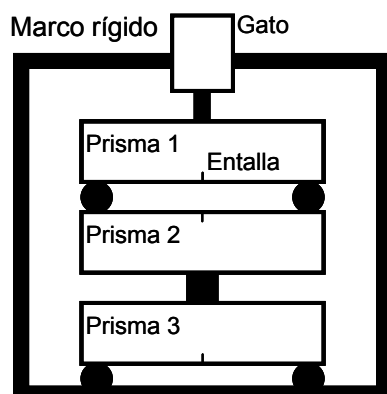


Figura 2.27. Marco de ensayo empleado por Chanvillard y Roque (1999).

El marco rígido empleado permite ensayar un máximo de tres probetas. Para ensayar un número menor hay que emplear algún elemento que permita transmitir la carga al resto de probetas. Los dispositivos de apoyo y transmisión de carga empleados no aíslan los movimientos de un elemento respecto del otro, facilitando la transmisión de momentos inducidos. Además, el hecho de aplicar la carga en un solo punto en el centro de la luz hace que la zona de

aplicación tenga que ser generosa para garantizar la estabilidad. Para la aplicación y conservación de la carga emplean un sistema hidráulico complejo.

2.4.4.3. Kurtz y Balaguru (2000)

Realizan un estudio de la fluencia post-fisura a flexión del hormigón reforzado con fibras poliméricas. Los ensayos se realizan en prismas de 100x100x350 mm prefisurados siguiendo la ASTM C1399/C1399M-10 (carga a tercios).

La Figura 2.28 presenta el mecanismo empleado por Kurtz y Balaguru (2000). Los elementos prefisurados son empotrados en la mitad de su longitud en un marco de ensayos. La carga se aplica en uno de los puntos de apoyo mediante una palanca. Las flechas se miden en la cara superior del extremo donde se aplica la carga.

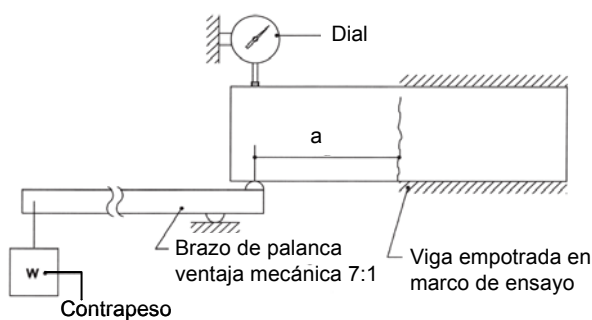


Figura 2.28. Mecanismo de ensayo planteado por Kurtz y Balaguru (2000).

Este ingenioso mecanismo optimiza la aplicación de la carga mediante una palanca, pero limita a un elemento por ensayo por bastidor.

2.4.4.4. Klinkert et al. (2002)

Con el fin de investigar el comportamiento a largo plazo de placas de SFRC, realizaron ensayos de relajación donde el ancho de fisura se mantiene constante y se registra la reducción en la capacidad de carga. La Figura 2.29 presenta el esquema del ensayo empleado en este estudio (Klinkert et al., 2002).

Optan por el ensayo de relajación, por la imposibilidad de realizar ensayos de fluencia debido a que experimentaron roturas súbitas de los elementos sin registrar resultados.

El ensayo de relajación resulta ser un ensayo más complejo y con mayor dificultad de autonomía a lo largo del tiempo. El sistema de ajuste de la abertura de fisura se realiza mediante la aproximación de una tuerca en una barra roscada, sistema que genera dependencia de un operario y posibilidad de presentarse deformaciones excesivas.

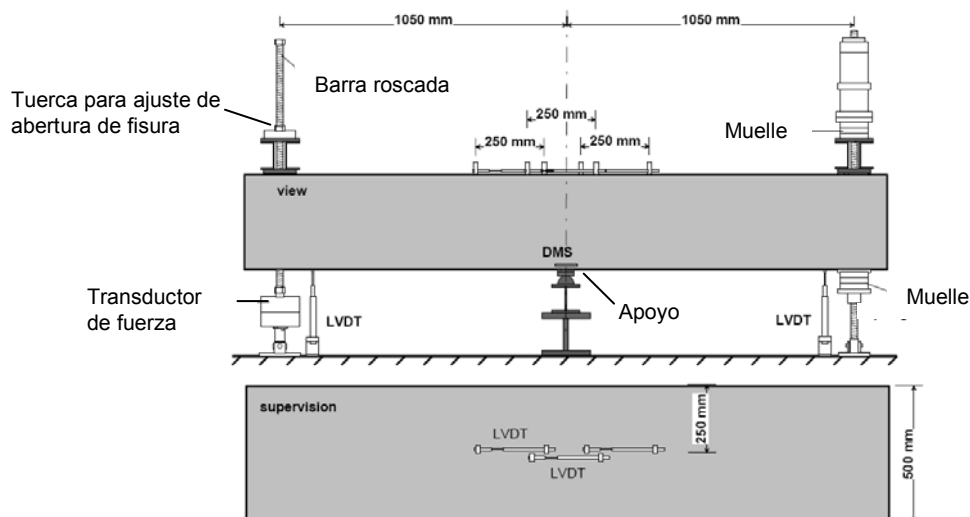


Figura 2.29. Esquema ensayo de relajación (Klinkert et al., 2002).

2.4.4.5. Dalhousie University (Mackay (2002), Cochrane (2003), y Mackay y Trottier (2004)).

En la Universidad de Dalhousie han llevado a cabo estudios del comportamiento la fluencia a flexión en hormigones reforzados con fibras de acero y sintéticas, de los cuales son producto las tesinas de master publicadas por Mackay (2002) y Cochrane (2003), y un artículo publicado por Mackay y Trottier (2004).

Para realizar los ensayos de fluencia se emplearon prismas de 100x100x350 mm con una entalla de 2 mm de profundidad que además se prefisuraron siguiendo ASTM C1399/C1399M-10 a niveles de flecha menores de 0.2 mm.

La columna de probetas y el bastidor de fluencia empleado se presentan en las Figuras 2.30 y 2.31, respectivamente.

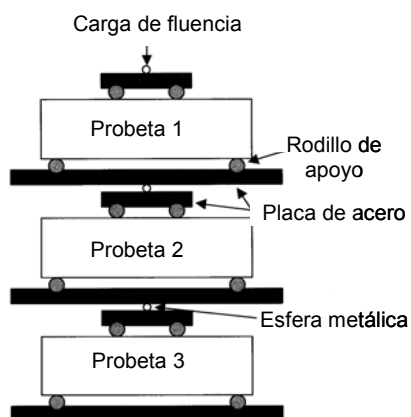


Figura 2.30. Columna de probetas en bastidor de fluencia (Mackay (2002), Cochrane (2003), y Mackay y Trottier (2004)).

El diseño del bastidor permite ensayar tres probetas en columna (Figuras 2.30 y 2.31), transmitir valores de carga similares a las probetas y evitar la transmisión de momentos inducidos mediante esferas de acero ubicadas en la placa de aplicación de carga en la parte superior de cada elemento.

El bastidor (Figura 2.31) está construido con perfiles de acero estructural que aportan la resistencia y rigidez necesaria. Está compuesto por una base de apoyo del bastidor, donde a su vez se apoyan las probetas con sus correspondientes dispositivos de transmisión de cargas, y muy cerca de las probetas se disponen unos perfiles verticales que sirven de apoyo al sistema de palanca (ventaja 10:1) diseñado para optimizar la aplicación de la carga. La palanca en uno de sus extremos tiene un contrapeso y cerca de su punto de apoyo aplica la carga a las probetas (resistencia).

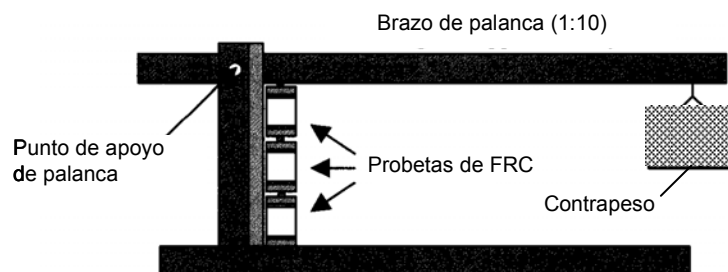


Figura 2.31. Bastidor de fluencia empleado (Mackay (2002) y Cochrane (2003)).

Con la configuración de este bastidor, ensayar más de 3 elementos en columna no es posible por el gálibo que impone la palanca de carga, y si se quieren ensayar menos de 3 elementos, el elemento faltante se tiene que materializar para llegar físicamente a la palanca y garantizar la transmisión de carga. Los dispositivos de transmisión de carga y apoyos independizan los elementos entre si mediante una esfera metálica (evitando la transmisión de momentos inducidos), pero este mecanismo genera una gran inestabilidad que ha causado grandes dificultades en el montaje y la puesta en carga.

2.4.4.6. Bernard (2004)

Ha estudiado la fluencia de paneles fisurados de hormigón proyectado reforzado con fibras de acero SFRC. Para los ensayos experimentales emplea paneles circulares de 800 mm de diámetro y 75 mm de espesor definidos según la ASTM C1550-08, que se llevan a niveles de flecha entre 1.04 mm y 5.15 mm.

En la Figura 2.32 se presenta el bastidor de ensayo empleado por Bernard.

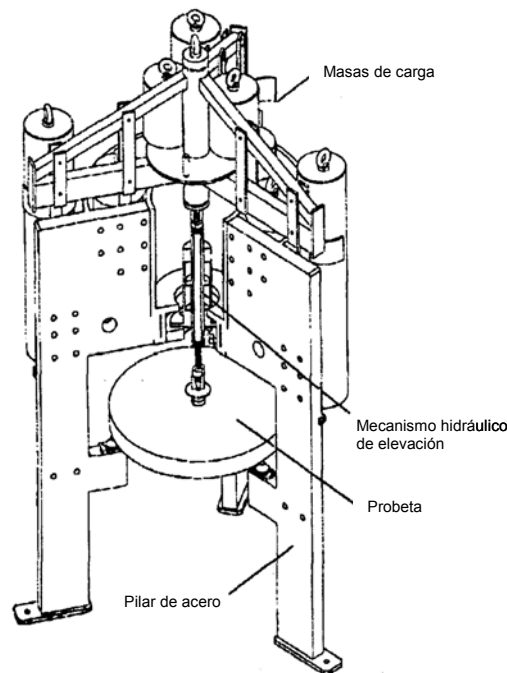


Figura 2.32. Bastidor de ensayo empleado por Bernard (2004).

Las dimensiones, los apoyos y la forma de carga responden a lo estipulado por ASTM C1550-08. Se ha diseñado para que sea lo suficientemente rígido para garantizar la adecuada ejecución y transmisión de la carga a lo largo del ensayo. Está compuesto por un marco de acero conformado por tres pilares distribuidos radialmente que sirven de apoyo a los paneles por su parte inferior. La carga se aplica centrada en la parte superior del bastidor, y se materializa mediante masas que se fijan a la parte superior del mismo.

El sistema de carga, al materializarse aplicando masas, tiene la capacidad de mantener un nivel de tensiones constante y conocido (además ajusta las descompensaciones debidas a las flechas diferidas), y demanda un mínimo de ajustes manuales para garantizar su continuidad independientemente de la rotura de un elemento. Además, puede contar con un sistema de brazo mecánico para optimizar la aplicación de cargas. Debido a la mecánica del ensayo, resulta complejo ensayar probetas en columna (más de una probeta por bastidor).

2.4.4.7. Bast et al. (2007)

Estudian la fluencia a flexión en estado fisurado en elementos de FRC (150x150x600 mm), reforzados con fibras sintéticas y de acero, realizando una comparación entre el comportamiento de las fibras sintéticas y acero.

En la Figura 2.33 se presenta el bastidor que emplean. Los elementos son prefisurados previamente para luego ser llevados al bastidor de fluencia; ensayan un elemento por bastidor (no realizan ensayos en columna). El bastidor está compuesto por perfiles de acero y emplea una palanca para optimizar la aplicación de la carga.

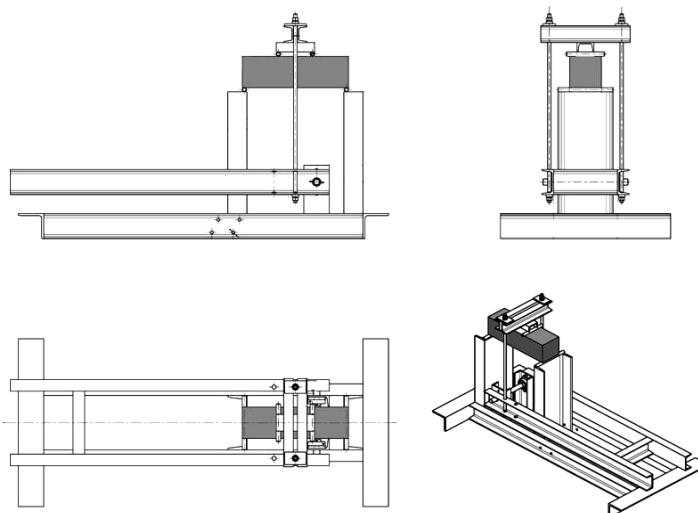


Figura 2.33. Bastidor de ensayo empleado por Bast et al. (2007).

2.4.4.8. Barragán y Zerbino (2008)

Realizan un estudio de la fluencia post-fisura a flexión en el SFRC; los ensayos los realizan en probetas prismáticas de 150x150x600 mm, cargadas a tercios.

Utilizan el mismo bastidor que ha sido desarrollado para esta Tesis.

Trabajan en columna de probetas (3 elementos), con carga a tercios, apoyando los elementos entre sí sobre unos rodillos de acero que no independizan la influencia de las deformaciones de los elementos (transmisión de momentos transversales).

Introducen la velocidad de abertura de fisura (crack opening rate), como parámetro de análisis de las deformaciones diferidas.

2.4.5. MODELOS DE PREDICCIÓN DE DEFORMACIONES DIFERIDAS A FLEXIÓN

Los modelos de predicción que se presentan a continuación corresponden a los existentes en la normativa y códigos vigentes y a los presentados en diversos estudios.

2.4.5.1. EHE 2008/ACI 318-08

Para la verificación del estado límite de deformación, la propuesta de los códigos EHE y ACI recoge una metodología idéntica simplificada aplicable a vigas donde la flecha total δ_i se considera compuesta por la suma de una flecha instantánea δ_i y una flecha diferida δ_{dif} debida a las cargas permanentes (EHE-08 Art. 50.2.2).

$$\delta_r = \delta_i + \delta_{dif}$$

La flecha instantánea en elementos fisurados de sección constante se puede calcular considerando un comportamiento elástico mediante las fórmulas de resistencia de materiales, empleando el siguiente método simplificado para el cálculo de la inercia equivalente I_e de una sección:

$$I_e = \left(\frac{M_f}{M_a}\right)^3 I_b + \left[1 - \left(\frac{M_f}{M_a}\right)^3\right] I_f \leq I_b$$

Donde:

M_a : momento flector máximo aplicado, para la combinación característica, a la sección hasta el instante en que se evalúa la flecha.

M_f : momento nominal de fisuración de la sección, que se calcula mediante la expresión:

$$M_f = f_{ctm,fl} W_b$$

$f_{ctm,fl}$: resistencia media a flexotracción del hormigón.

W_b : módulo resistente de la sección bruta respecto a la fibra extrema en tracción.

I_b : momento de inercia de la sección bruta.

I_f : momento de inercia de la sección fisurada en flexión simple, que se obtiene despreciando la zona de hormigón en tracción y homogeneizando las áreas de las armaduras activas y pasivas multiplicándolas por el coeficiente de equivalencia.

La flecha adicional diferida δ_{dif} , producida por las cargas sostenidas a lo largo del tiempo, se puede estimar como $\delta_{dif} = \lambda \cdot \delta_i$, siendo:

$$\lambda = \frac{\xi}{1 + 50\rho'}$$

Donde:

ρ' : cuantía geométrica de la armadura de compresión A_s' referida al área de la sección útil, $b_0 d$, en la sección de referencia.

$$\rho' = \frac{A_s'}{b_0 d}$$

ξ : coeficiente en función de la duración de la carga que se toma de los valores indicados en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Valores para el coeficiente ξ en función del tiempo.

Duración	ξ	
	EHE	ACI
5 o más años	2.0	
1 año	1.4	
6 meses	1.2	
3 meses	1.0	
1 mes	0.7	-
2 semanas	0.5	-

Siguiendo la aproximación de Mangat y Azari (1985) para la predicción de deformaciones diferidas en el SFRC, puede emplearse un factor modificador α representativo del material:

$$\alpha = 1 - c\mu \frac{l_f}{d_f} V_f$$

Donde:

- c : constante representativa del tipo de fibra, la esbeltez y la cantidad de fibras.
- μ : coeficiente de fricción entre la fibra y hormigón (0.04 para fibras planas y 0.12 para fibras deformadas).

Entonces, la flecha adicional debida a la carga sostenida en una viga de SFRC puede estimarse como:

$$\delta_{dif} = \alpha \lambda \delta_i = \left[1 - c\mu \frac{l_f}{d_f} V_f \right] \lambda \delta_i$$

Donde:

- V_f : contenido de fibras en porcentaje.

Tan et al. (1994²) obtuvieron valores experimentales para el coeficiente α en función del contenido de fibras V_f :

$$\alpha = \begin{cases} 1 - 0.069V_f & \rightarrow V_f \leq 1.5\% \\ 0.897 & \rightarrow V_f > 1.5\% \end{cases}$$

2.4.5.2. Eurocódigo-2

Para elementos sometidos a flexión fundamentalmente, donde el elemento llega a fisurar (comportamiento entre no fisuración y fisuración total), se emplea la siguiente expresión:

$$\alpha = \xi \alpha_2 + (1 - \xi) \alpha_1$$

Donde:

α : parámetro que puede ser, por ejemplo, una deformación unitaria, una curvatura o un giro (como simplificación, α puede tomarse también como una flecha).

α_1, α_2 : respectivamente los valores del parámetro en estudio calculados para sección sin fisurar (α_1) y sección totalmente fisurada (α_2).

ξ : coeficiente de distribución dado por la siguiente ecuación ($\xi=0$ para elemento sin fisurar).

$$\xi = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2$$

Donde:

β : coeficiente que tiene en cuenta la duración de la carga o la repetición de la misma (1 para una única carga de corta duración y 0.5 para muchos ciclos de carga o carga permanente).

σ_s : tensión en la armadura bajo la actuación del momento de servicio, suponiendo sección fisurada.

σ_{sr} : tensión en la armadura bajo la actuación del momento de fisuración, suponiendo sección fisurada.

Para cargas (de larga duración) que causen deformaciones de fluencia, la deformación total (incluyendo la de fluencia) puede ser calculada empleando un módulo de deformación efectivo para el hormigón, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)}$$

Donde:

$\varphi(\infty, t_0)$: coeficiente de fluencia para la carga y el intervalo de tiempo considerado.

2.4.5.3. Cochrane (2003)

Propone una expresión obtenida de una regresión hiperbólica similar al modelo de fluencia de los códigos ACI 209R-92 y CAN/CSA-A23.3-04.

$$y = \frac{t^\psi}{at^\psi + b} = \left(\frac{1}{a} \right) \left(\frac{t^\psi}{t^\psi + \frac{b}{a}} \right)$$

Donde:

y : flecha diferida (μm).

t : tiempo (días).

ψ, a, b : constantes de ajuste experimental.

De ensayos de fluencia (en ambiente de laboratorio) a flexión de prismas en estado fisurado (cargado a tercios), para elementos SFRC de 100x100x350 mm con 24 kg/m³ de fibras de 60 mm (longitud) y 0.92 mm (diámetro), cargados al 20% de la resistencia residual media (ARS), Cochrane obtuvo los siguientes valores para las constantes:

$$\psi = 0.9$$

$$a = 0.01$$

$$b = 0.05$$

Por lo tanto:

$$y = 100 \left(\frac{t^{0.9}}{t^{0.9} + 5} \right)$$

2.4.5.4. Chanvillard y Roque (1999)

Respecto de la modelación de la fluencia, trabajan con las bases del comportamiento de prisma, y adoptan una hipótesis simple en lo que se refiere a la ley de comportamiento del FRC. De hecho, consideran las aberturas totales menores a 1 mm, afirman que las tensiones de tracción producidas por las fibras tienen un valor constante y las relacionan con un comportamiento plástico.

La flecha media diferida la estiman empleando un modelo estándar hiperbólico, como se plantea en la siguiente ecuación:

$$\Delta\delta = A \left(\frac{t^{0.6}}{B + t^{0.6}} \right)$$

Donde:

$\Delta\delta$: flecha media (m).

t : tiempo bajo carga (días) y $\Delta\delta$ (m)

A : constante de ajuste.

B : constante de ajuste.

0.6: constante cinemática.

Los ensayos experimentales de fluencia (carga centro de luz al 80% del momento soportado al nivel de prefisura) fueron realizados en probetas de SFRC (60 kg/m³ de fibras de 54 mm de longitud) prismáticas de 150x200x700 mm, entalladas y prefisuradas. De la regresión, obtuvieron los siguientes valores de las constantes de ajuste:

$$A = 370.2E - 6$$

$$B = 18.1$$

Verificaron que la cinemática fue efectivamente reproducida por estos modelos. Siendo la cinemática exclusivamente para el hormigón, adoptaron la hipótesis de que el mecanismo de fluencia en estado fisurado y no fisurado tiene características cinemáticas similares. Este resultado es esencial ya que permite mantener la relación de la abertura de fisura y la curvatura en el área no fisurada, implicando que la hipótesis cinemática gobierna el modelo de comportamiento de la sección.

Por lo tanto modelan las características de fluencia de la sección fisurada mediante el desarrollo de la abertura de fisura. Consideran que las tensiones producidas por las fibras pueden ser relajadas, por lo que el problema se basa en dos incógnitas: primero la tensión de tracción producida por las fibras, y segundo la altura de la fisura en la sección.

2.4.5.5. Modelos basados en el módulo efectivo (EMM-AEMM)

El Método del Módulo Efectivo EMM (McHenry (1943) y Neville (1983)) y el Método del Módulo Efectivo Ajustado AEMM (Bazant, 1972), involucran una serie de análisis elásticos en diferentes instantes después de la aplicación de la carga, apoyándose en datos de coeficientes de fluencia y deformaciones de retracción del material. Una vez se ha determinado el módulo efectivo, las flechas diferidas pueden ser calculadas de la misma forma que las flechas instantáneas (Tan et al., 1994²).

- Flecha instantánea (EMM-AEMM)

El método considera el incremento en la carga de fisuración y en la rigidez de la viga, así como las restricciones a la fluencia y la retracción que imponen las fibras (Figura 2.34).

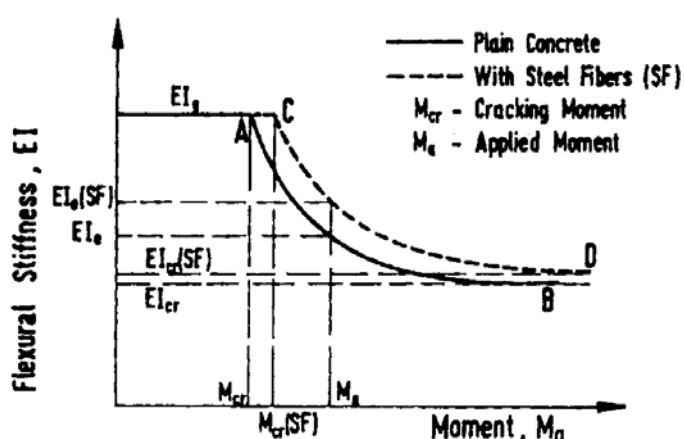


Figura 2.34. Variación en la inercia efectiva a flexión con el momento aplicado (Tan et al., 1995).

Para el cálculo de la flecha instantánea se asume un comportamiento elástico, por lo que es necesario conocer el módulo de deformación del SFRC E_{cf} y el momento de inercia efectivo I_e (empleando la fórmula de Branson).

En el cálculo del momento de fisuración M_{cr} se tiene en cuenta el aporte de las fibras:

$$M_{cr} = \frac{\varphi_{cf} \cdot I_g}{y_t}$$

Donde:

φ_{cf} : resistencia a primera fisura del compuesto.

I_g : momento de inercia bruta.

y_t : distancia del centroide de la sección a la cara de tracción.

La resistencia a primera fisura del SFRC se puede calcular utilizando una ecuación empírica propuesta por Swamy y Mangat (1974), y recomendada por ACI Committee 544.4R-88 (2009):

$$\varphi_{cf} = 0.843 f_r V_m + 2.93 V_f \frac{l_f}{d_f}$$

Donde:

f_r : módulo de rotura del hormigón simple.

$$f_r = 0.622 \sqrt{f_c}$$

f_c : resistencia a compresión del hormigón.

V_m : fracción de volumen de la matriz.

V_f : fracción de volumen de las fibras

$\frac{l_f}{d_f}$: relación de aspecto de las fibras (esbeltez).

Considerando el área homogenizada de las fibras de acero en las zonas de compresión y tracción, la inercia de la sección fisurada I_{cr} de SFRC homogenizada puede ser evaluada igual que la de una sección de hormigón armado:

$$I_{cr} = \frac{bx^3}{3} + nA_s(d-x)^2 + (n-1)A_s'(x-d')^2 + n_f A_f \frac{(h-x)^2}{3} + (n_f - 1)A_f' \frac{x^2}{3}$$

Donde:

b : ancho de la sección.

x : posición del eje neutro referenciado a la fibra extrema en compresión.

h : profundidad o altura de la sección.

- d : distancia de la cara de compresión al centroide de las barras de tracción.
 d' : distancia de la cara de compresión al centroide de las barras de compresión.
 A_s : área total de las barras de tracción.
 A_s' : área total de las barras de compresión.
 A_f : área de las fibras en zona en tracción.
 A_f' : área de las fibras en zona en compresión.
 n, n_f : coeficientes de homogenización, siendo:

$$n = \frac{E_s}{E_{cf}} \quad n_f = \frac{E_f}{E_{cf}}$$

Donde:

- E_s : módulo de deformación de las armaduras pasivas.
 E_f : módulo de deformación de las fibras de acero.
 E_{cf} : módulo de deformación del SFRC.

$$E_{cf} = (1 - \eta_1 \eta_0 V_f) E_c + \eta_1 \eta_0 V_f E_f$$

Donde:

- η_1 : factor de eficiencia en función de la longitud.
 η_0 : factor de orientación antes de la fisuración del compuesto.
 V_f : fracción del volumen de las fibras.
 E_c : módulo de deformación del hormigón simple, que se puede calcular con la siguiente expresión:

$$E_c = 4.73 \sqrt{f_c} \text{ (GPa)}$$

El área de las fibras de acero en las zonas de tracción y compresión se puede calcular según Hannant (1978) mediante:

$$A_f = \eta_1 \eta_0' V_f b (h - x)$$

$$A_f' = \eta_1 \eta_0 V_f b x$$

Donde:

- η_0' : factor de orientación después de la fisuración del compuesto.

La posición del eje neutro x puede determinarse considerando equilibrio de fuerzas y compatibilidad de deformaciones en la sección fisurada, asumiendo la distribución de tensiones de la Figura 2.35.

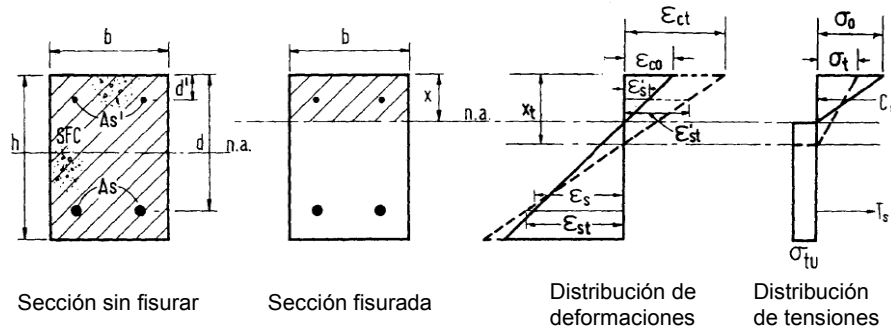


Figura 2.35. Sección de la viga con tensiones y deformaciones a tiempos t_0 y t (Tan et al., 1994²).

La contribución de esfuerzos de las fibras de acero se asume constante en la zona de tracción fisurada, e igual a la resistencia a tracción post-fisura del SFRC σ_{tu} (Lim, 1987). Esta suposición es razonable en vista de la pequeña área elástica a tracción y su proximidad al eje neutro.

Conociendo el valor de x , se puede determinar I_{cr} e I_e y obtener la flecha de la viga.

- **Flecha diferida (EMM-AEMM)**

El anterior análisis para flechas instantáneas se puede extender para evaluar las flechas diferidas empleando aproximaciones basadas en los métodos EMM y AEMM.

El coeficiente de fluencia $\phi_f(t, t_0)$ es función del tiempo y depende de la edad del hormigón en el instante de aplicación de la carga. Se define como la relación entre las deformaciones $\varepsilon_c(t, t_0)$ a tiempo t debidas a la aplicación de una carga constante y sostenida desde tiempo t_0 y la deformación elástica instantánea $\varepsilon_c(t_0)$ a tiempo t_0 :

$$\phi_f(t, t_0) = \frac{\varepsilon_c(t, t_0)}{\varepsilon_c(t_0)}$$

- **EMM**

Esta aproximación está basada en una única solución elástica empleando un módulo de deformación efectivo:

$$E_e(t, t_0) = \frac{E_{cf}(t_0)}{1 + \phi_f(t, t_0)}$$

Donde:

t_0 : edad del hormigón en el instante de aplicación de la carga (días)

t : instante en el que se evalúa la flecha (días)

$\phi_f(t, t_0)$: coeficiente de fluencia del SFRC a tiempo t .

Se obtiene el eje neutro x_t a tiempo t con la metodología anteriormente descrita para flecha instantánea, con el valor de E_{cf} reemplazado por el valor del módulo de deformación efectivo E_e . El momento de inercia de la sección fisurada homogenizada $I_{cr,t}$ a tiempo t es obtenido con la expresión anteriormente propuesta para el cálculo de I_{cr} , empleando los valores x_t , η_t y η_{ft} . Los dos últimos valores se calculan como:

$$\eta_t = \eta [1 + \phi_f(t, t_0)]$$

$$\eta_{ft} = \eta_f [1 + \phi_f(t, t_0)]$$

El momento de inercia efectivo $I_{e,t}$ a tiempo t se calcula empleando $I_{cr,t}$ y despreciando la reducción en el momento de fisuración debida a la retracción y los cambios de temperatura. La flecha instantánea y de fluencia debida a las cargas aplicadas en el instante t pueden ser entonces calculadas mediante las expresiones de resistencia de materiales reemplazando $E_{cf} I_e$ por $E_e I_{e,t}$.

- **AEMM**

Este método introduce un factor de corrección que considera el envejecimiento del hormigón. El módulo efectivo con ajuste por envejecimiento se define como:

$$E_e''(t, t_0) = \frac{E_{cf}(t_0)}{1 + \lambda_f \phi_f(t, t_0)}$$

Donde:

λ_f : coeficiente de envejecimiento, que depende del tiempo t_0 en el que la carga sostenida es aplicada, de la función de fluencia $\phi_f(t, t_0)$ y de la variación de tensiones o deformaciones con el tiempo. Asumiendo que las deformaciones mecánicas varían linealmente con el coeficiente de fluencia, o que las tensiones varían linealmente con la función de relajación $R_f(t, t_0)$, el coeficiente de envejecimiento del SFRC puede determinarse como (Bazant, 1972):

$$\lambda_f(t, t_0) = \frac{E_{cf}(t_0)}{E_{cf}(t_0) - R_f(t, t_0)} - \frac{1}{\phi_f(t, t_0)}$$

La función de relajación $R_f(t, t_0)$ puede ser aproximada para una función de fluencia $\phi_f(t, t_0)$ determinada empleando una fórmula empírica dada por Bazant y Kim (1979).

$$R_f(t, t_0) = \frac{1 - \Delta_0}{\phi_f(t, t_0)} - \frac{0.115}{\phi_f(t, t-1)} \left[\frac{\phi_f(t_0 + \xi, t_0)}{\phi_f(t, t - \xi)} - 1 \right]$$

Donde:

Δ_0 : factor de corrección igual a 0.008.

$$\xi = 0.5(t - t_0)$$

Al igual que en el método EMM, se determina x_t y $I_{cr,t}$, empleando en este caso E_e'' en lugar de E_e y utilizando la rigidez $E_e'' I_{e,t}$ para el cálculo de las flechas.

2.4.5.6. Abertura de fisura diferida

Tan et al. (1995) desarrollaron una metodología analítica para la predicción de la abertura máxima de fisura en vigas de SFRC armadas. El estudio experimental, de un año de duración, está compuesto por vigas de 100x125x2000 mm de SFRC armadas (dos barras de 10 mm en la zona de tracción y dos de 6 mm en la zona de compresión) con fibras de extremos conformados de 30 mm de longitud y 0.5 mm de diámetro y contenidos de 0, 0.5, 1, 1.5 y 2%. Los ensayos de fluencia se realizaron con los elementos cargados a tercios a $0.5 P_u$.

La abertura de fisura a corto plazo w_{if} de una viga armada de SFRC sometida a una carga sostenida ha sido correlacionada linealmente con la de una viga de hormigón armado sin fibras w_i por Tan et al. (1995):

$$w_{if} = (1 - 0.22V_f)w_i$$

Tan et al. (1995) observaron que la relación entre la abertura de fisura diferida w_{if} y la abertura de fisura a corto plazo w_{if} se reduce con un contenido de fibras V_f de hasta un 0.5% aproximadamente, y propusieron la siguiente expresión:

$$w_{if} = (0.19 + 0.06V_f - 0.022V_f^2)w_i$$

2.5. RESUMEN CRÍTICO Y CUESTIONES SIN RESOLVER

En relación con los apartados anteriores donde se ha realizado la revisión de la literatura científica relativa al SFRC y su comportamiento a fluencia en flexión en estado fisurado, se observa que además de ser un tema poco estudiado en el que se lleva trabajando alrededor de 10 años (relativamente nuevo), en la actualidad no existe una metodología y equipo de ensayo estandarizado para evaluar este fenómeno, y aún hay una gran incertidumbre sobre el comportamiento del material.

Hasta el momento se cuenta con pocas publicaciones directamente relacionadas con el tema: Chanvillard y Roque (1999), Granju et al. (2000), Mackay (2002), Cochrane (2003), Bast et al. (2007), y Barragán y Zerbino (2008), de las que cabe destacar:

- En sus estudios experimentales han empleado diferentes metodologías y equipos de ensayo.
- En algunos casos el objetivo que se persigue es realizar una comparación entre el comportamiento de fibras de acero y fibras sintéticas, por lo que el estudio del comportamiento del SFRC no es su interés particular.
- Los estudios realizados suelen quedar limitados a un tipo de hormigón, un tipo de fibra de acero, un volumen determinado de fibra de acero, un nivel de abertura de fisura o flecha, excepto Barragán y Zerbino (2008) (prefisuran entre 0.2 y 3.5 mm).
- Respecto de los niveles de carga, Granju et al. (2000) carga a un solo nivel, mientras que en las investigaciones restantes se contempla una mayor variación de niveles de carga, aunque la forma de establecer estos niveles se basa en diferentes parámetros.
- Las dimensiones de los elementos ensayados son diferentes entre las distintas investigaciones.
- Se constata el empleo de diversas normativas y procedimientos relativos a ensayos de flexotracción, y por lo tanto, parámetros como la forma de carga (centro de luz o a tercios), el entallar o no las probetas, y el registrar flechas o aberturas de fisura, varían de unas investigaciones a otras.

Las diferencias mencionadas muestran el gran contraste entre los estudios realizados, así como la escasa variación de las variables empleadas. Por lo tanto, un estudio que establezca y defina una metodología de ensayo y equipos adecuados, que tenga un enfoque centrado en evaluar exclusivamente el comportamiento de los SFRC ante este fenómeno, empleando diferentes hormigones (en términos de resistencia a compresión y comportamiento post-fisura), tipos y contenidos de fibra, niveles de carga, y que se ajuste a la normativa existente en el medio tiene cabida en este campo.

Así mismo, el análisis de los resultados de los estudios realizados presenta una gran variación en los criterios de análisis, mostrando poco consenso en la terminología y en las definiciones de criterios para la

determinación de las deformaciones instantáneas y la estabilización de las deformaciones a lo largo del tiempo, entre otros.

En cuanto a los equipos de ensayo empleados, a partir de las investigaciones realizadas sobre las deformaciones de fluencia en hormigones reforzados con fibras se constata la concepción de diversos tipos de bastidores de ensayo, los cuales se han presentado en el apartado 2.4.3, siendo destacable que:

- Los bastidores que permiten ensayar elementos en columna son poco flexibles en cuanto a adicionar o reducir el número de probetas para el que han sido concebidos.
- El ensayo desarrollado en Dalhousie (Mackay (2002) y Cochrane (2003)) es el único que, mediante los dispositivos de aplicación y transmisión de cargas para los ensayos en columna, impide la transmisión de momentos inducidos de un elemento a otro; sin embargo, la utilización de un sistema de esferas metálicas genera grandes problemas de estabilidad y dificultades en el montaje y la puesta en carga de los elementos.

Por lo que respecta a los modelos de predicción de deformaciones diferidas en flexión, no se han encontrado modelos específicos sobre la fluencia a flexión de elementos de SFRC en estado fisurado, menos aún en el caso de introducirse una prefisuración sobre probeta entallada.

Los estudios experimentales realizados sobre el tema (véase 2.4.3.2.1) basan el análisis del comportamiento del SFRC bien en la determinación y evolución de la abertura de fisura, bien en la determinación y evolución de la flecha, o bien en ambas.

La dualidad flecha-abertura de fisura también se observa en las distintas variantes de los ensayos de flexotracción (véase Tabla 2.3).

Los modelos EHE-08, ACI 318-08 y EC-2 abordan la predicción de flechas diferidas en vigas de hormigón de forma simplificada, considerando parámetros equivalentes definidos a partir de las propiedades de los materiales en los estados sin fisurar y fisurado. La introducción de un factor modificador (Mangat y Azari, (1985)) y el ajuste experimental realizado por Tan et al. (1994²), permiten aproximar dichos modelos al caso del SFRC. También puede conseguirse un mayor grado de aproximación mediante la consideración del módulo efectivo o del módulo efectivo ajustado, junto con la determinación del momento de fisuración teniendo en cuenta el aporte de las fibras.

Las propuestas de Cochrane (2003), Chanvillard y Roque (1999) y Tan et al. (1995), incluyen constantes de ajuste experimental específicos de sus respectivos estudios, y en principio no son generalizables.

Para un primer análisis del fenómeno objeto de estudio de esta Tesis Doctoral, se considerará el modelo simplificado EHE-08 como una referencia adecuada que permita de forma simplificada disponer de un patrón de evolución de las deformaciones diferidas de fluencia en flexión.

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA DEL ENSAYO DE FLUENCIA

El estudio de la fluencia a flexión de prismas de SFRC en estado fisurado es una línea de investigación novedosa, por lo que la concepción de la metodología de ensayo y el diseño del equipo de ensayo han constituido una parte importante del trabajo.

Uno de los aspectos fundamentales de este estudio ha sido el diseñar un bastidor de fluencia con sus elementos de transmisión de carga, apoyo, medida, control y adquisición de datos para realizar el ensayo, ya que no existe ningún ensayo estandarizado para estudios de este tipo.

En este apartado se exponen:

- Los criterios de diseño empleados.
- La descripción del equipo, que se compone de: bastidor, dispositivos de medida, equipo de adquisición de datos (EAD) y equipos auxiliares.
- El procedimiento operativo del ensayo: carga y descarga-recuperación.
- La presentación de resultados del ensayo.
- Los criterios para la interpretación de resultados.

3.1. CRITERIOS DE DISEÑO

Partiendo de la definición de fluencia, un ensayo que se proponga evaluar este fenómeno ha de garantizar la aplicación de una carga constante a lo largo de un periodo de tiempo que puede ser de meses y hasta de años, y así mismo ha de permitir el desarrollo adecuado de las deformaciones a lo largo del tiempo.

A partir de la recopilación bibliográfica (Swamy y Theodorakopoulos (1979), Chanvillard et al. (1999), Kurtz y Balaguru (2000), Mackay (2002), Cochrane (2003), Mackay y Trottier (2004), Bernard (2004), Bast et al. (2007) y Barragán y Zerbino (2008)) y de los requerimientos identificados, se ha concebido una metodología de ensayo y diseñado un equipo teniendo en cuenta los siguientes criterios:

El ensayo debe garantizar:

- Rigidez del sistema.
- Posibilidad de ensayar varias probetas simultáneamente.

Para analizar el proceso de fluencia se debe plantear:

- Ensayo a largo plazo.
- Aplicación de una carga constante a lo largo del tiempo.
- Optimización de la aplicación de la carga.
- Consideración de condiciones ambientales (humedad y temperatura).
- Desarrollo de deformaciones.

Se plantea realizar el estudio en flexión sobre elementos fisurados. Para ello se debe tener en cuenta:

- Estabilidad de los elementos a ensayar (condiciones de apoyo y carga).
- Necesidad de no transmitir momentos inducidos.
- Posibilidad de rotura de alguno de los elementos durante el ensayo.
- Capacidad de continuar el ensayo aunque uno de los elementos ensayados alcance la rotura.
- Garantizar la integridad de los dispositivos de medida.

La forma más directa de garantizar una carga constante a lo largo del tiempo es aplicar materialmente la carga sobre los elementos a ensayar, pero teniendo en cuenta la magnitud de las cargas a aplicar (cargas máximas de alrededor de 50-60 kN) resulta poco práctico, por lo que el empleo de una forma de optimizar la carga debe ser considerado.

Con la idea de optimizar la aplicación de la carga teniendo como requisito mantenerla constante, se concibe un esquema de carga compuesto por (Figura 3.1):

- Palanca de segundo género: el punto de apoyo está en un extremo de ella, la potencia o fuerza motriz en el otro extremo y la resistencia en algún punto intermedio.
- Potencia (contrapeso que se aplica en el extremo libre).
- Resistencia (carga que se aplica a las probetas durante el ensayo).

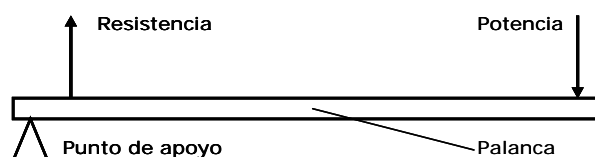


Figura 3.1. Esquema de palanca de segundo género.

Por otro lado, por condicionantes de tiempo y espacio se ha considerado la posibilidad de trabajar en columna de modo que se pudieran ensayar tres probetas al mismo tiempo en cada bastidor. Esto exige garantizar la estabilidad de los elementos, no transmitir momentos inducidos y poder continuar los

ensayos en caso de rotura de alguna de las probetas. Para ello se ha diseñado un sistema de transmisión de fuerzas, compuesto por un elemento de transmisión de carga de la palanca a la probeta superior, dos elementos de apoyo y transmisión de carga a la probeta inmediatamente inferior y un apoyo final de la probeta inferior de la columna. Además, se condiciona el ensayo para que se realice con carga a dos puntos (a tercios de la luz).

3.2. DISEÑO DEL EQUIPO DE ENSAYO

En el diseño del equipo de ensayo de fluencia se han diferenciado tres partes que son: bastidor y componentes, dispositivos de medida, y equipo de adquisición de datos (EAD), tal como se presentan en la Figura 3.2.

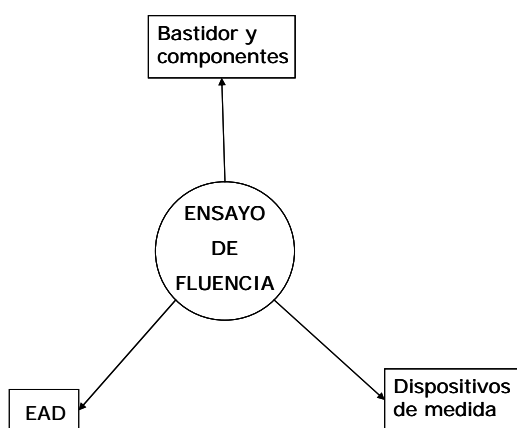


Figura 3.2. Partes del equipo del ensayo de fluencia.

El bastidor y sus componentes deben garantizar la capacidad de mantener la carga aplicada y las condiciones de ensayo a lo largo del tiempo a pesar de las deformaciones de las probetas.

Los dispositivos de medida se emplearán para conocer las aberturas de fisura, las deformaciones del hormigón a compresión y la carga aplicada.

El EAD debe tener la capacidad de tomar lecturas de los dispositivos de medida empleados, con la cadencia requerida en cada etapa del ensayo, y de guardarlos para su posterior análisis. Dada la duración del ensayo, resulta conveniente que el equipo tenga la capacidad de auto-reiniciarse si se da un corte de energía para así continuar con la toma de datos perdiendo la menor cantidad posible de estos.

3.2.1. BASTIDOR Y COMPONENTES

El bastidor está inspirado en el propuesto por Bast et al. (2007), está conformado por perfiles metálicos y se puede descomponer en las siguientes partes (Figura 3.3):

- Base de apoyo del bastidor. (a)
- Perfiles verticales apoyo de probetas. (b)

- Perfiles verticales apoyo de palanca. (c)
- Palanca transmisora de carga. (d)
- Placa de apoyo de contrapesos. (e)

Otros elementos (diferentes a perfiles):

- Placa de carga. (f)
- Barras de tiro roscadas transmisoras de carga. (g)
- Elementos de transmisión de carga y posicionamiento. (h) (i)

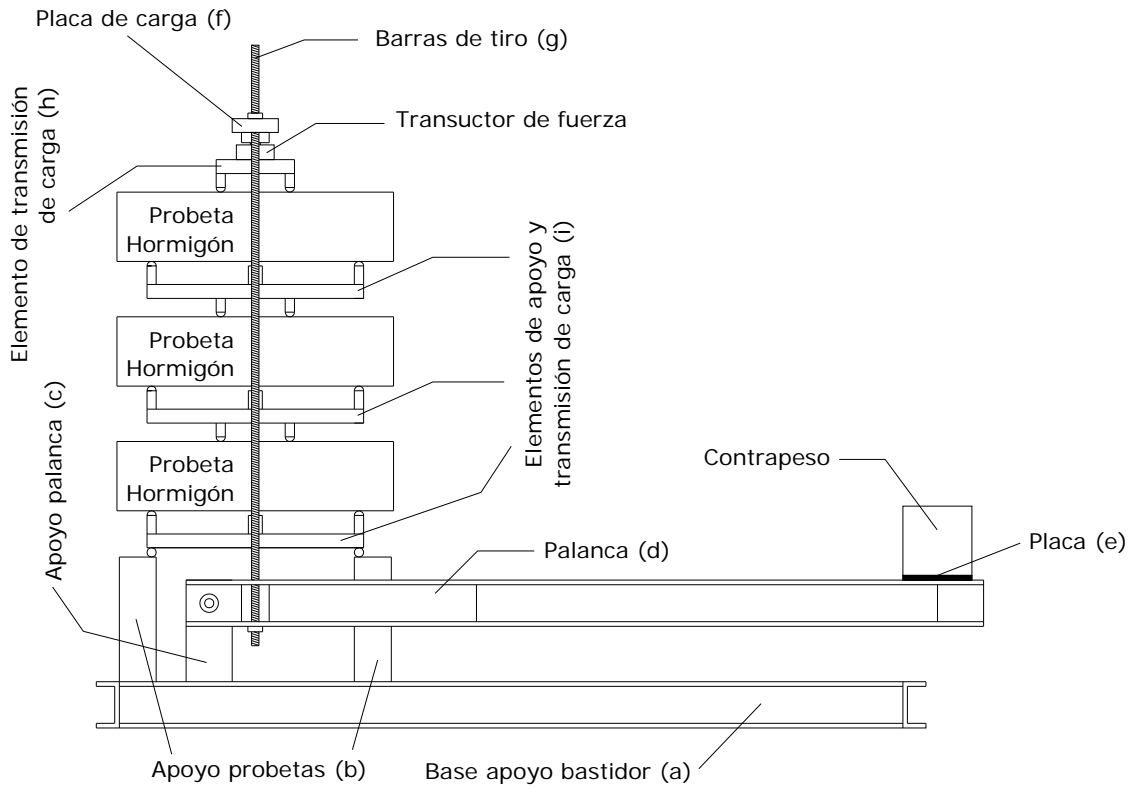


Figura 3.3. Esquema del bastidor.

En la Figura 3.4 se presenta la imagen del bastidor en funcionamiento.



Figura 3.4. Bastidores en funcionamiento (vista general y detalle de columna de probetas).

La base de apoyo (a) está compuesta por cuatro perfiles en planta (dos longitudinales principales y dos más cortos en dirección ortogonal) (Figura 3.5).

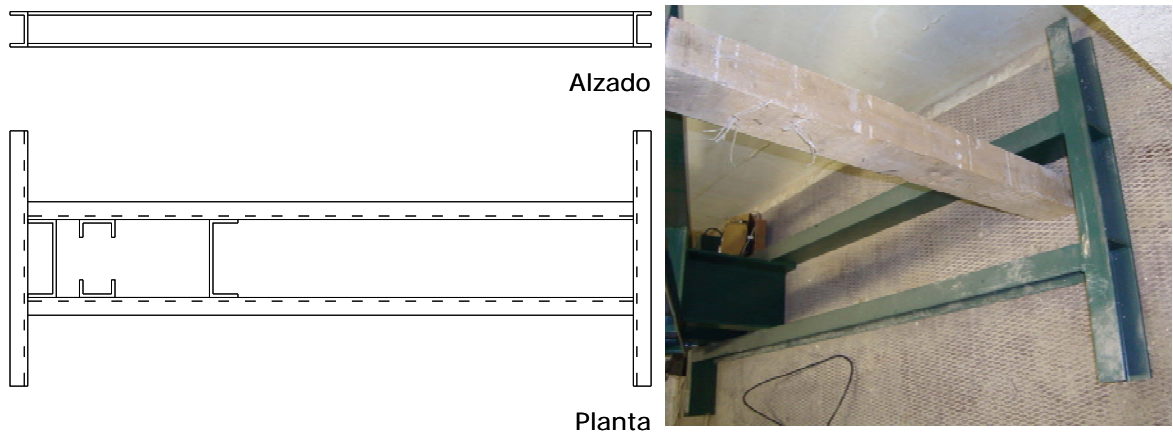


Figura 3.5. Base de apoyo del bastidor (esquema y foto).

La columna de probetas se apoya en su parte baja sobre dos perfiles verticales (b) que están soldados a los perfiles longitudinales de la base de apoyo (Figura 3.6).

La palanca (d) tiene como punto de apoyo los perfiles (c) y está formada por dos perfiles longitudinales y dos perfiles transversales cortos que rigidizan el conjunto. En el extremo opuesto al punto de apoyo dispone de una zona de posicionamiento de masas (piezas de hormigón) que generan la fuerza que se aplica a las probetas, tal como se presenta en la Figura 3.6. La fuerza se transmite desde la palanca a las probetas mediante un par de barras roscadas de tiro (g), dispuestas verticalmente, que van desde la palanca (d) a la placa de transmisión de carga (f) ubicada en la parte superior de las probetas. La palanca definida multiplica la carga aplicada por 15.

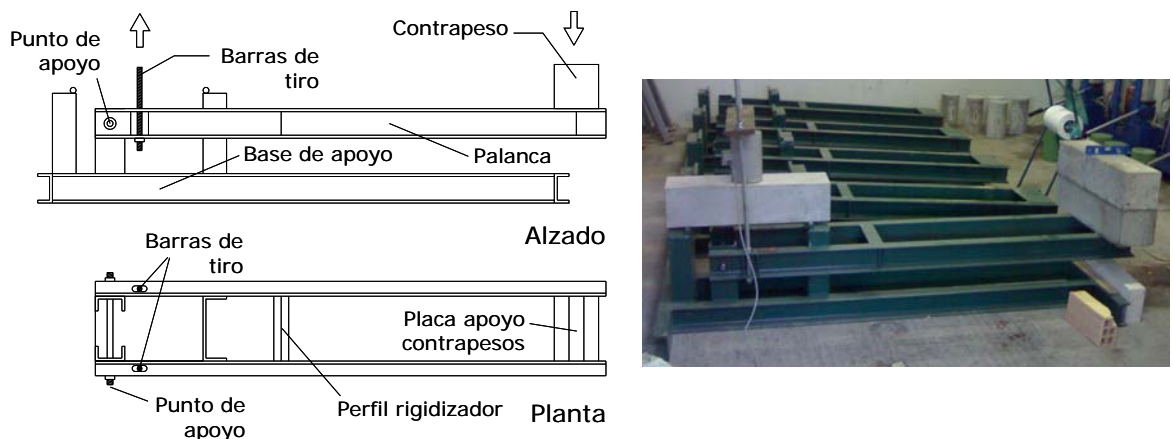


Figura 3.6. Palanca transmisora de carga (esquema y foto).

Adicionalmente se han diseñado elementos para realizar funciones de apoyo y de transmisión de carga entre las probetas (Figuras 3.7 y 3.8).

El elemento de transmisión de carga (h) a la probeta superior está compuesto por una placa base de 30 mm de espesor y dos puntos de carga semicirculares separados a una distancia de 150 mm. Uno de ellos permite el giro en el sentido transversal (con el propósito de evitar momentos trasversales inducidos) de la probeta mientras que el otro es fijo. Este elemento posee además una muesca que permite el correcto centrado del transductor de fuerza en su parte superior (Figura 3.7).

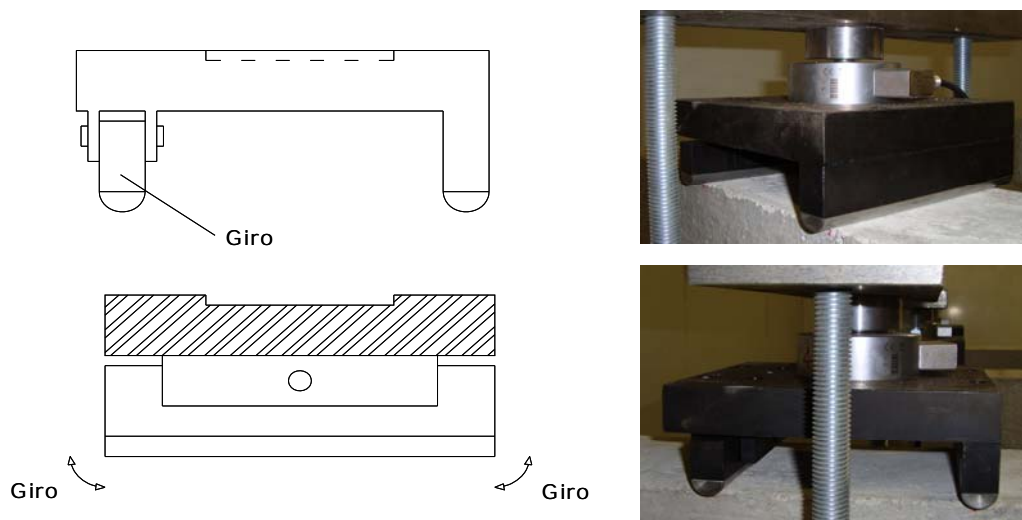


Figura 3.7. Elemento de transmisión de carga (h) a probeta superior (esquema y fotos).

El elemento de apoyo y transmisión de carga (i) está compuesto por una placa base de 30 mm de espesor, dos puntos de apoyo en la cara superior y dos puntos de carga semicirculares en la cara inferior, en cada cara uno de ellos permitiendo el giro en el sentido transversal de la probeta y el otro fijo, los puntos de apoyo separados 450 mm y los de carga de 150 mm. Este elemento además posee dos pletinas de apoyo en la parte superior para resguardar el transductor de desplazamiento y permitir la continuación del ensayo tras una posible rotura (Figura 3.8).

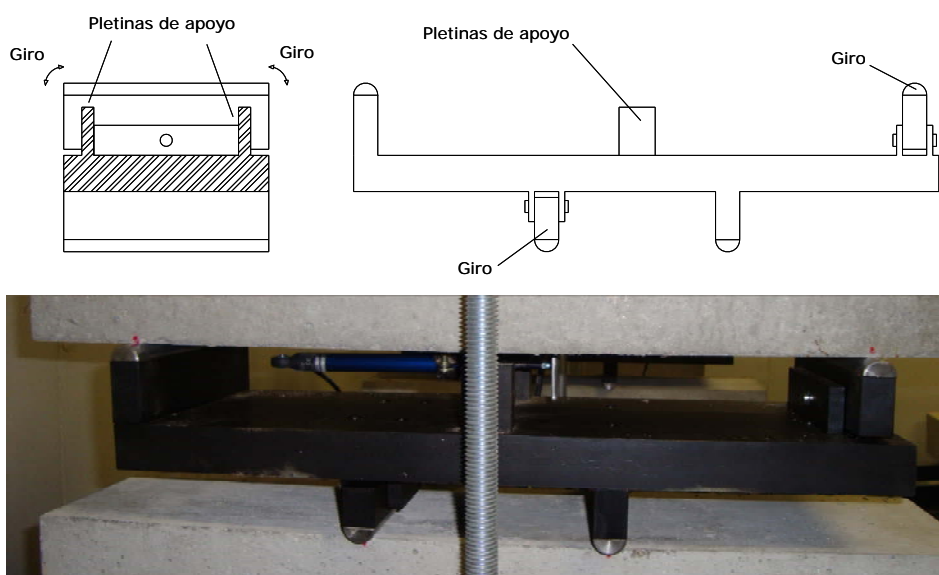


Figura 3.8. Elemento de apoyo y transmisión de carga (i) (esquema y foto).

3.2.2. DISPOSITIVOS DE MEDIDA

En el ensayo de fluencia se requiere medir:

- Fuerza aplicada.
- Abertura de fisura.
- Deformaciones del hormigón.
- Temperatura y humedad relativa.

En la Figura 3.9 se presenta la probeta instrumentada.



Figura 3.9. Probeta instrumentada, con banda extensométrica en cara superior (izquierda) y transductor de desplazamiento en cara inferior (derecha).

Para medir la fuerza se ha empleado un transductor de fuerza del tipo C2S de 50 kN de la casa AEP Transducers; sus dimensiones son las adecuadas para las características del ensayo y se utiliza con la cabeza de acero que hace las veces de rótula y permite una mejor medida y transmisión de la carga (Figura 3.10). Se dispone entre la placa de carga (f) y el elemento de transmisión de carga a probeta superior (h).



Figura 3.10. Transductor de fuerza.

Para medir la abertura de fisura en el ensayo de fluencia se han dispuesto transductores de desplazamiento Penny & Giles SLS130/50/L/50/01/N (50 mm) (Figura 3.11).



Figura 3.11. Transductor de desplazamiento emplazado en la probeta.

Se han empleado bandas extensométricas para medir las deformaciones del hormigón en la zona de compresión. Las bandas empleadas han sido del tipo HBM 50/120LY41-3-0.5M (Figura 3.12).



Figura 3.12. Banda extensométrica HBM tipo 50/120LY41-3-0.5M.

Los ensayos de fluencia se han realizado en una cámara con humedad y temperatura controladas (Figura 3.13), que aísla la humedad y la temperatura del exterior con una puerta que posee una cortina de lamas para minimizar el intercambio con el ambiente exterior. Posee un equipo de aire acondicionado y un calefactor para controlar la temperatura, así como un humidificador y un deshumidificador para controlar la humedad.



Figura 3.13. Cámara con humedad y temperatura controladas.

En el interior de la cámara de humedad y temperatura controladas, se ha empleado un transductor del tipo Comet T0210 que mide la humedad y temperatura, con un rango de medida de 0% a 100% HR y -30°C a 80°C y con una precisión de $\pm 2\%$ HR y $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ (Figura 3.14).



Figura 3.14. Transductor humedad y temperatura Comet T0210.

3.2.3. EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El Equipo de Adquisición de Datos (EAD) se presenta en la Figura 3.15. Está compuesto por un “field point” y un ordenador, con los que se leen y graban las medidas de los transductores de fuerza, transductores de desplazamiento, bandas extensométricas y transductor de humedad y temperatura.



Figura 3.15. Equipo de adquisición de datos (EAD).

Para la adquisición de datos se ha empleado un “field point” de la casa National Instruments® con capacidad para 4 módulos, siendo dos del tipo NI FP-AI-110 y dos del tipo NI FP-SG-140. El NI FP-AI-110 es un módulo de entrada de 8 canales para medida directa de milivoltios, bajo voltaje o señales de miliamperios de sensores y transmisores; se han empleado para los transductores de desplazamiento y el transductor de humedad y temperatura. El NI FP-SG-140 es un módulo de entrada de 8 canales para medida directa de bandas extensométricas de puente completo y medio puente como transductores de fuerza, sensores de fuerza y par; en este caso han sido empleados para los transductores de fuerza y las bandas extensométricas.

El ordenador se ha configurado para que tenga la capacidad de reiniciarse automáticamente cuando haya un corte en el suministro de energía y continuar tomando los datos. Trabaja con un software que se ha desarrollado específicamente para el ensayo por parte del personal técnico de ICITECH, muestra en pantalla lecturas y medidas de los módulos y almacena las lecturas

en dos ficheros diferentes: uno de cadencia lenta (una lectura cada 3600 segundos) y otro de lecturas rápidas (una lectura cada 5 segundos), para así tener capacidad de analizar movimientos súbitos a lo largo del ensayo.

3.2.4. EQUIPOS AUXILIARES

Para fabricar, conservar y preparar las probetas para los ensayos, se han empleado diversos equipos de uso general en laboratorio que se presentan a continuación:

- Hormigonera Ibertest, modelo M100, de eje vertical con tambor giratorio (Figura 3.16). Capacidad: 100 litros. Se ha utilizado para ajustar los hormigones y para fabricar los hormigones de la Serie 1.
- Hormigonera Betonmass, modelo ST 150 CD, de eje vertical con tambor fijo (Figura 3.16). Capacidad: 150 litros. Empleada para fabricar los hormigones de las Series 2 y 3.



Figura 3.16. Hormigoneras empleadas: M100 (izquierda) y ST 150 CD (derecha).

- Moldes (prismáticos, cilíndricos y cúbicos). Se han empleado moldes metálicos para fabricar las probetas cúbicas, cilíndricas y prismáticas empleadas en el estudio (Figura 3.17).



Figura 3.17. Moldes empleados.

- Mesa vibrante. Las probetas fabricadas se han compactado mediante vibración externa empleando una mesa vibrante como la presentada en la Figura 3.18.



Figura 3.18. Mesa vibrante con moldes preparados.

- Cámara de conservación, con humedad relativa igual o superior al 95% y temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ (UNE 83.504:2004), para conservación de probetas de hormigón (Figura 3.19).



Figura 3.19. Cámara húmeda para curado de probetas.

- Sierra de corte húmedo, con la que se ha realizado la entalla a las probetas prismáticas (Figura 3.20).



Figura 3.20. Sierra de corte húmedo.

- Prensa servocontrolada Ibertest, modelo MEH-3000-LCMD2W de 3000 kN. Esta prensa se ha empleado para realizar los ensayos de resistencia a compresión y módulo de deformación (Figura 3.21).



Figura 3.21. Prensa servocontrolada para ensayos de compresión y módulo de deformación.

- Cámara de ensayo temperatura y humedad controladas, donde se han realizado los ensayos de fluencia a 20°C y 50% de HR (Figura 3.13).

3.3. PROCEDIMIENTO OPERATIVO DE ENSAYO

El procedimiento operativo del ensayo de fluencia incluye una etapa de amasado del hormigón, hormigonado de las probetas, conservación y preparación, prefisuración, para luego realizar el ensayo de fluencia sobre los elementos prefisurados y finalizar con la rotura de los elementos en un ensayo instantáneo. Se presenta en forma de esquema en la Figura 3.22.

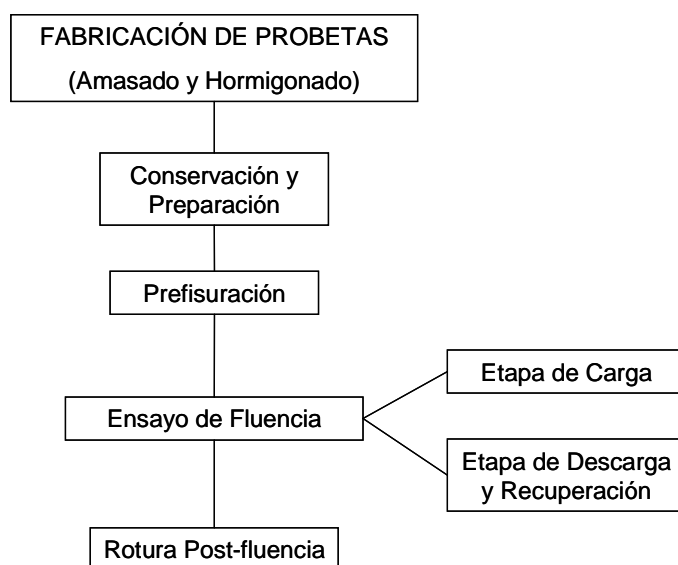


Figura 3.22. Esquema procedimiento operativo de ensayo.

3.3.1. AMASADO

El procedimiento de amasado se ha establecido fijando unos tiempos de amasado y unos criterios de aceptación del hormigón. La humedad de los áridos ha sido determinada (previamente para cada amasada) y se han realizado correcciones por humedad a las dosificaciones de cada una de las amasadas.

Con las palas de la amasadora en movimiento se fabrica el hormigón del siguiente modo:

Minuto 0	Adición grava y arena (orden de tamaño descendente)
Minuto 2	Adición del cemento
Minuto 4	Vertido del agua (durante 1 minuto)
Minuto 6	Adición del aditivo (durante 1 minuto)
Minuto 8	Adición de las fibras (durante ½ minuto)
Minuto 12	Fin de amasado (fibras adecuadamente dispersas) Control consistencia

El control de la consistencia del hormigón fresco se ha realizado mediante el método del Cono de Abrams (UNE-EN 12350-2:2006).

3.3.2. HORMIGONADO

Con los moldes (con desencofrante) y el hormigón previamente preparados se procede al hormigonado mediante vertido directo. Las probetas (prismas 150x150x600 mm) se hormigonan siguiendo las recomendaciones de la UNE-EN 14651:2007 + A1:2008 (Figura 3.23):



Figura 3.23. Secuencia de llenado del molde (UNE-EN 14651:2007 + A1:2008).

1. Se distinguen dos zonas: la zona central (1) y las zonas extremas (2).
2. La cantidad de hormigón vertido en la zona 1 debe ser aproximadamente el doble de la vertida en una zona 2.
3. Llenado de zona central del molde (zona 1).
4. Llenado de zonas extremas del molde (zonas 2).
5. El molde se llena, antes de compactar, hasta el 90% de su capacidad.
6. La compactación se realiza mediante vibración externa (mesa vibrante) durante 20 segundos (Figura 3.18).
7. Durante la compactación se rellena la cantidad faltante de hormigón.
8. Nivelación y acabado.

Las probetas cilíndricas (150x300 mm) y cúbicas (100x100x100 mm) se hormigonan en dos capas, compactando cada capa en mesa vibrante durante 20 segundos.

3.3.3. CONSERVACIÓN Y PREPARACIÓN

Una vez fabricado el hormigón y hormigonadas las probetas, éstas se cubren con plástico y se dejan las primeras 24 horas en ambiente de laboratorio (temperatura entre 15°C y 30°C y una HR entre 50% y 70%). Después se desmoldan y se conservan durante 28 días en cámara húmeda a temperatura de 20°C y humedad relativa mayor del 95%.

Las probetas cúbicas no requieren ningún tipo de preparación antes de ser ensayadas a compresión.

Las probetas cilíndricas, 2 horas antes de ser ensayadas a módulo de deformación (según UNE-EN 1352:1997) o compresión simple (según UNE 83.507:2004), se retiran de la cámara de conservación para ser refrentadas con mortero de azufre, quedando depositadas nuevamente en la cámara de conservación hasta el momento de ser ensayadas.

En las probetas prismáticas:

- A los 21 días se realiza una entalla de 25 mm en la sección de centro de luz de la probeta. El corte se hace habiendo girado el elemento 90° respecto de su posición de hormigonado, es decir, por una de las caras laterales, tal como se presenta en la Figura 3.24.
- Después de realizar la entalla las probetas se almacenan de nuevo en la cámara de conservación hasta los 28 días.
- A los 28 días se retiran las probetas de la cámara de conservación para ser instrumentadas por su cara entallada, poniendo el transductor de desplazamiento a un lado de la entalla y una placa de apoyo al otro lado, tal como se indica en 3.3.4 (Figura 3.25 imagen derecha y Figura 3.26).

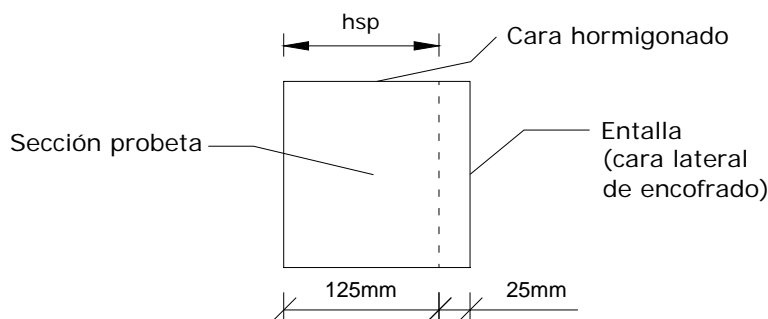


Figura 3.24. Detalle posición entalla respecto de hormigonado.

3.3.4. PREFISURACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYOS DE FLUENCIA

La prefisuración de las probetas se ha realizado siguiendo la metodología para el ensayo de flexotracción (Tabla 3.1 y Figuras 3.25 y 3.26), con la siguiente variante: cuando se alcanza el valor de abertura de fisura nominal w_n definido en el programa de ensayos para cada probeta, se procede a la descarga de la probeta y se registra el proceso de descarga y de recuperación instantánea.

Los ensayos de flexotracción se han realizado siguiendo parcialmente las recomendaciones de la norma UNE-EN 14651:2007 + A1:2008, adaptando algunos aspectos a las particularidades de las condiciones del ensayo de fluencia.

La Tabla 3.1 muestra una comparación entre las variables del ensayo a flexotracción según la norma UNE-EN 14651:2007 + A1:2008 y la adaptación para este estudio.

Tabla 3.1. Comparación del montaje del ensayo de flexotracción del estudio y de la UNE-EN 14651:2007 + A1:2008.

Variables	UNE-EN 14651	Montaje Estudio
Sección elemento	150x150 mm	150x150 mm
Longitud elemento	600 mm	600 mm
Distancia puntos de apoyo	500 mm	450 mm
Aplicación carga	Centro de luz	Tercios
Giro elemento 90°	Si	Si
Entalla 21 días	Si	Si
Control ensayo abertura fisura	Si	Si

La Figura 3.25 ilustra sendos esquemas de ensayo según UNE-EN 14651:2007 + A1:2008 y según la adaptación realizada para este estudio.

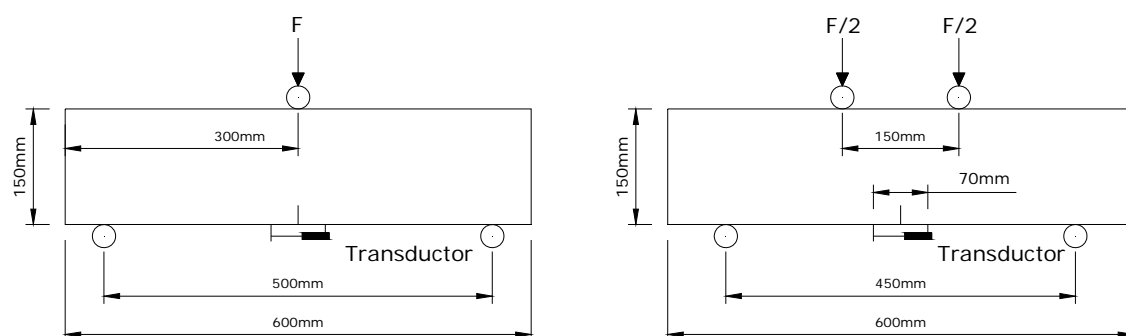


Figura 3.25. Esquema de ensayo a flexotracción según UNE 14651 (izquierda) y según adaptación realizada (derecha).

La Figura 3.26 presenta una imagen del montaje empleado en un ensayo real.



Figura 3.26. Montaje de ensayo a flexotracción empleado en el estudio.

En las Figuras 6.11, 6.12 y 6.13 se muestran tres ejemplos de la curva carga-abertura de fisura correspondiente al proceso de prefisuración. En la Figura 3.27 se presenta una idealización de los parámetros relativos al proceso de prefisuración. Los parámetros obtenidos de este proceso son:

- w_p : abertura de fisura máxima en proceso de prefisuración, medida en captador.
- w_{pr} : abertura de fisura residual en proceso de prefisuración, medida en captador.
- F_L : carga de primera fisura.
- F_w : carga para w_p .

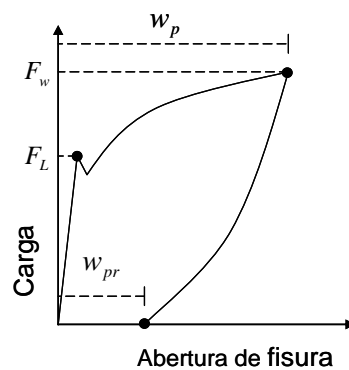


Figura 3.27. Parámetros del proceso de prefisuración.

3.3.5. ENSAYO DE FLUENCIA

Después de realizar la prefisuración, se disponen las probetas en la cámara de ensayo, con humedad y temperatura controladas, donde están ubicados los bastidores del ensayo de fluencia. Las probetas se transportan apoyadas en dos maderas (Figura 3.28), con el transductor de desplazamiento hacia arriba (sentido invertido al del ensayo), poniendo especial atención en no golpear las probetas ni los transductores de desplazamiento.

Las probetas se introducen en la cámara de ensayo de fluencia y se someten, antes de empezar el montaje en los bastidores, a un periodo de

aclimatación de dos horas de duración para dar inicio a la estabilización de la humedad y la temperatura.



Figura 3.28. Probetas prefisuradas preparadas para ser llevadas a la cámara.

3.3.5.1. Etapa de carga

Con el EAD en funcionamiento (tomando lecturas), se procede al montaje de la columna de probetas del siguiente modo:

1. Se levanta el brazo del bastidor hasta una altura de 0.35 m respecto del nivel del suelo mediante un apoyo, materializado con un separador de madera (Figura 3.29).
2. Se ubica el primer dispositivo de apoyo sobre unos neoprenos para mejorar el nivel y la estabilidad sobre los perfiles del bastidor (Figura 3.30).
3. Se coloca la primera probeta sobre el primer dispositivo de apoyo, cuidando la integridad y correcto posicionamiento tanto del transductor de desplazamientos como de la probeta (Figura 3.31).
4. Se conecta el transductor de desplazamiento del primer elemento al "field point" y se corrobora que las lecturas se estén tomando de forma correcta.
5. Se toma el cero del transductor de desplazamiento.
6. Se coloca el primer elemento de transmisión de carga a probeta inferior y apoyo de probeta superior, correctamente ubicado.

Los pasos descritos en los numerales del 3 al 6 se repiten para la colocación de cada una de las dos probetas siguientes montadas en el mismo bastidor (Figuras 3.31 ,3.32 y 3.33). Una vez posicionada la tercera probeta (Figura 3.33) se continúa con los siguientes pasos:

7. Se ubica el elemento de transmisión de carga sobre la última probeta y se comprueba su correcta posición.
8. Se emplaza el transductor de fuerza en el espacio previsto para éste en el elemento de transmisión de carga (Figura 3.34).
9. Se conecta el transductor de fuerza al "field point" y se corrobora que las lecturas se estén tomando de forma correcta.
10. Se toma el cero del transductor de fuerza.
11. Se coloca la placa de carga y se aproximan las tuercas que la fijan a las barras de tiro, siempre controlando la horizontalidad de la placa de transmisión de carga con un nivel.

12. Apretando las tuercas se aplica una precarga de alrededor de 4 kN, necesaria para liberar el apoyo (madera) de la palanca (Figura 3.35).
13. Se retira el apoyo provisional de madera.
14. Se colocan los contrapesos requeridos para aplicar la carga definida para el ensayo (Figura 3.36). Esta operación se realiza con precaución evitando golpes o cargas bruscas. La carga aplicada se controla por medio de la medida registrada en el transductor de fuerza.

Finalizado el montaje del bastidor de fluencia, se considera iniciado el ensayo. El ensayo continúa de forma ininterrumpida con los elementos cargados, hasta que se decide realizar la descarga.

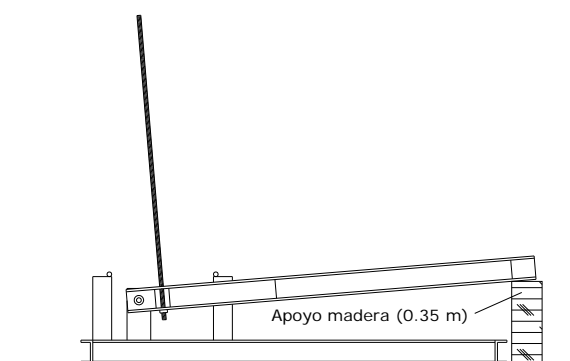


Figura 3.29. Posicionamiento del brazo de la palanca.

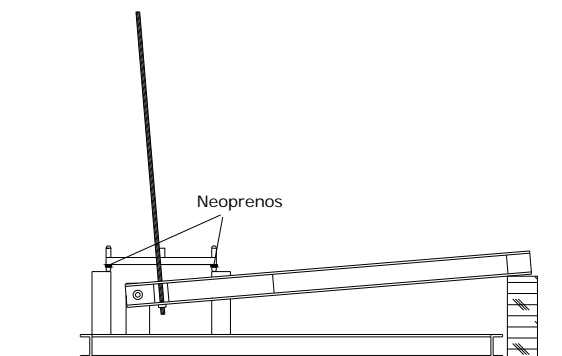


Figura 3.30. Colocación de neoprenos y primer apoyo.

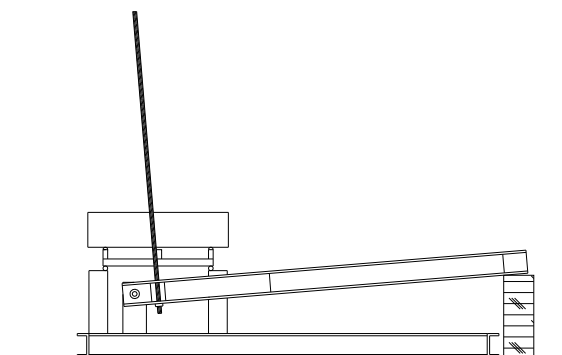


Figura 3.31. Colocación de primera probeta.

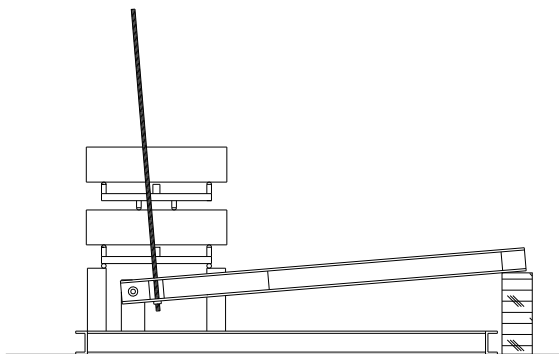


Figura 3.32. Colocación de segunda probeta.

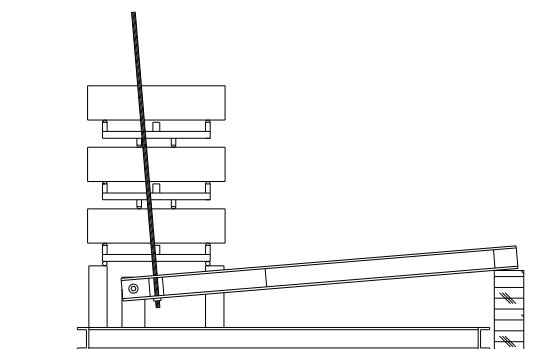


Figura 3.33. Colocación de tercera probeta.

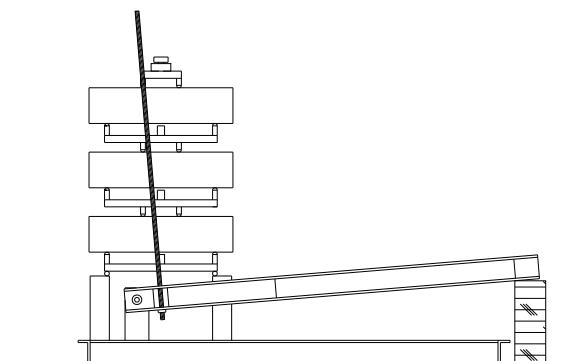


Figura 3.34. Colocación de elemento de carga y célula.

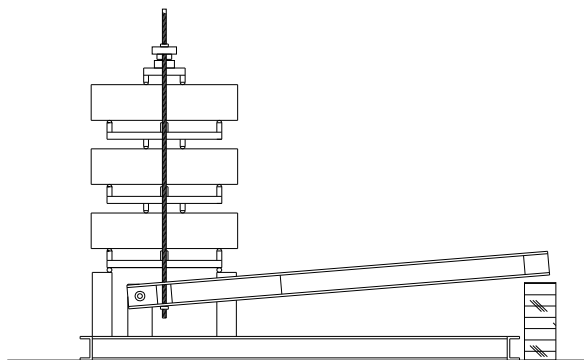


Figura 3.35. Brazo de palanca levantado (por aproximación de las tuercas superiores).

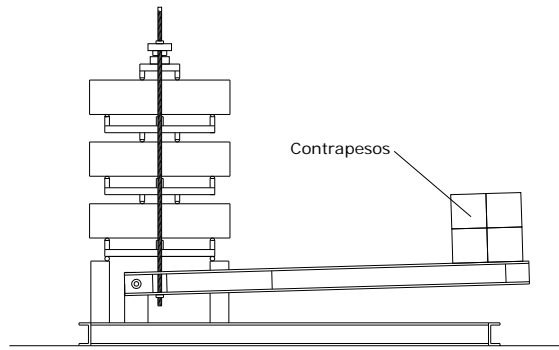


Figura 3.36. Bastidor con contrapesos (en funcionamiento).

En la Figura 3.37 se presenta una idealización de la descomposición de los parámetros relativos a la abertura de fisura en el ensayo de fluencia, en etapa de carga. Los parámetros obtenidos de este proceso son:

- F_a : carga aplicada (kN).
- w_{ci} : abertura de fisura inicial (al principio del ensayo de fluencia tras estabilizar la carga durante 1 minuto), medida en captador (mm).
- w_{cd}^j : abertura de fisura diferida a tiempo j , medida en captador (mm).
- w_{ct}^j : abertura de fisura total a tiempo j , medida en captador (mm), obtenida como:

$$w_{ct}^j = w_{ci} + w_{cd}^j$$

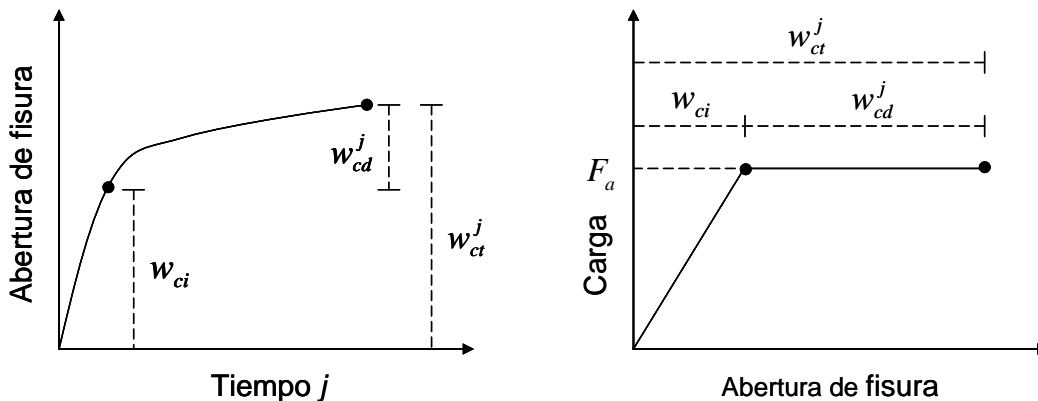


Figura 3.37. Descomposición de parámetros de abertura de fisura en curvas abertura de fisura vs. tiempo y carga vs. abertura de fisura. Etapa de carga.

3.3.5.2. Etapa de descarga y recuperación

1. Finalizada la etapa del ensayo en carga, se procede a la descarga mediante un gato hidráulico manual dispuesto para levantar el extremo libre de la palanca (Figura 3.38).
2. Se liberan las tuercas que aproximan la placa de carga al transductor de fuerza.

3. Se retira la placa de reparto, el transductor de fuerza y el dispositivo de transmisión de carga de la cara superior de la probeta.
4. Se retiran los contrapesos.
5. Las probetas permanecen sin carga durante dos semanas y se registra la recuperación de las deformaciones diferidas tras la descarga (Figura 3.39).
6. Se retiran las probetas del bastidor y se procede a la rotura final de las probetas.

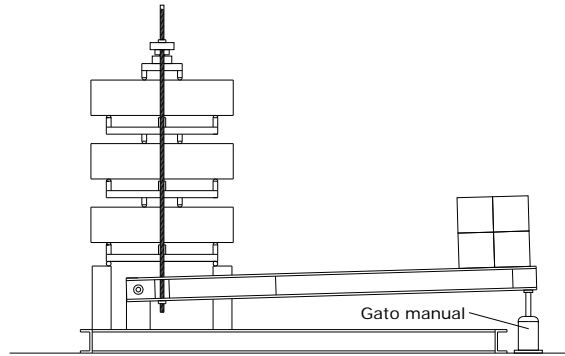


Figura 3.38. Proceso de descarga con gato.

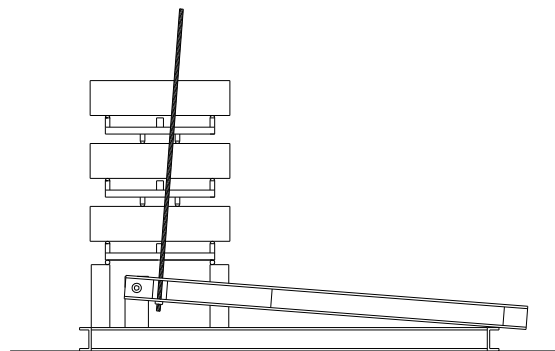


Figura 3.39. Bastidor descargado.

En la Figura 3.40 se presenta una idealización de la descomposición de los parámetros relativos a la recuperación de abertura de fisura en el ensayo fluencia, en etapa de descarga y recuperación.

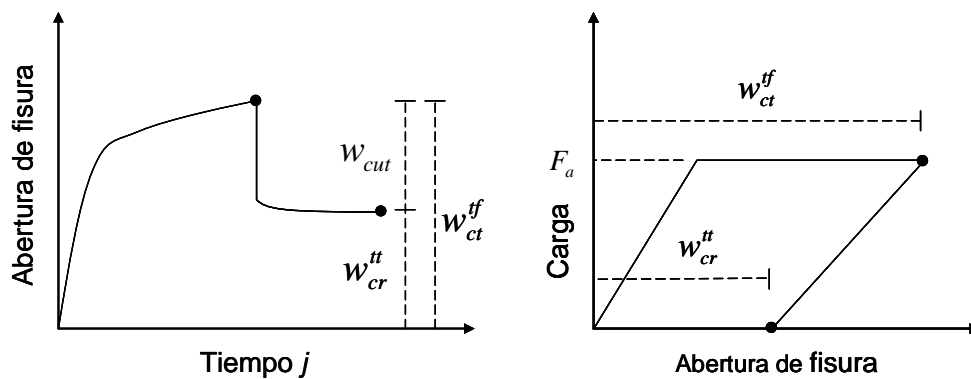


Figura 3.40. Descomposición de parámetros de recuperación de abertura de fisura en curvas abertura de fisura vs. tiempo y carga vs. abertura de fisura. Etapa de descarga y recuperación.

Los parámetros obtenidos de este proceso son:

- w_{ct}^{ff} : abertura de fisura total en el instante previo a la descarga (tiempo final t_f), medida en captador (mm).
- w_{cr}^{ff} : abertura de fisura residual al final del ensayo de fluencia (tiempo t_i), después de la etapa de recuperación, medida en captador (mm).
- w_{cut} : abertura de fisura recuperada total en la etapa de descarga y recuperación medida en captador (mm), que se puede expresar como (Figura 3.41):

$$w_{cut} = w_{ct}^{ff} - w_{cr}^{ff} = w_{cui} + w_{cud}$$

Donde:

- w_{cui} : abertura de fisura recuperada instantánea al descargar (al principio de la etapa de descarga en el ensayo de fluencia tras estabilizar la descarga durante 1 minuto), medida en captador (mm).
- w_{cud} : abertura de fisura recuperada diferida después de la descarga en etapa de recuperación (recuperación acumulada después de dejar estabilizar la carga durante 1 minuto), medida en captador (mm).

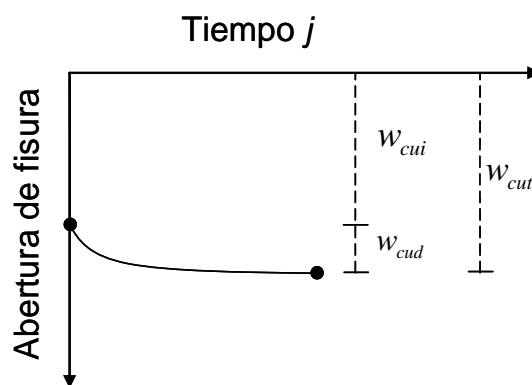


Figura 3.41. Descomposición de parámetros de recuperación de abertura de fisura en curva abertura de fisura vs. tiempo. Etapa de descarga y recuperación exclusivamente.

3.3.6. ROTURA POST-FLUENCIA DE LAS PROBETAS

Al finalizar el ensayo de fluencia (etapas de carga y de descarga y recuperación), se procede a la rotura post-fluencia de las probetas en ensayo de flexotracción, siguiendo la metodología expuesta en 3.3.4 y 5.2.1.3 hasta alcanzar valores de abertura de fisura mayores que 4 mm.

3.4. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO

Los resultados de los ensayos de fluencia se presentan mediante un gráfico carga-abertura de fisura y una ficha de ensayo.

3.4.1. GRÁFICO DE ENSAYO

La probeta objeto de ensayo pasa por un proceso de prefisuración, una etapa de carga y una de descarga y recuperación en bastidor de fluencia y, por último, rotura post-fluencia en ensayo de flexotracción. Ensamblando secuencialmente los resultados experimentales registrados en las fases anteriores se elabora un gráfico carga aplicada-abertura de fisura en el que se representa esta evolución (Figura 3.42), de modo que los valores de abertura de fisura pueden referenciarse a origen.

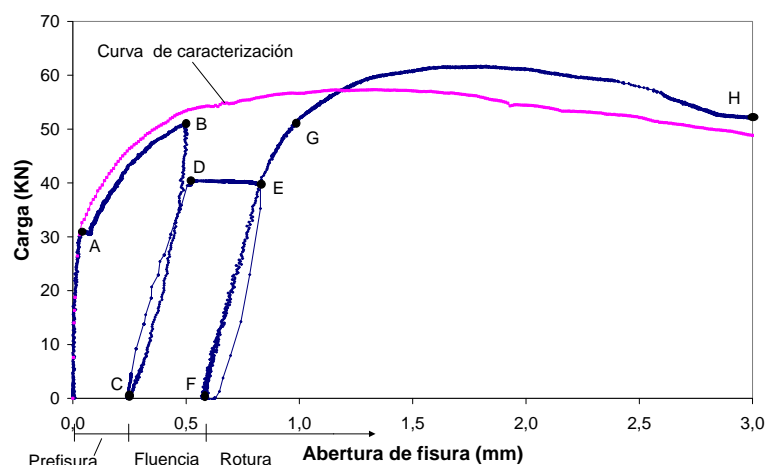


Figura 3.42. Representación gráfica de resultados de ensayo.

La fase de prefisuración comprende la primera parte del gráfico:

1. Se inicia en cero.
2. Tiene una rama ascendente lineal hasta que se produce la primera fisura (A).
3. Se lleva la probeta al nivel de prefisuración definido (B) y se descarga, registrando la capacidad de recuperación del elemento. El punto (C) queda como punto de inicio del ensayo de fluencia.

La fase de fluencia está comprendida por:

4. Una rama ascendente (CD) correspondiente al proceso de carga.
5. Una zona prácticamente horizontal (DE) que corresponde al desarrollo de deformaciones diferidas, y que finaliza cuando se procede a la descarga del bastidor de fluencia.
6. Y una curva descendente (EF) que refleja la capacidad de recuperación.

La fase de rotura final:

7. Tiene una rama ascendente (FG).
8. Y continúa con la curva que corresponde a la respuesta residual del elemento (GH).

En la Figura 3.42 se incluye también la curva carga-abertura de fisura obtenida del ensayo de caracterización a flexotracción (instantáneo).

3.4.2. FICHA DE ENSAYO

Para cada probeta ensayada en los bastidores de fluencia se ha elaborado una ficha de ensayo donde se encuentran los datos más relevantes, incluyendo los de ensayos de caracterización del material (compresión, módulo de deformación y flexotracción) y los resultados obtenidos del ensayo de fluencia (prefisuración, carga y descarga en bastidores de fluencia, rotura final). La ficha de ensayo responde al modelo presentado en la Figura 3.43, y contiene la siguiente información:

a. Recuadro de encabezado

Se encuentra ubicado en la parte superior izquierda de la ficha de ensayo y contiene:

- Número identificativo de probeta
- Número de serie a la que pertenece.
- Número de bastidor en el que se realiza el ensayo.

b. Fabricación (hormigonado)

Contiene la información relativa a la fabricación de las probetas:

- Referencia de amasada.
- Fecha de fabricación.
- Fecha de desmoldeo.

c. Datos de caracterización

Contiene los datos obtenidos en los ensayos de caracterización del hormigón en estudio (con el que se fabricó la probeta objeto de la ficha):

- Resistencia a compresión f_c .
- Módulo de deformación a los 28 días E_{28} .
- Carga de primera fisura F_L .
- Resistencia a flexotracción de primera fisura f_{cl}^f .
- Resistencia residual para abertura de fisura de 0.5 mm $f_{R,1}$.
- Resistencia residual para abertura de fisura de 1.5 mm $f_{R,2}$.
- Resistencia residual para abertura de fisura de 2.5 mm $f_{R,3}$.
- Resistencia residual para abertura de fisura de 3.5 mm $f_{R,4}$.
- Abertura de fisura para la que se presenta la carga máxima w_{max} .
- Carga máxima en la zona post-pico F_{max} .

- Carga a nivel de prefisuración en ensayo de caracterización, establecido para el ensayo F_w .
- Relación carga máxima-carga de primera fisura F_{\max}/F_L .
- Relación carga a nivel de prefisura-carga de primera fisura F_w/F_L .
- Relación carga máxima-carga de prefisura F_{\max}/F_w .

d. Información básica-ensayo fluencia

Contiene los datos principales del ensayo:

- Tipo de hormigón.
- Nivel de prefisuración teórico w_n .
- Nivel de carga objetivo previsto en programa experimental IF_n (en % sobre F_w).
- Posición en la columna de probetas en el bastidor (1: superior, 3: inferior).

e. Ensayo de fluencia

Presenta la información de interés en el ensayo de fluencia:

- Fecha de puesta en carga.
- Carga aplicada a la probeta F_a .
- Nivel de carga aplicada $IF_a \left(IF_a = \frac{F_a}{F_w} \% \right)$.
- Fecha en la que se efectúa la descarga del bastidor.
- Duración de periodo en carga t_f .
- Fecha en la que se retiran las probetas del bastidor al finalizar el proceso de recuperación.
- Duración total del ensayo t_t .
- Roturas en bastidor (se indica si se ha presentado o no la rotura de alguna probeta en el bastidor para el hormigón y serie de la probeta en cuestión).
- Probeta llega a rotura (se indica si la probeta en cuestión llega a la rotura en el bastidor durante el ensayo de fluencia).
- Fecha de ensayo de rotura.

f. Curva de fluencia (abertura de fisura)

Se presentan los resultados más representativos del ensayo de fluencia en términos de apertura de fisura, agrupados en curva general y curva de descarga.

Curva general

- Abertura de fisura inicial en etapa de carga w_{ci} .
- Abertura de fisura diferida (debida exclusivamente al fenómeno de fluencia) después de 90 días de haber iniciado el ensayo w_{cd}^{90} .
- Abertura de fisura diferida a tiempo final w_{cd}^{ff} .
- Abertura de fisura total en etapa de carga a tiempo final w_{ct}^{ff} .
- Abertura de fisura residual inicial w_{cri} .
- Abertura de fisura residual final (al finalizar el ensayo de fluencia, después de la etapa de carga sostenida y recuperación) w_{cr}^{ff} .

Curva de descarga y recuperación

- Abertura de fisura inicial recuperada al descargar w_{cui} .
- Abertura de fisura diferida recuperada al finalizar el periodo de recuperación w_{cud} .
- Abertura de fisura total recuperada w_{cut} .

g. Curva completa (abertura de fisura)

Recoge los datos y resultados a origen del proceso de prefisuración, de las etapas de carga y de descarga y recuperación del ensayo de fluencia y de la rotura post-fluencia de una probeta, ensamblados en una curva carga-abertura de fisura como la presentada en la Figura 3.42; se hará referencia a los puntos definidos en esta cuando sea necesario.

Zona de prefisura

- Fecha de entalla.
- Fecha en la que se realiza la prefisuración.
- Edad de la probeta al realizar la prefisuración.
- Carga de primera fisura F_L .
- Resistencia de primera fisura a flexotracción f_{ctL}^f .
- Abertura de fisura alcanzada en proceso de prefisuración w_p .
- Carga de abertura de prefisura F_w .
- Abertura de fisura residual tras el proceso de prefisuración w_{pr} .

Zona de fluencia

- Abertura de fisura inicial a origen (abertura para el punto D, Figura 3.42) w_{pci} .
- Abertura de fisura final a origen (abertura para el punto E, Figura 3.42) w_{pc} .
- Abertura de fisura residual a origen (abertura para el punto F, Figura 3.42) w_{pcr} .

Zona de rotura

- Carga máxima en ensayo de rotura $F_{p\max}$.
- Abertura de fisura a origen bajo carga máxima $w_{p\max}$.
- Resistencia residual a flexotracción en el ensayo de rotura para abertura de fisura a origen de 1.5 mm $f_{R,2}$.
- Resistencia residual a flexotracción en el ensayo de rotura para abertura de fisura a origen de 2.5 mm $f_{R,3}$.
- Resistencia residual a flexotracción en el ensayo de rotura para abertura de fisura a origen de 3.5 mm $f_{R,4}$.

h. Curva de fluencia (deformaciones a compresión del hormigón)

Se presentan los resultados más representativos del ensayo de fluencia en términos de deformaciones a compresión del hormigón, agrupados en curva general y curva de descarga.

Curva general

- Deformación inicial ε_{ci} .
- Deformación diferida (debida exclusivamente al fenómeno de fluencia) después de 90 días de haber iniciado el ensayo ε_{cd}^{90} .
- Deformación diferida a tiempo final ε_{cd}^{ff} .
- Deformación total a tiempo final ε_{ct}^{ff} .
- Deformación residual inicial ε_{cri} .
- Deformación residual final (al finalizar el ensayo de fluencia comprendido por la etapa de carga sostenida y recuperación) ε_{cr}^{ff} .

Curva de descarga y recuperación

- Deformación inicial recuperada al descargar ε_{cui} .
- Deformación diferida recuperada al finalizar el periodo de recuperación ε_{cud} .
- Deformación de fisura total recuperada ε_{cut} .

i. Curva completa (deformaciones a compresión del hormigón)

Recoge los datos a origen del proceso de prefisuración, de las etapas de carga y de descarga y recuperación del ensayo de fluencia y de la rotura post-fluencia de una probeta, ensamblados en una curva carga-deformación unitaria a compresión.

Zona de prefisura

- Deformación de prefisura ε_p .
- Deformación residual tras el proceso de prefisuración ε_{pr} .

Zona de fluencia

- Deformación inicial a origen ε_{pci} .
- Deformación final a origen ε_{pc} .
- Deformación residual a origen ε_{pcr} .

Zona de rotura

- Deformación a origen bajo carga máxima $\varepsilon_{p\max}$.

j. Procesos carga-descarga-recarga

En caso de presentarse roturas de probetas en los bastidores, se cargan, descargan y recargan algunos elementos. En la ficha de ensayo se hace constar el número de recargas efectuadas al elemento en cuestión, y el número que identifica la recarga.

En la parte inferior de la ficha de ensayo figura un recuadro para posibles anotaciones.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	2	
21	BASTIDOR	2	

← a b

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-40-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	1

d

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 2 - A 1
Fecha de fabricación	27/01/2009
Fecha de desmoldeo	28/01/2009

e

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	26/02/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	30,6
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	97,0
Fecha descarga	09/06/2009
Duración en carga (t_f)(días)	103
Fecha retiro bastidor	23/06/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	117
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	23/06/2009

c

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	52,4
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29750
Carga a primera fisura (F_L)(kN)	25,7
Resist. primera fisura (f_{cil})(Mpa)	4,94
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	5,53
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	6,13
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	5,66
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,03
Abertura carga max (w_{mx})(mm)	1,460
Carga máxima (F_{mx})(kN)	32,0
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	28,8
F_{mx} / F_L	1,24
F_w / F_L	1,12
F_{mx} / F_w	1,11

g

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	17/02/2009
Fecha de prefisuración	25/02/2009
Edad de prefisuración (días)	29
Carga de primera fisura (F_L)(kN)	30,9
Resist. primera fisura (f_{cil})(Mpa)	6,60
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,507
Carga de prefisura (F_w)(kN)	31,6
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,270
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	1,034
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,843
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,521
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura ($F_{p,max}$)(kN)	34,0
Abertura carga max ($w_{p,max}$)(mm)	2,418
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	-
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	-
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	-

i

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max ($\epsilon_{p,max}$)	-

h

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_i)(mm)	0,764
Abertura dif. 90 días (w_{id}^{90})(mm)	0,798
Abertura dif. final (w_{id}^{ff})(mm)	0,808
Abertura total final (w_{id}^{ff})(mm)	1,573
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	1,301
Abertura res. final (w_{cr}^{ff})(mm)	1,251
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,272
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,049
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,321

f

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_i)	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{id}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{id}^{ff})	-
Def. total final (ϵ_{id}^{ff})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{ff})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

j

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

ANOTACIONES: se aprecia un salto en la curva de fluencia en el día 19. La probeta en la posición 3 es la que tiene la galga en este bastidor.

Figura 3.43. Modelo de ficha de ensayo.

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

CAPÍTULO 4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta el programa experimental que se ha desarrollado en esta investigación, y que ha sido propuesto en función de los objetivos previamente definidos.

El capítulo está compuesto por 6 apartados en los que se abordan las variables consideradas en el programa (variables relativas al material y variables relativas al ensayo de fluencia), los materiales utilizados, las probetas empleadas, la definición y dosificación de los hormigones, la definición de los elementos armados y el programa de ensayos de fluencia.

4.1. VARIABLES CONSIDERADAS

Se han considerado diversas variables relativas al material SFRC y al ensayo de fluencia con la finalidad de alcanzar los objetivos propuestos con el desarrollo del programa experimental.

4.1.1. VARIABLES RELATIVAS AL MATERIAL

Son las que afectan el comportamiento mecánico del SFRC y están directamente relacionadas con la dosificación. Se han definido de forma tal que se tengan SFRC aplicables a usos típicos (elementos estructurales prefabricados y pavimentos), y al mismo tiempo se pretende abarcar un amplio espectro de respuesta en comportamiento a flexotracción de los SFRC en estado fisurado atendiendo a diferentes patrones de comportamiento en la zona post-pico (Figura 4.1), con hormigones que presentan aumentos en sus valores de resistencias residuales en estado fisurado (endurecimiento por deformación) (i), pasando por hormigones que mantienen su capacidad de carga relativamente constante (región post-pico plana) (ii) y, por último, hormigones con pérdidas acusadas de la capacidad residual de carga después de la primera fisura (ablandamiento) (iii).

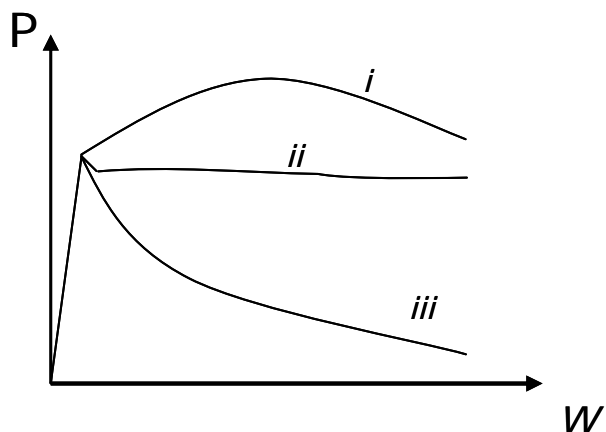


Figura 4.1. Idealización de distintos comportamientos tipo carga-abertura de fisura en SFRC.

Los parámetros relativos al hormigón que se han considerado son:

- Tipo de hormigón.
- Tipo de cemento.
- Cantidad de cemento.
- Relación agua-cemento.
- Tamaño máximo de árido.
- Tipo de fibras de acero.
- Contenido de fibras de acero.

Las variables del estudio y su previsión de variación se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Parámetros relativos al hormigón y su previsión de variación.

Parámetro	Previsión de variación
Hormigón	SFRC
	Armado
Tipo de cemento*	CEM I 52.5R
	I 42.5R SR
	CEM II/B-M (S-LL) 42.5R
Cantidad de cemento (kg/m ³)	375
	325
Relación agua cemento	0.5
	0.6
Tamaño máximo de árido (mm)	10
	20
Tipo de fibras de acero	Dramix RC 80/35 BN
	Dramix RC 80/50 BN
	Dramix RC 65/40 BN
	Dramix RL 45/50 BN
	Fibrocev F-Due 50/30
Contenido de fibras de acero (kg/m ³)	40
	70
Armado a tracción (mm)	2φ6
	2φ8

* Los dos cementos 42.5 corresponden a factores de disponibilidad, los hormigones Tipo II de la primera serie se fabricaron con el I.42.5R SR, los hormigones para las series 2 y 3 se fabricaron con el CEM II/B-M (S-LL) 42.5R.

Los diferentes aditivos utilizados no se consideran como variables, ni se tienen en cuenta en el análisis. La selección del tipo de aditivo es función del uso que se le quiera dar (superplastificante para prefabricados y plastificante para el hormigón de pavimentos), y la variación de la cantidad empleada responde a la búsqueda de un consistencia blando-fluida.

4.1.2. VARIABLES RELATIVAS AL ENSAYO DE FLUENCIA

Se definen con el de fin establecer las diferentes condiciones de ensayo, permitiendo evaluar el comportamiento del material en diferentes situaciones de interés, en rangos reales de trabajo del material (condiciones de servicio) y en situaciones límite con el propósito de acelerar el proceso y procurar en periodos de tiempo más reducidos conocer la evolución del comportamiento (Tabla 4.2).

Las variables consideradas son:

- Abertura de fisura nominal w_n , inducida en proceso de prefisuración.
- Nivel de carga a aplicar en etapa de carga del ensayo de fluencia IF_n , en % sobre la carga F_w aplicada en el proceso de prefisuración.

Tabla 4.2. Variables relativas al ensayo.

Variable	Previsión de variación
Abertura de prefisura (w_n) (mm)	0.5
	1.5
Nivel de carga (% F_w)	60%
	80%
	95%

Los niveles de abertura de prefisura corresponden a los niveles de abertura de fisura 1 y 2 para los que se calculan las resistencias residuales ($f_{R,1}$ y $f_{R,2}$) según la UNE-EN 14651:2007 + A1:2008, además el primer nivel se puede asociar con el estado límite de servicio y al segundo nivel con el estado límite de rotura.

Los tres niveles de carga se definen con el fin evaluar el comportamiento de los elementos en un nivel de carga de trabajo (60%), un nivel de carga relativamente alto (80%) que además acelere el fenómeno, y un nivel de carga excepcional (95%).

4.2. MATERIALES UTILIZADOS

Los materiales que se han empleado para la fabricación de los hormigones se especifican en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Materiales empleados.

Material	Designación	Procedencia
Cementos	CEM I 52.5R	Lafarge Asland S.A.
	I 42.5R SR	Lafarge Asland S.A.
	CEM II/B-M (S-LL) 42.5R	CEMEX
Áridos	Arena 0/4 (rodada lavada)	Graveras Castellana S.L.
	Grava 4/7 (caliza, machacada)	Soival
	Grava 7/12 (caliza, machacada)	Soival
	Grava 12/20 (caliza, machacada)	Soival
Fibras	RC 80/35 BN	Dramix® (Bekaert)
	RC 80/50 BN	Dramix® (Bekaert)
	RC 65/40 BN	Dramix® (Bekaert)
	RL 45/50 BN	Dramix® (Bekaert)
	F-Due 50/30	Fibrocev®
Aditivos	Glenium C355 (superplastificante)	Basf
	Pozzolith 651N (plastificante)	Basf

De las fibras empleadas cabe destacar lo siguiente:

Dramix RC-80/35-BN: fibra de esbeltez alta (80), longitud baja (35 mm) y gran número de fibras por kg adicionado (24500 fibras/kg).

Dramix RC-80/50-BN: fibra de esbeltez alta (80), longitud alta (50 mm) y cantidad intermedia de fibras por kg adicionado (8500 fibras/kg).

Dramix RC-65/40-BN: fibra de esbeltez media (65), longitud media (40 mm) y cantidad intermedia de fibras por kg adicionado (11000 fibras/kg).

Dramix RL-45/50-BN: fibra de esbeltez baja (45), longitud alta (50 mm) y cantidad baja de fibras por kg adicionado (2800 fibras/kg).

F-DUE 50/30: fibra de esbeltez media-baja (50), longitud baja (30 mm) y cantidad intermedia de fibras por kg adicionado (14000 fibras/kg).

Las fibras Dramix pertenecen al grupo I (trefilado en frío) (según UNE-EN 14889-1:2008), tienen sus extremos conformados y se suministran en paquetes (encoladas), excepto las Dramix RL-45/50-BN que se suministran sueltas. Las fibras F-DUE 50/30 pertenecen al grupo II (corte de lámina), fibras rectas y se suministran sueltas.

Las fibras se han elegido en función de su aplicación, y además con la intención de abarcar el rango de esbeltez y longitud de fibras disponibles en el mercado (según 2.2.1, entre 40-80 y entre 25-60 mm, respectivamente), teniendo valores de esbeltez entre 45 y 80 y de longitud entre 30 y 50 mm.

En la Figura 4.2 se presentan las curvas granulométricas de los áridos empleados.

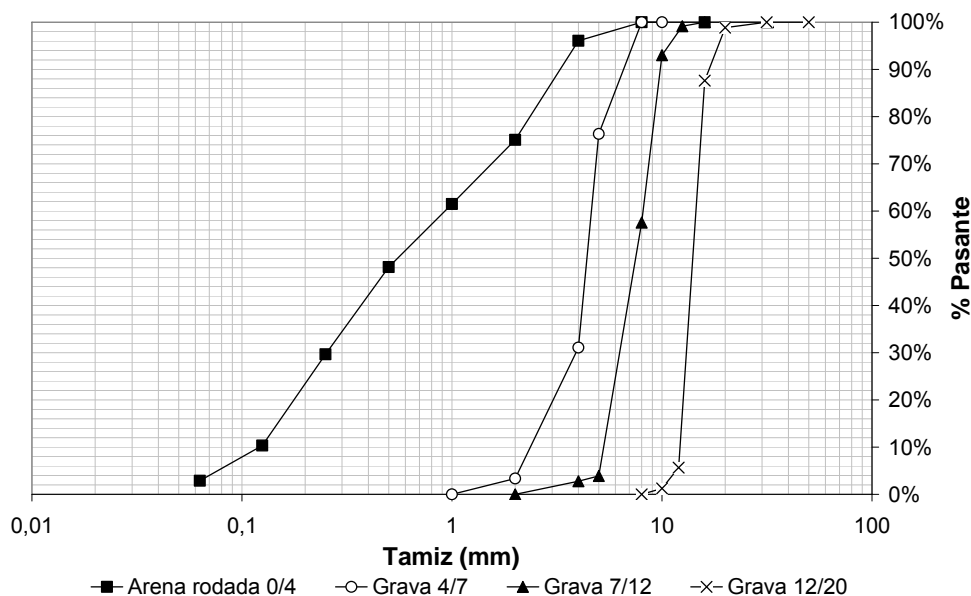


Figura 4.2. Curvas granulométricas.

4.3. PROBETAS

En este estudio se han realizado una serie de ensayos complementarios para caracterizar las propiedades mecánicas del hormigón endurecido (véase 6.2). Son los siguientes:

- Resistencia a compresión (UNE 83507:2004).
- Módulo de deformación (UNE-EN 1352:1997).
- Ensayo de flexotracción (adaptación de UNE-EN 14651:2007 + A1:2008).

En la Tabla 4.4 se presentan los diferentes ensayos que se realizan al hormigón endurecido, el tipo de probeta, la cantidad de probetas fabricadas y un comentario explicativo.

Tabla 4.4. Ensayos realizados sobre hormigón endurecido.

Ensayo	Tipo Probeta	Cantidad	Comentario
Compresión	Cúbica 100x100x100 mm	4	Por amasada
Módulo de Deformación	Cilíndrica 150x300 mm	2	Por hormigón por serie
Flexotracción	Caracterización Prismática 150x150x600 mm	3	Mínimo para primer hormigón*
	Fluencia Prismática 150x150x600 mm	3	Mínimo por bastidor

*Se han ensayado 2 probetas cuando se han realizado tandas adicionales de un mismo tipo de hormigón.

4.4. DEFINICIÓN Y DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES

Se ha ajustado la dosificación del hormigón que exigía más cambios (en función de su granulometría principalmente) con respecto a un hormigón tradicional, que es el que corresponde al caso de fibras más esbeltas (Dramix RC 80/35 BN) y mayor contenido de éstas (70 kg/m^3). Se ajustó la dosificación, obteniendo el valor óptimo para la relación grava-arena (Gr/Ar) mediante la metodología propuesta por Baron-Lesage (Baron y Lesage, 1976). Esta metodología se expone en el apartado 5.1, junto con el resto de ensayos previos realizados.

Una vez fijada la relación Gr/Ar, se realizaron amasadas de prueba para las diferentes combinaciones a emplear en el programa experimental. La cantidad y tipo de aditivo se modificó en función de las exigencias impuestas por el hormigón, para obtener un hormigón de consistencia blando-fluida, evaluada con el ensayo del Cono de Abrams (UNE-EN 12350-2:2006).

Los SFRC son frecuentemente empleados en elementos prefabricados y en pavimentos. Por ello se han concebido sendas dosificaciones de hormigones que responden a dichas aplicaciones. En la Tabla 4.5 figuran las principales características de estos SFRC y se indican los valores/tipos/cantidades empleados en este trabajo.

Tabla 4.5. Definición de tipos de hormigones y sus principales características.

Parámetros	Hormigón Tipo I	Hormigón Tipo II
f_c	$\geq 40 \text{ MPa}$	25-35 MPa
Tipo de cemento	CEM I 52.5R	I42.5R SR CEM II/B-M 42.5R
Contenido de cemento	375 kg/m^3	325 kg/m^3
A/C	0.5	0.6
Aplicación fibras	Elementos estructurales	Pavimentos
V_f	Medio y alto ($40 \text{ y } 70 \text{ kg/m}^3$)	Medio (40 kg/m^3)
TMA	10 mm	10 y 20 mm
Aditivo	Glenium C355 (superplastificante)	Pozzolith 651N (plastificante)

En la Tabla 4.6 se presentan los hormigones empleados en el estudio, que responden a distintas combinaciones de tipología según la aplicación (Tipo I relacionado con hormigones típicos de prefabricados y Tipo II relacionado con hormigones típicos de pavimentos), tipo y cantidad de fibras, y áridos empleados.

Se introducen contenidos de fibras de $40 \text{ y } 70 \text{ kg/m}^3$ en los hormigones Tipo I, contenidos típicos para elementos estructurales que encuentran en función de la aplicación en niveles bajo y medio-alto, respectivamente. En los hormigones Tipo II, se introducen contenidos de 40 kg/m^3 exclusivamente, contenido que se puede considerar como medio-alto para la aplicación.

Los hormigones se designan con el siguiente formato:

T – TF - CF - TMA

Donde:

T: indicativo de tipo de aplicación del hormigón: Tipo I (prefabricados) y Tipo II (pavimentos).

TF: define la fibra con su esbeltez y su longitud (λ/l_f).

CF: indicativo del contenido de fibras, en kg/m^3 .

TMA: tamaño máximo del árido, en mm.

Los indicativos TF y CF se sustituyen por $2\phi d$ en el caso de las dosificaciones sin fibras. En este caso las probetas se han armado con 2 redondos de diámetro de 8 ó 6 mm, tal y como se especifica en 4.5.

Tabla 4.6. Denominación y dosificación (cualitativa) de hormigones empleados.

Denominación	Aditivo	Áridos (kg/m^3)				Fibras (refuerzo)	
		0/4	4/7	7/12	12/20		
Tipo I	80/35-40-10	S	x	x	x	-	RC 80/35 BN 70 kg/m^3
	80/35-70-10		x	x	x	-	RC 80/35 BN 40 kg/m^3
	80/50-40-10		x	x	x	-	RC 80/50 BN 40 kg/m^3
	$2\phi 8-10$		x	x	x	-	$2\phi 8$ mm
Tipo II	80/50-40-20	P	x	-	x	x	RC 80/50 BN 40 kg/m^3
	65/40-40-20		x	-	x	x	RC 65/40 BN 40 kg/m^3
	45/50-40-20		x	-	x	x	RL 45/50 BN 40 kg/m^3
	50/30-40-10		x	x	x	-	F-DUE 50/30 40 kg/m^3
	$2\phi 6-20$		x	-	x	x	$2\phi 6$ mm

S: superplastificante.

P: plastificante.

x material presente en la dosificación.

- material no presente en la dosificación.

La dosificación detallada de cada hormigón se expone en la Tabla 5.1.

Para los hormigones Tipo I se emplea TMA 10 mm, debido esencialmente a la aplicación en prefabricados, donde se presentan situaciones de armados densos.

Para los hormigones Tipo II se emplea TMA 20 mm, excepto para el hormigón I-50/30-40-10 debido a la longitud de la fibra.

4.5. DEFINICIÓN DE ELEMENTOS ARMADOS

En la Tabla 4.6 figuran como hormigones de estudio, según la tipificación empleada, el I-2φ8-10 y II-2φ6-20. Las probetas prismáticas que se fabrican para estos hormigones van armadas con dos barras B500S, de 8 mm y 6 mm de diámetro, respectivamente. En el Anejo 1 figuran los cálculos realizados para la determinación de los armados indicados. La ubicación seccional y el despiece del armado se presentan en la Figura 4.3.

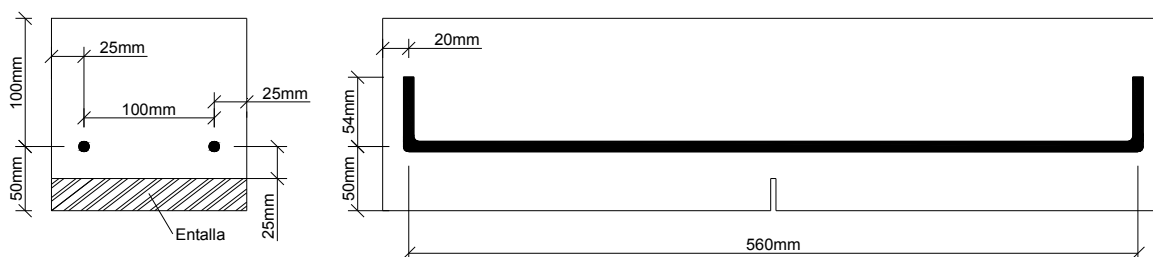


Figura 4.3. Ubicación seccional y despiece del armado.

4.6. PROGRAMA DE ENSAYOS DE FLUENCIA

Para los hormigones definidos previamente en la Tabla 4.6 se ha concebido un programa de ensayos considerando una serie de variables con el fin de obtener combinaciones que permitan alcanzar los objetivos propuestos. Para llevar a cabo los ensayos se dispone de cinco bastidores de fluencia; esto es un factor importante a tener en cuenta para el diseño del programa de ensayos, ya que se ha pretendido desarrollar el estudio y alcanzar los objetivos propuestos en un plazo aproximado de 1.5 años.

El programa de ensayos, relacionando los hormigones con las variables inherentes al ensayo de fluencia, se presenta en la Tabla 4.7

Tabla 4.7. Programa de ensayos.

Denominación Hormigón		Serie	Nivel de carga (%)	Abertura de fisura (mm)
Tipo I	80/35-40-10	1	60	0.5
		2	80	
	80/35-70-10	2	80	1.5
		1	60	
		1	80	
	80/50-40-10	2	95	0.5
3		80		
	2φ8-10	3	80	
Tipo II	80/50-40-20	3	80	0.5
	65/40-40-20	1	60	
	45/50-40-20	2	80	
		3	80	
	50/30-40-10	1	60	
		2	80	
		2φ6-20	3	

CAPÍTULO 5

ENSAYOS COMPLEMENTARIOS

En este capítulo se presentan los ensayos complementarios que se han realizado, clasificados en:

- Ensayos previos.
- Ensayos mecánicos.

Para los ensayos se expone:

- Metodología empleada.
- Resultados obtenidos.
- Análisis de resultados y conclusiones.

Los ensayos previos corresponden al ajuste granulométrico del hormigón de partida y al ajuste de la dosificación de aditivo para cada hormigón del estudio.

Sobre las dosificaciones seleccionadas se realizan ensayos mecánicos de resistencia a compresión simple, módulo de deformación y rotura a flexotracción, realizados para conocer el comportamiento mecánico de los diferentes hormigones empleados.

5.1. ENSAYOS PREVIOS

5.1.1. METODOLOGÍA DE ENSAYOS PREVIOS

Se expone la metodología empleada para ajuste granulométrico del hormigón de base y el ajuste de la dosificación de aditivo para cada hormigón.

5.1.1.1. Ajuste granulométrico del hormigón de partida

La estructura granular de la dosificación del hormigón se ha ajustado aplicando la metodología propuesta por Barón y Lesage (1976), mencionada en el apartado 2.2.2 del estado del arte, empleando el ensayo del Cono Invertido (UNE 83503:2004).

El criterio de ajuste consiste en seleccionar la estructura granular que confiere al hormigón la máxima trabajabilidad asumiendo que ello conduce a las mejores prestaciones. Este criterio fue adaptado a los hormigones reforzados con fibras por Serna (1984²).

Los pasos que se han seguido para el ajuste de la granulometría del hormigón de partida son:

1. Se fijan los parámetros constantes de la mezcla: A/C, tamaño máximo de árido TMA, tipo de fibras y volumen de fibras.
2. Se fabrican hormigones con dosificaciones que difieren entre si únicamente en la relación grava-arena (Gr/Ar).
3. Para cada dosificación se determina la consistencia por medio del tiempo de flujo en el Cono Invertido (UNE 83503:2004).
4. Se obtiene la relación entre el tiempo de flujo en el Cono Invertido del hormigón y la relación Gr/Ar.
5. Se determina el valor óptimo, siendo éste la relación Gr/Ar correspondiente al menor tiempo de flujo.

Este criterio de ajuste se ha aplicado únicamente al hormigón de referencia I-80/35-70-10 por corresponder al caso de fibras más esbeltas y mayor contenido de fibras, y por tanto el que mayor ajuste de dosificación plantea. El resto de hormigones ha conservado esta relación Gr/Ar.

El tiempo de flujo consiste en determinar el tiempo necesario para que el volumen de hormigón contenido en un Cono de Abrams invertido (Figura 5.1) fluya completamente por la boca inferior (la de menor diámetro), sometido a una vibración interna.

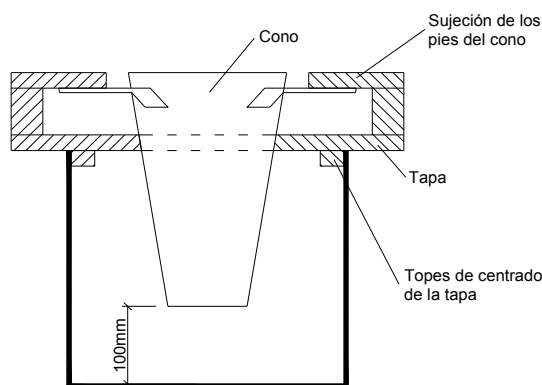


Figura 5.1. Esquema Cono Invertido.

Una vez amasado el hormigón siguiendo la metodología establecida en 3.3.1, se procede del siguiente modo:

1. Se llena el cono en su totalidad en tres capas iguales en volumen, evitando compactar cada capa pero alisándola ligeramente con la barra a fin de evitar que existan huecos.
2. Una vez lleno el cono, se alisa con una paleta o rodando la barra sobre la superficie del hormigón.
3. Se coloca la aguja vibrante en posición vertical y centrada sobre la base superior del cono, y simultáneamente al inicio de la vibración se pone en marcha el cronómetro. Se hace descender el

vibrador de forma que alcance el fondo del recipiente en 3 ± 1 segundos, evitando tocar el cono con el vibrador.

4. Se detiene el vibrador cuando el cono quede vacío, lo que se aprecia cuando llega a ser visible el extremo inferior del mismo, midiendo el tiempo de vaciado en segundos.

5.1.1.2. Ajuste de la dosificación de aditivo

Una vez establecido el valor Gr/Ar a emplear en todos los hormigones, se procede a ajustar la cantidad de aditivo para cada uno de los hormigones. Para este ajuste se ha impuesto la condición de alcanzar un asiento medido en el Cono de Abrams de 10 cm.

5.1.2. RESULTADOS DE ENSAYOS PREVIOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el ajuste de la dosificación del hormigón de partida y las composiciones finales de cada hormigón.

5.1.2.1. Ajuste granulométrico del hormigón de partida

Estos resultados son producto de diferentes amasadas, realizadas según el procedimiento definido en 3.3.1.

En la Figura 5.2 se presentan los resultados de las diferentes amasadas realizadas con el fin de ajustar la dosificación de referencia (hormigón Tipo I-80/35-70-10), en términos de la relación Gr/Ar. En el eje de abscisas figuran los valores de la relación Gr/Ar empleados en las amasadas de ajuste, y en el eje de ordenadas los valores de asiento en el Cono de Abrams y de los tiempos obtenidos en el ensayo del Cono Invertido, presentando tiempos mínimos en el Cono Invertido para una relación Gr/Ar cercana a 0.90.

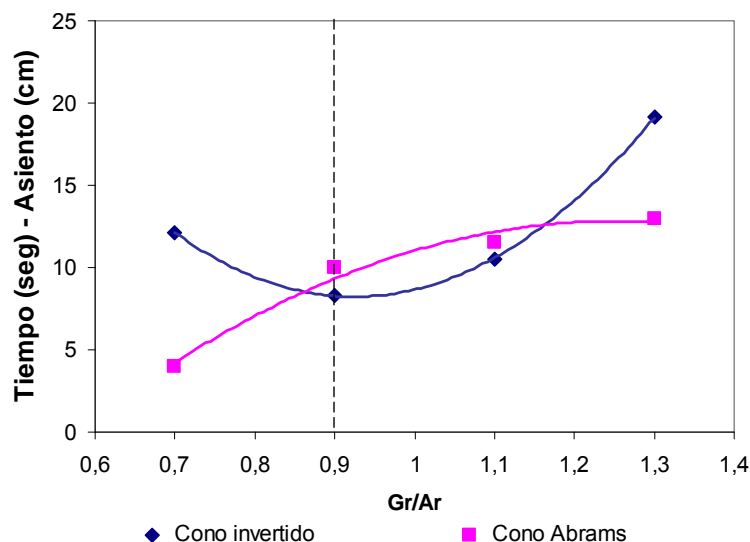


Figura 5.2. Curvas para ajuste granulométrico del hormigón Tipo I-80/35-70-10.

Las dosificaciones de ajuste para el hormigón Tipo I-80/35-70-10 se realizaron con una cantidad de aditivo de 1.5% sobre el peso del cemento (spc). En la dosificación definitiva se empleó un 1.55% spc para tener un mejor ajuste a la consistencia blando-fluida deseada.

En la Figura 5.2 se aprecia la sensibilidad que aporta el Cono Invertido en el proceso de ajuste de la granulometría de un SFRC, sensibilidad que no ofrece el Cono de Abrams lo que imposibilita realizar un ajuste de este tipo con este último ensayo.

5.1.2.2. Ajuste de dosificaciones a estudiar

Para los otros hormigones estudiados se empleó el mismo valor de referencia de la relación Gr/Ar (0.9).

Con la relación Gr/Ar establecida y los parámetros de las dosificaciones considerados en este estudio se ha realizado un ajuste de la cantidad de aditivo. La dosificación detallada para los hormigones presentados en 4.4 (Tabla 4.6) y los resultados de asiento en Cono de Abrams se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Resultado de dosificaciones detalladas definitivas.

Denominación		Aditivo (%spc)		Aridos (kg/m ³)				Refuerzo	Asiento (cm)
				0/4	4/7	7/12	12/20		
Tipo I	80/35-40-10	1.30	Glenium C355	982	221	663	0	RC 80/35 BN 70 kg/m ³	9.0
	80/35-70-10	1.55		976	220	659	0	RC 80/35 BN 40 kg/m ³	9.5
	80/50-40-10	1.15		983	221	663	0	RC 80/50 BN 40 kg/m ³	7.0
	2φ8-10	0.80		992	223	669	0	2 barras de 8 mm	8.0
Tipo II	80/50-40-20	1.10	Pozzolith 651N	996	0	538	359	RC 80/50 BN 40 kg/m ³	11.5
	65/40-40-20	0.20		1000	0	540	360	RC 65/40 BN 40 kg/m ³	12.0
	45/50-40-20	0.15		1000	0	540	360	RL 45/50 BN 40 kg/m ³	10.0
	50/30-40-10	0.40		999	225	674	0	F-DUE 50/30 40 kg/m ³	7.0
	2φ6-20	0.40		1006	0	543	362	2 barras de 6 mm	11.0

5.2. ENSAYOS MECÁNICOS

5.2.1. METODOLOGÍA DE ENSAYOS MECÁNICOS COMPLEMENTARIOS

Los ensayos mecánicos realizados son los siguientes:

- Resistencia a compresión simple.
- Módulo de deformación.
- Flexotracción.

Estos se han realizado en diferentes etapas del estudio (caracterización y seguimiento, acompañamiento, prefisuración, fluencia y rotura post-fluencia), pero siempre siguiendo la metodología que se presenta a continuación.

5.2.1.1. Resistencia a compresión

Los ensayos de resistencia a compresión simple se han llevado a cabo siguiendo UNE 83507:2004, empleando probetas cúbicas de 100x100x100 mm y probetas cilíndricas de 150x300 mm.

5.2.1.2. Módulo de deformación

Los ensayos de módulo de deformación se han realizado según UNE-EN 1352:1997, empleando probetas cilíndricas de 150x300 mm.

5.2.1.3. Flexotracción

Los ensayos de flexotracción se han realizado siguiendo parcialmente las recomendaciones de la norma UNE-EN 14651:2007 + A1:2008, adaptando algunos aspectos a las particularidades de las condiciones del ensayo de fluencia.

La Figura 5.3 ilustra sendos esquemas de ensayo según UNE-EN 14651:2007 + A1:2008 y según la adaptación realizada para este estudio. La Figura 5.4 presenta una imagen del montaje empleado en un ensayo real.

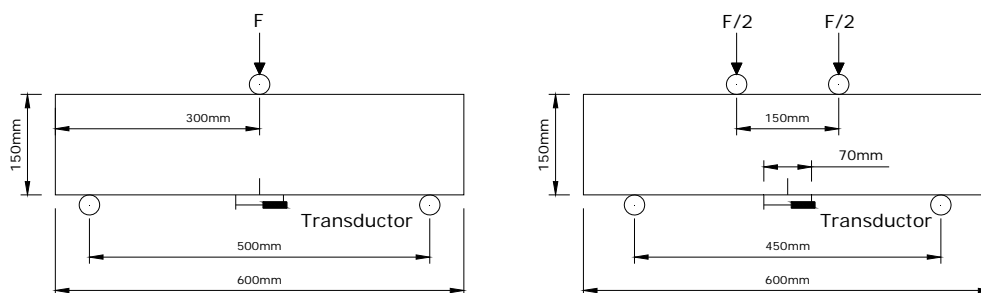


Figura 5.3. Esquema de ensayo a flexotracción según UNE 14651 (izquierda) y según adaptación realizada (derecha).



Figura 5.4. Montaje de ensayo a flexotracción empleado en el estudio.

La Tabla 5.2 muestra una comparación entre las variables del ensayo a flexotracción según la norma UNE-EN 14651:2007 + A1:2008 y la adaptación para este estudio.

Tabla 5.2. Comparación del montaje del ensayo de flexotracción del estudio y de la UNE-EN 14651:2007 + A1:2008.

Variables	UNE-EN 14651	Montaje Estudio
Sección elemento	150x150 mm	150x150 mm
Longitud elemento	600 mm	600 mm
Distancia puntos de apoyo	500 mm	450 mm
Aplicación carga	Centro de luz	Tercios
Giro elemento 90°	Si	Si
Entalla 21 días	Si	Si
Control ensayo abertura fisura	Si	Si

5.2.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS

5.2.2.1. Resistencia a compresión y módulo de deformación

Los ensayos se han realizado siguiendo la metodología definida en 5.2.1.1 y 5.2.1.2. En las Tablas 5.3 y 5.4 se presentan los resultados por tipo de hormigón especificando el número de amasadas realizadas, la resistencia media a compresión simple f_c a los 28 días (en probeta cúbica de 100x100x100 mm y en probeta cilíndrica de 150x300 mm) para cada amasada, la resistencia media a compresión a 28 días para el conjunto de amasadas \bar{x} y el módulo de deformación E a los 28 días. Los resultados para las probetas cúbicas se obtienen de 4 probetas por amasada y para las probetas cilíndricas de 2 probetas por hormigón.

Tabla 5.3. Resultados de ensayos de resistencia a compresión y módulo de deformación, hormigones Tipo I.

Denominación	Probetas Cúbicas			Cilíndricas		
	Amasada	f_c (MPa)	\bar{x} (MPa)	f_c (MPa)	E (MPa)	
Tipo I	80/35-40-10	1	49.2	52.4	40.8	29750
		2	51.5		-	-
		3	45.0		-	-
		4	59.4		-	-
		5	56.7		-	-
	80/35-70-10	1	55.7	56.1	-	-
		2	60.6		48.5	30300
		3	55.3		-	-
		4	56.7		-	-
		5	53.5		-	-
		6	54.3		-	-
	80/50-40-10	1	57.1	-	47.4	27000
		2	-	-	52.2	-
	2φ8-10	1	58.3	-	49.6	28700

Tabla 5.4. Resultados de ensayos de resistencia a compresión y módulo de deformación, hormigones Tipo II.

Denominación		Probetas Cúbicas			Cilíndricas	
		Amasada	f_c (MPa)	\bar{x} (MPa)	f_c (MPa)	E (MPa)
Tipo II	80/50-40-20	1	39.0	-	33.5	26500
		2	-	-	34.5	-
	65/40-40-20	1	29.1	29.4	24.9	28250
		2	27.4		-	-
		3	31.6		-	-
	45/50-40-20	1	36.4	38.8	35.9	26750
		2	41.2		-	-
	50/30-40-10	1	42.8	41.3	39.0	28000
		2	41.2		-	-
		3	42.9		-	-
		4	39.6		-	-
	2 ϕ 6-20	1	36.4	-	33.4	26500

5.2.2.2. Ensayos de flexotracción

Para cada hormigón se han realizado una serie de ensayos de flexotracción, según el procedimiento definido en 5.2.1.3.

En las Tablas 5.5 y 5.6 se presentan para cada hormigón las respectivas amasadas realizadas, el número de probetas prismáticas fabricadas y el destino que se les ha dado, especificando cuántas han sido ensayadas a flexotracción hasta la rotura y cuántas han sido prefisuradas para su posterior ensayo a fluencia.

Tabla 5.5. Distribución de ensayos de flexotracción para hormigón Tipo I.

Denominación		Probetas Prismáticas					
		Amasada	Nº por amasada	Rotura	Prefisura	Serie	Bastidor
Tipo I	80/35-40-10	1	2	2	-	1	-
		2	3	3	-	1	-
		3	3	-	3	1	1
		4	4	1	3	2	2
		5	4	1	3	2	3
	80/35-70-10	1	3	3	-	1	-
		2	2	2	-	1	-
		3	3	-	3	1	2
		4	3	-	3	1	3
		5	4	1	3	2	4
		6	4	1	3	2	4
	80/50-40-10	1	6	2	4	3	3
		2	3	3	-	-	-
	2 ϕ 8-10	1	6	2	4	3	5

Tabla 5.6. Distribución de ensayos de flexotracción para hormigón Tipo II.

Denominación		Probetas Prismáticas					
		Amasada	Nº por amasada	Rotura	Prefisura	Serie	Bastidor
Tipo II	80/50-40-20	1	6	2	4	3	2
		2	3	3	-	-	-
	65/40-40-20	1	3	3	-	-	-
		2	2	2	-	-	-
		3	3	-	3	1	4
	45/50-40-20	1	6	2	4	2	5
		2	6	2	4	3	1
	50/30-40-10	1	3	3	-	-	-
		2	2	2	-	-	-
		3	3	-	3	1	5
		4	6	1	5	2	1
	2φ6-20	1	2	2	4	3	4

En las Figuras 5.5 y 5.6 se muestran, para los hormigones Tipo I y Tipo II respectivamente, las curvas carga-abertura de fisura obtenidas a partir de la media aritmética de los resultados de los ensayos de rotura a flexotracción realizados sobre el número de probetas especificado en la Tablas 5.5 y 5.6 para cada hormigón, y en la Tabla 5.7 se presenta el resumen de los datos de interés definidos por UNE-EN 14651:2007. Los resultados de los ensayos de las probetas sometidas a ensayos de rotura a flexotracción o sometidos a proceso de prefisuración figuran en los Anejos 2 y 3, respectivamente.

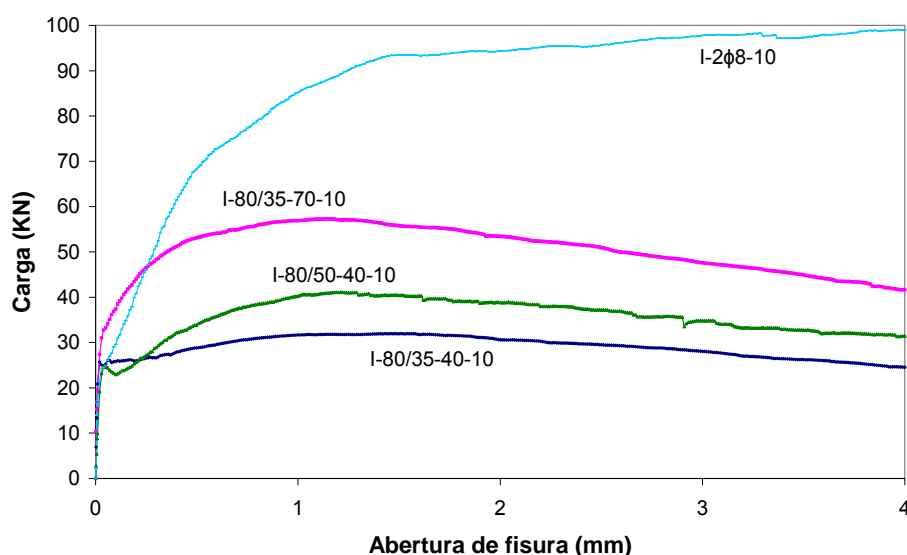


Figura 5.5. Curvas de caracterización a flexotracción de hormigones Tipo I.

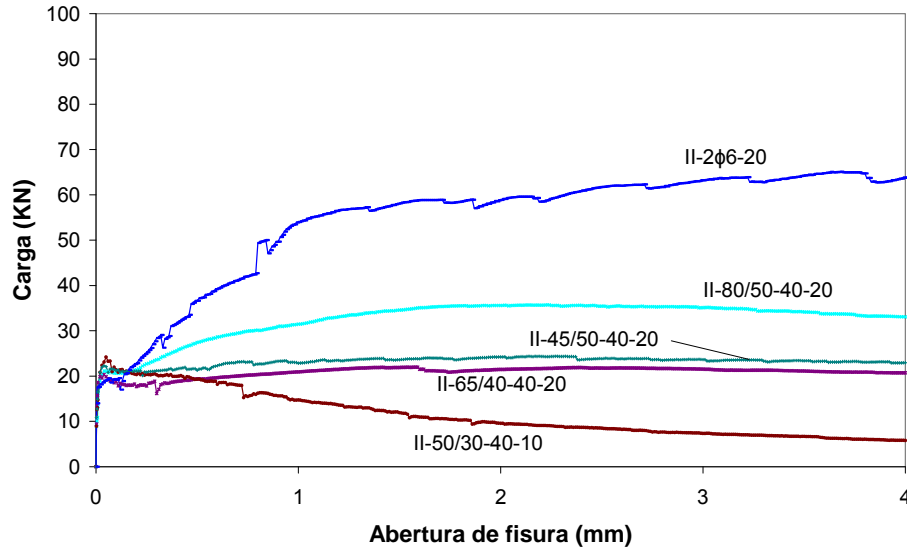


Figura 5.6. Curvas de caracterización a flexotracción de hormigones Tipo II.

En la Tabla 5.7 se presentan los valores de las resistencias residuales definidas por UNE-EN 14651:2007 + A1:2008, donde:

- f_{cl}^f : resistencia de primera fisura en el ensayo de flexotracción.
- $f_{R,1}$: resistencia residual a la flexión en tracción, para abertura de fisura de 0.5 mm.
- $f_{R,2}$: resistencia residual a la flexión en tracción, para abertura de fisura de 1.5 mm.
- $f_{R,3}$: resistencia residual a la flexión en tracción, para abertura de fisura de 2.5 mm.
- $f_{R,4}$: resistencia residual a la flexión en tracción, para abertura de fisura de 3.5 mm.

Tabla 5.7. Resultados de ensayos de caracterización a flexotracción.

Hormigón		Valores de resistencia residual de tracción a flexión (MPa)				
		f_{cl}^f	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
Tipo I	80/35-40-10	4.94	5.53	6.13	5.66	5.03
	80/35-70-10	6.38	10.19	10.71	9.78	8.62
	80/50-40-10	4.53	6.14	7.33	6.79	5.98
	2φ8-10	4.80	13.10	17.95	18.36	18.70
Tipo II	80/50-40-20	3.93	5.01	6.32	6.48	6.24
	65/40-40-20	4.03	3.72	3.72	3.79	3.65
	45/50-40-20	4.27	4.09	4.53	4.58	4.49
	50/30-40-10	4.68	3.69	2.29	1.63	1.28
	2φ6-20	3.68	7.03	11.16	11.85	12.34

En la Tabla 5.8 se presentan los coeficientes de variación de los resultados de los ensayos de rotura a flexotracción para todos los hormigones.

Tabla 5.8. Coeficientes de variación para resistencias residuales presentadas en la Tabla 5.7.

Hormigón		Valores de coeficientes de variación (%)				
		f_{cl}^f	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
Tipo I	80/35-40-10	6.5	6.0	7.4	6.1	5.5
	80/35-70-10	4.9	10.6	9.9	9.8	10.8
	80/50-40-10	4.9	11.7	11.4	5.4	4.5
	2φ8-10	-	-	-	-	-
Tipo II	80/50-40-20	2.7	8.6	9.0	9.6	10.0
	65/40-40-20	2.8	14.0	21.4	17.0	16.7
	45/50-40-20	4.2	22.9	12.8	10.4	9.2
	50/30-40-10	3.3	11.6	14.0	20.3	21.0
	2φ6-20	-	-	-	-	-

5.2.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.2.3.1. Resistencia a compresión y módulo de deformación

En las Tablas 5.3 y 5.4 figuran los resultados de los valores de resistencia a compresión simple y módulo de deformación.

Los valores medios de resistencia a compresión f_c en probeta cúbica, para los diferentes hormigones Tipo I, presentan valores entre 52.4 MPa y 58.3 MPa, y para los diferentes hormigones Tipo II valores de f_c entre 29.4 MPa y 41.3 MPa.

En los hormigones I-80/35-40-10, destaca la importante diferencia en los valores de f_c entre las amasadas 1-2-3 y 4-5, presentando una diferencia de 10 MPa entre el valor máximo (amasada 4) y mínimo (amasada 1). Además, para los hormigones I-80/35-70-10 la amasada 2 presenta un valor de f_c considerablemente mayor que las demás. En los hormigones Tipo II, llama la atención los resultados obtenidos para las 3 amasadas del II-65/40-40-20, debido a sus bajos valores de f_c . Estas acusadas diferencias, además de ser mencionadas, serán tenidas en cuenta al analizar los resultados de los ensayos mecánicos de rotura a flexotracción (apartado 5.2.3.2) y el comportamiento a fluencia (apartado 6.4).

Al comparar los resultados de f_c en probeta cúbica con los obtenidos en probeta cilíndrica resultan coeficientes de conversión entre 0.8 y 0.9, dentro de los límites de variación propuestos por la EHE (Art 30.4).

Los módulos de deformación presentan valores entre 27000 y 30300 MPa para los Tipo I, y entre 25800 y 28250 MPa para los Tipo II, teniendo el mayor valor el hormigón con mayor contenido de fibras y fibras más esbeltas y cortas (I-80/35-70-10).

5.2.3.2. Ensayos de rotura a flexotracción

En el apartado 5.2.2.2 se han presentado las Figuras 5.5 y 5.6 y las Tablas 5.7 y 5.8, que contienen los resultados de los ensayos de rotura a flexotracción de los hormigones a estudiar.

Es importante señalar que todas las fibras empleadas corresponden al Grupo I de trefilado en frío, con extremos conformados, excepto en el caso del hormigón II-50/30-40-10 en el que se han empleado fibras de corte de lámina (rectas).

Los elementos armados han presentado los mayores valores de resistencia residual.

Todos los SFRC Tipo I han presentado capacidad de endurecimiento al incrementar los valores de abertura de fisura.

Para los SFRC de hormigón Tipo I (Figura 5.5) los elementos I-80/35-70-10 han presentado el mayor valor de resistencia a primera fisura, con un comportamiento de endurecimiento inicial importante, que hace menos visible en la curva carga-abertura de fisura la pérdida de rigidez tras la fisuración. Así mismo, ha presentado los mayores valores de resistencia residual a todos los niveles, debido esencialmente al contenido de fibras de 70 kg/m^3 , a su esbeltez y a la gran cantidad de fibras por kg adicionado.

Respecto de los elementos con 40 kg/m^3 (I-80/35-40-10 y I-80/50-40-10), tras la fisuración los elementos con fibras 80/50 (más largas, por lo tanto menor cantidad de fibras por kg adicionado) presentan una pérdida instantánea de capacidad de carga que es recuperada con el incremento de la abertura de fisura, y desarrollan una capacidad de endurecimiento superior a los elementos con fibras 80/35 (Figura 5.5). Los mayores valores de resistencia residual para las fibras 80/50 son debidos esencialmente a la mayor longitud de fibra (se observa también un buen comportamiento de estas mismas fibras en hormigón Tipo II).

Todos los hormigones Tipo II (Figura 5.6) presentan comportamientos post-fisura de endurecimiento por deformación, excepto los elementos II-50/30-40-10 (fibras de corte de lámina sin extremos conformados).

El hormigón II-80/50-40-20 ha presentado los mayores valores de resistencia residual para los SFRC Tipo II, con capacidad de incrementar y mantener valores de resistencia residual con el incremento de la abertura de fisura (hasta valores de 4 mm). Aunque los valores de carga para los elementos I-80/50-40-10 son superiores a los presentados por los elementos II-80/50-40-20, si se compara la resistencia a primera fisura y la resistencia máxima a lo largo del ensayo, los valores para los dos hormigones son prácticamente iguales (de la Tabla 6.10, relación carga máxima/carga de primera fisura igual a 1.67 y 1.69, respectivamente), destacando la capacidad de la fibra debido a su esbeltez y, al compararla con las 80/35, la importancia de la mayor longitud sobre la resistencia del hormigón.

Los hormigones II-65/40-40-20 y II-45/50-40-20, han presentado comportamientos post-fisura con capacidad de mantener valores de resistencia residual constantes a lo largo del ensayo (hasta abertura de fisura de 4 mm). Los valores de resistencia residual para estos dos hormigones han sido muy similares, sensiblemente mayores para el II-45/50-40-20, lo que puede ser debido a la baja resistencia a compresión (resultado inesperado) presentada por el hormigón II-65/40-40-20.

La mayor resistencia a primera fisura f_{ctL}^f para todos los hormigones la presentó el hormigón I-80/35-70-10 con 6.38 MPa. Se han obtenido valores de coeficiente de variación entre 2.7% y 22.9%, valores aceptables dentro de lo experimentado para los SFRC en ensayos de flexotracción. Los hormigones Tipo II, con menores valores de resistencia residual, tienden a presentar mayores valores de coeficientes de variación.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS DE FLUENCIA

En este capítulo se presentan y analizan las condiciones operativas en las que se han desarrollado los ensayos de fluencia, los resultados de los ensayos de fluencia (en etapas de carga, descarga y recuperación) y en el proceso de prefisuración y rotura post-fluencia según la metodología de ensayo establecida en el Capítulo 3.

6.1. CONDICIONES OPERATIVAS

Se presentan y analizan los resultados del control de las condiciones operativas en las que se han llevado a cabo los ensayos de fluencia, que comprenden: evolución de la humedad y temperatura en la cámara de ensayos de fluencia y control de la continuidad de la carga aplicada en los ensayos a lo largo del tiempo.

6.1.1. EVOLUCIÓN DE LA HUMEDAD Y TEMPERATURA A LO LARGO DEL TIEMPO EN LA CÁMARA DE ENSAYOS

Los ensayos de fluencia se han realizado en una cámara con humedad y temperatura controladas. Se ha llevado a cabo el seguimiento de los valores de humedad y temperatura durante los ensayos, para así analizar su influencia en el comportamiento de los ensayos de fluencia en cada serie.

En las Figuras 6.1, 6.2 y 6.3 se presenta para cada serie los registros de la humedad y temperatura a lo largo del tiempo.

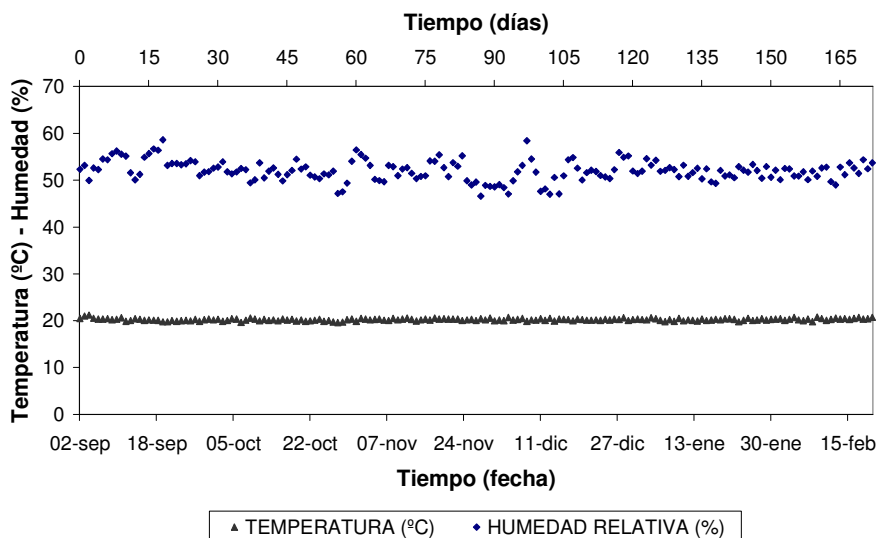


Figura 6.1. Humedad y temperatura en función del tiempo, Serie 1.

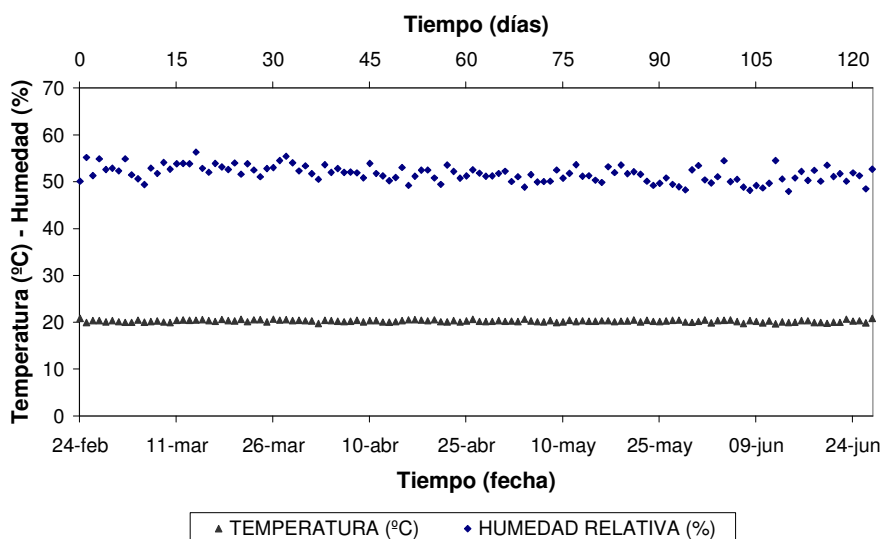


Figura 6.2. Humedad y temperatura en función del tiempo, Serie 2.

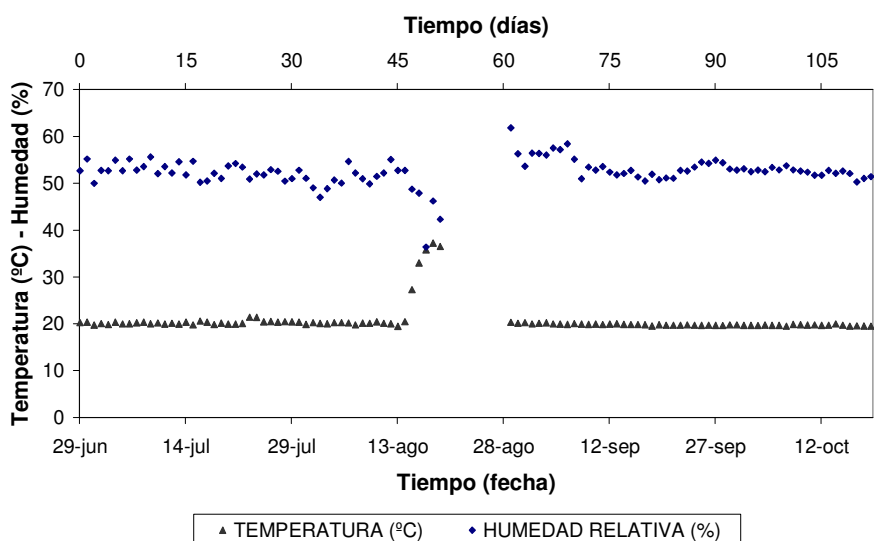


Figura 6.3. Humedad y temperatura en función del tiempo, Serie 3.

En la Tabla 6.1 se presenta el resumen de los registros de humedad y temperatura correspondientes a los valores máximos, mínimos y la media para cada serie de ensayos de fluencia.

Tabla 6.1. Resultados de comportamiento de la humedad y la temperatura.

Serie	Humedad (%)				Temperatura (°C)			
	Max	Min	Media	CV(%)	Max	Min	Media	CV(%)
1	70.7	39.7	51.3	7.2	23.1	18.1	20.5	3.9
2	70.4	41.2	52.2	6.7	22.1	18.8	20.3	2.4
3	72.2	36.4	55.1	11.3	38.2	18.2	20.6	11.2

Los valores medios a lo largo de las series para la humedad (51.3%, 52.2% y 55.1%, para series 1, 2 y 3 respectivamente) y la temperatura (20.5°C, 20.3°C y 20.6°C, para series 1, 2 y 3 respectivamente) son muy similares.

Los coeficientes de variación para cada serie y para los valores medios son menores en el caso de la temperatura (con excepción de la serie 3), lo que indica que la temperatura se controla mejor y se ha mantenido más constante a lo largo del tiempo que la humedad en la cámara empleada.

Los valores de temperatura máxima (38.2°C) y humedad mínima (36.4%) (Figura 6.3), así como los coeficientes de variación (11.3% y 11.2% para la humedad y la temperatura, respectivamente) para la serie 3 se salen de las tendencias mostradas. Estos valores se presentaron entre el 17 y 28 de agosto del 2009, fechas en la que los equipos de la cámara sufrieron una avería. Si se eliminan los valores registrados durante la avería, los coeficientes de variación obtenidos son de 10.8% y 2.7%, presentándose una importante reducción en la variación de los valores de temperatura, y una tendencia similar a las otras dos series.

6.1.2. CONTROL DE CONTINUIDAD DE LA CARGA APLICADA A LO LARGO DEL TIEMPO

La evolución de la carga a lo largo del tiempo en cada uno de los bastidores y para cada una de las series, se presenta gráficamente en las Figuras 6.4, 6.5 y 6.6. También se presentan los valores con mayor relevancia para cada una de las series en las Tablas 6.2, 6.3 y 6.4, en las que se especifica:

- Tipo de hormigón.
- Número del bastidor (NB).
- Valor inicial de carga (kN).
- Valor final de carga (kN).
- Diferencia entre el valor inicial y el valor final de carga (Δ_{I-F}) (en kN y % sobre el valor medio de la carga aplicada).
- Valor máximo de carga (kN).
- Valor mínimo de carga (kN).
- Diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de carga (Δ_{M-m}) (en kN y % sobre el valor medio de la carga aplicada).

- Valor medio de carga aplicada (kN).
- Coeficiente de variación de la carga aplicada (CV) (%).

Para obtener la diferencia entre el valor inicial y el valor final de carga Δ_{I-F} , el valor inicial se obtiene de la media de diez valores consecutivos 1 minuto después de haber terminado el proceso de carga, y el valor final a los 90 días se obtiene de la media de los diez últimos valores tomados al final del ensayo a los 90 días de carga.

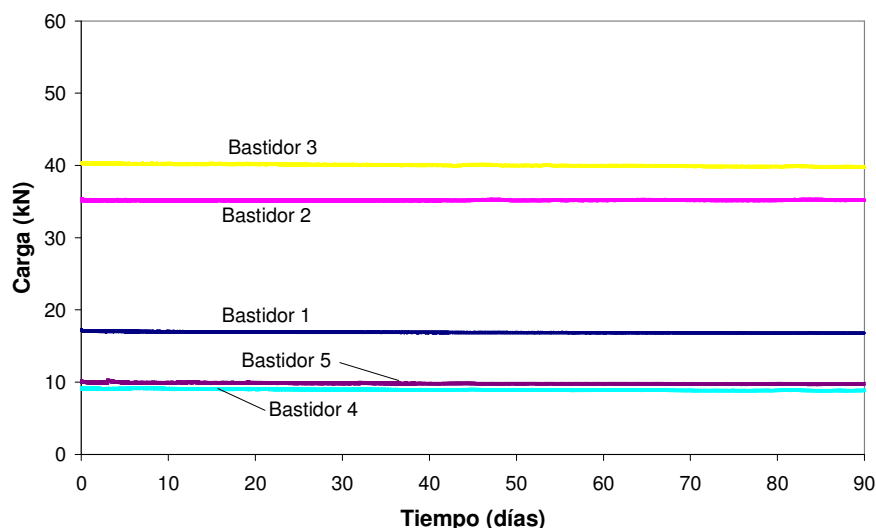


Figura 6.4. Comportamiento de la carga en función del tiempo, Serie 1.

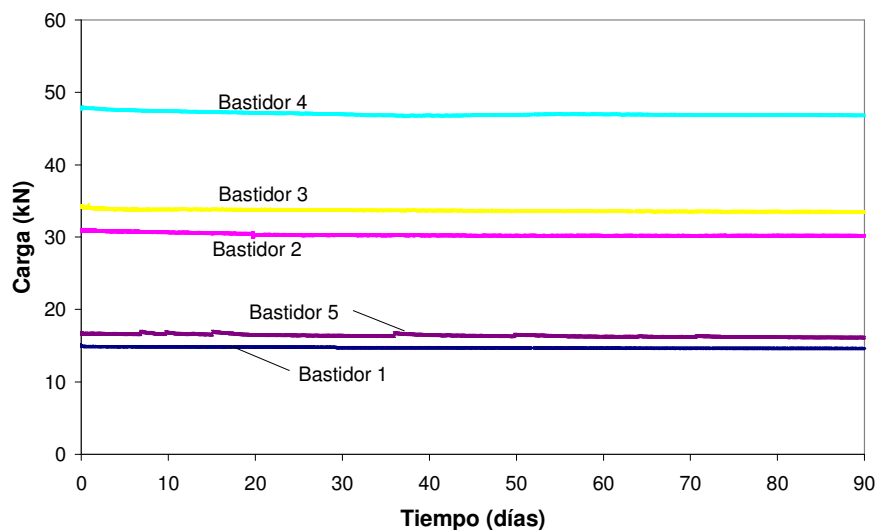


Figura 6.5. Comportamiento de la carga en función del tiempo, Serie 2.

Los picos de carga que han tenido lugar en el bastidor 5 de la serie 2 (Figura 6.5), coinciden con aumentos súbitos de la abertura de fisura. Este bastidor se encuentra ubicado en una zona de paso obligatorio dentro de la cámara de ensayos de fluencia, por lo que situaciones accidentales pueden haber causado estos incrementos. También cabe pensar que, debido a los aumentos súbitos, se genera una desestabilización del ensayo y su efecto sobre el transductor de fuerza genera estos saltos. Al analizar el comportamiento de la carga en detalle, se puede apreciar que el valor de la

carga después de incrementarse súbitamente no retorna de forma rápida a su valor previo, sino que se recupera gradualmente, necesitando para ello varios días.

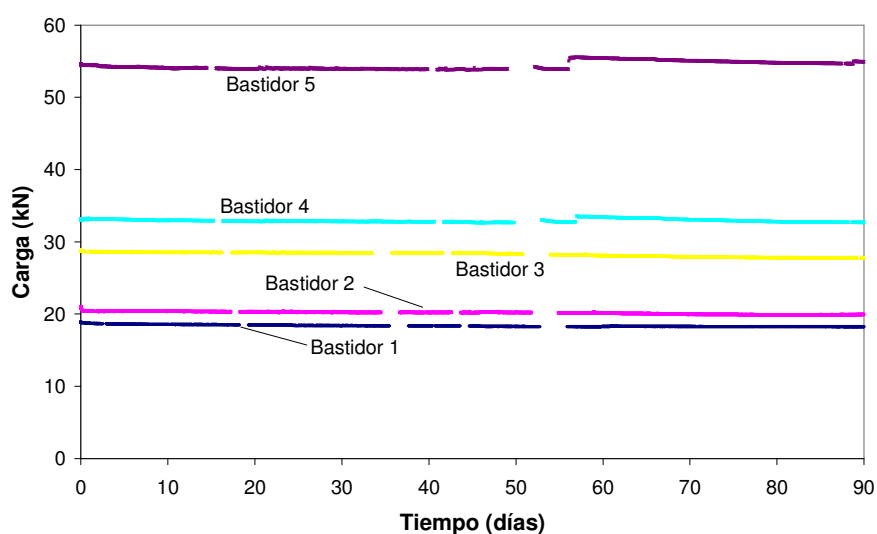


Figura 6.6. Comportamiento de la carga en función del tiempo, Serie 3.

Los espacios en blanco en la Figura 6.6 corresponden a periodos en los que el sistema de adquisición de datos sufrió fallos y fue necesario reiniciarlo para que continuara con la toma de datos. Los saltos de carga presentes en el bastidor 4 y 5 corresponden al día 28 de agosto de 2009, día en que se soluciona la avería y se regulariza la humedad y la temperatura. Este fenómeno de incremento de carga se presenta únicamente en los bastidores con elementos armados, y se puede pensar que es debido a que la mayor rigidez de estos influye en el modo de oponerse a los cambios dimensionales del bastidor y sus componentes originados por los gradientes térmicos.

Tabla 6.2. Resultados de comportamiento de la carga a lo largo del ensayo, Serie 1.

Serie 1		Valores de carga (kN)									
Hormigón	NB	Inicial	Final	Δ_{I-F}	Δ_{I-F} (%)	Max	Min	Δ_{M-m}	Δ_{M-m} (%)	Medio	CV (%)
I-80/35-40-10	1	17.23	16.78	0.45	2.6	17.24	16.77	0.47	2.7	16.88	0.42
I-80/35-70-10	2	35.14	35.21	-0.07	0.2	35.32	35.05	0.26	0.7	35.18	0.11
I-80/35-70-10	3	40.31	39.81	0.50	1.2	40.40	39.77	0.63	1.5	40.03	0.34
II-65/40-40-20	4	8.96	8.83	0.13	1.4	9.17	8.77	0.39	4.3	8.83	1.05
II-50/30-40-10	5	10.16	9.72	0.44	4.3	10.28	9.68	0.60	5.9	9.72	0.84

Tabla 6.3. Resultados de comportamiento de la carga a lo largo del ensayo, Serie 2.

Serie 2		Valores de carga (kN)									
Hormigón	NB	Inicial	Final	Δ_{I-F}	Δ_{I-F} (%)	Max	Min	Δ_{M-m}	Δ_{M-m} (%)	Medio	CV (%)
II-50/30-40-10	1	15.07	14.62	0.45	3.0	15.06	14.62	0.45	3.0	14.72	0.52
I-80/35-40-10	2	30.60	30.17	0.42	1.4	30.95	30.00	0.95	3.1	30.31	0.66
I-80/35-40-10	3	34.31	33.47	0.83	2.4	34.37	33.45	0.93	2.7	33.69	0.39
I-80/35-70-10	4	47.76	46.83	0.93	1.9	47.93	46.69	1.24	2.6	47.03	0.53
II-45/50-40-20	5	16.67	16.12	0.56	3.3	16.99	16.09	0.90	5.3	16.39	1.12

Tabla 6.4. Resultados de comportamiento de la carga a lo largo del ensayo, Serie 3.

Serie 3		Valores de carga (kN)									
Hormigón	NB	Inicial	Final	Δ_{I-F}	Δ_{I-F} (%)	Max	Min	Δ_{M-m}	Δ_{M-m} (%)	Medio	CV (%)
II-45/50-40-20	1	18.91	18.24	0.67	3.6	18.93	18.22	0.71	3.7	18.38	0.71
II-80/50-40-20	2	20.91	19.92	0.99	4.7	20.91	19.88	1.03	4.9	20.16	0.82
I-80/50-40-10	3	28.86	27.81	1.05	3.6	28.86	27.79	1.08	3.7	28.29	1.06
II-2 ϕ 6-20	4	33.06	32.69	0.37	1.1	33.58	32.64	0.94	2.8	32.93	0.63
I-2 ϕ 8-10	5	54.50	54.95	-0.45	0.8	55.56	53.80	1.76	3.2	54.42	0.99

Se han aplicado cargas medias con valores comprendidos entre 8.83 kN (Serie 1, Bastidor 4, elementos II-65/40-40-20) hasta 54.42 kN (Serie 3, Bastidor 5, elementos I-2 ϕ 8-10).

Considerando el sistema de carga implementado (palanca con contrapesos) no es de esperar que se presenten cambios sustanciales en los valores de las cargas aplicadas.

Predomina la tendencia a producirse un ligero descenso en la carga aplicada a lo largo del ensayo y coincidir (o ser muy cercanos) los valores máximo y mínimo con los valores inicial y final, aunque no siempre fue así: 13 de los 15 ensayos presentan pérdida de carga con valores entre 0.16 kN y 1.05 kN; los 2 ensayos restantes presentan aumento de carga con valores entre 0.07 kN (Serie 1, Bastidor 2, elementos I-80/35-70-10) y 0.45 kN (Serie 3, Bastidor 5, elementos I-2 ϕ 8-10), que significan un 0.2% y un 0.8% (valores realmente bajos).

En la Figura 6.7 se contrasta la diferencia entre el valor inicial y el valor final Δ_{I-F} para cada ensayo con el valor medio de carga. No se aprecia una tendencia clara de comportamiento.

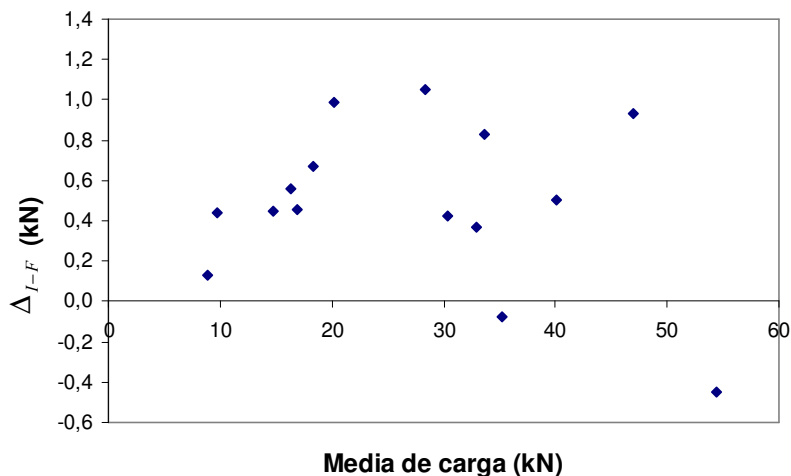


Figura 6.7. Diferencia entre el valor inicial y el valor final vs. el valor medio de carga.

En la Figura 6.8 se contrasta la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de carga Δ_{M-m} para cada ensayo con el valor medio de carga. Se

aprecia una tendencia general a presentar mayores diferencias para mayores valores medios de carga.

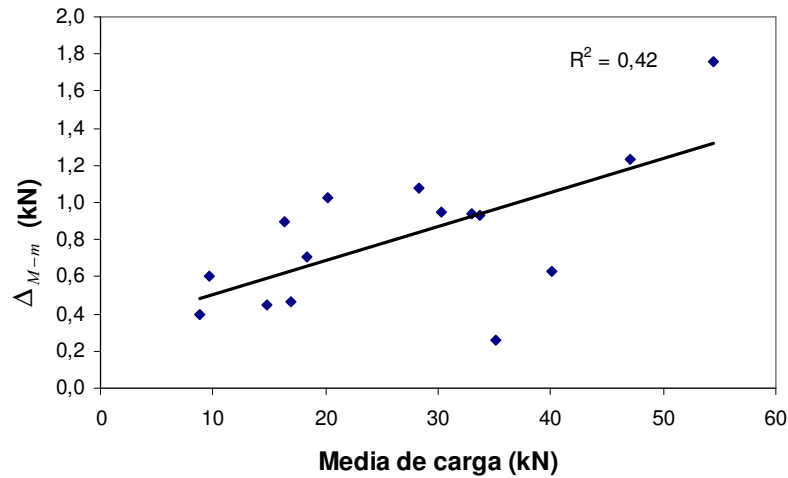


Figura 6.8. Diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo vs. el valor medio de carga.

En la Figura 6.9 se presenta la relación entre la variación de los valores de carga inicial y final Δ_{I-F} en % para cada ensayo con el valor medio de la carga aplicada. Se observa una tendencia a que los menores valores de variación se presenten para los mayores valores de carga.

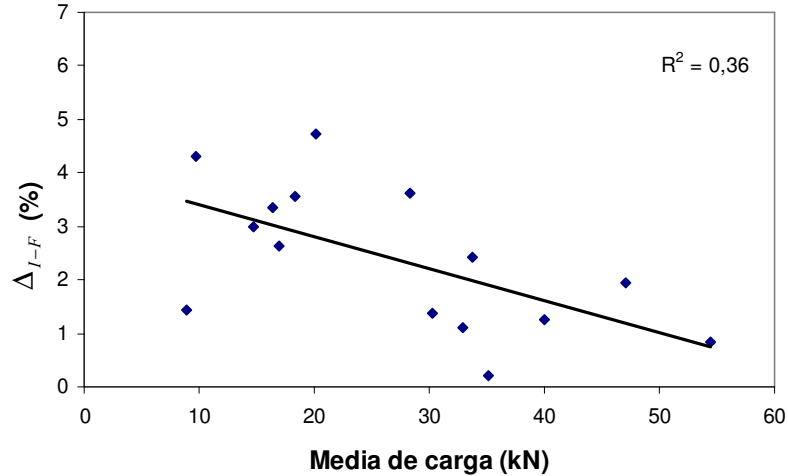


Figura 6.9. Diferencia entre el valor inicial y el valor final (en %) vs. el valor medio de carga.

En la Figura 6.10 se presenta la relación entre la variación de los valores de carga máximos y mínimos Δ_{M-m} en % para cada ensayo con el valor medio de la carga aplicada. Así mismo, se observa una tendencia a que los menores valores de variación se presenten para los mayores valores de carga.

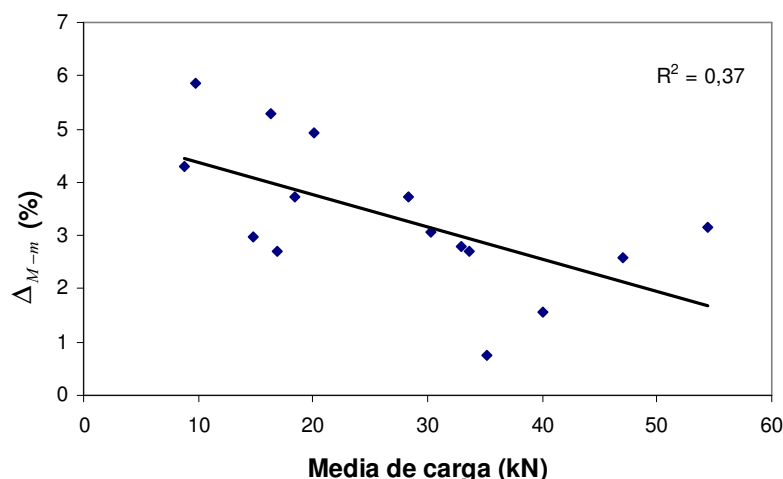


Figura 6.10. Diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo (en %) vs. el valor medio de carga.

La diferencia entre el valor inicial de la carga aplicada y el valor final Δ_{I-F} (%) a los 90 días presenta valores entre 0.2% y 4.7%.

La variación entre el valor máximo y mínimo Δ_{M-m} (%) registrado a lo largo del ensayo presenta valores entre 0.7% y 5.9%. Ahora bien, la serie 3 muestra una tendencia general a presentar mayores valores de coeficiente de variación y en cuatro de los cinco bastidores se alcanzan variaciones superiores al 3%, pudiéndose atribuir este hecho a la avería de la cámara donde se realizan los ensayos (fenómeno coincidente con las fechas de la avería), por lo que la humedad y la temperatura no se controlaron de forma adecuada durante un cierto periodo de tiempo (Figura 6.3).

En las series 1 y 2 el bastidor 5 presenta valores altos de Δ_{M-m} (%) y coeficientes de variación, lo que se atribuye a factores ajenos al ensayo (eventos accidentales que causaron incrementos de muy corta duración).

Los coeficientes de variación para las 3 series presentan valores bajos, entre 0.11% y 1.12% para los 90 días de ensayo analizados. En términos generales, los valores de los coeficientes de variación han sido satisfactorios, presentando una lógica tendencia a aumentar el error absoluto al incrementar la carga aplicada, pero con una reducción del valor relativo. Por lo tanto, se considera que se han mantenido y controlado adecuadamente los niveles de carga a lo largo de los ensayos.

6.2. RESULTADOS DEL PROCESO DE PREFISURACIÓN

Se presentan y analizan los resultados del proceso de prefisuración previo a los ensayos de fluencia. Primero se presentan y definen los valores más importantes de los ensayos, y posteriormente se dan herramientas para la interpretación de los resultados relativos a las aberturas de fisura y a las deformaciones en compresión del hormigón.

6.2.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Los ensayos de prefisuración se han realizado siguiendo el mismo procedimiento establecido para los ensayos de rotura a flexotracción (véase 3.3.4 y 5.2.1.3), con la diferencia de que los ensayos de prefisuración se han detenido al nivel de prefisuración w_n (definido en 4.6) requerido para cada situación, registrando la posterior descarga y recuperación del elemento para después ser llevado al bastidor de fluencia.

Las Figuras 6.11, 6.12 y 6.13 presentan una muestra representativa de los resultados (los resultados para la totalidad de los elementos se presenta en el Anejo 3) correspondientes a tres comportamientos típicos observados a partir de las curvas del proceso de prefisuración. En dichas figuras se indican los siguientes parámetros:

- w_p : abertura de fisura máxima en proceso de prefisuración, medida en el captador.
- w_{pr} : abertura de fisura residual al descargar, medida en captador.
- F_L : carga de primera fisura.
- F_w : carga soportada por el elemento en el nivel de prefisuración w_p .

La Figura 6.11 presenta un comportamiento a flexotracción de endurecimiento inicial fuerte, donde la ocurrencia de la primera fisura no se detecta fácilmente en la curva al no producirse una pérdida de capacidad de carga.

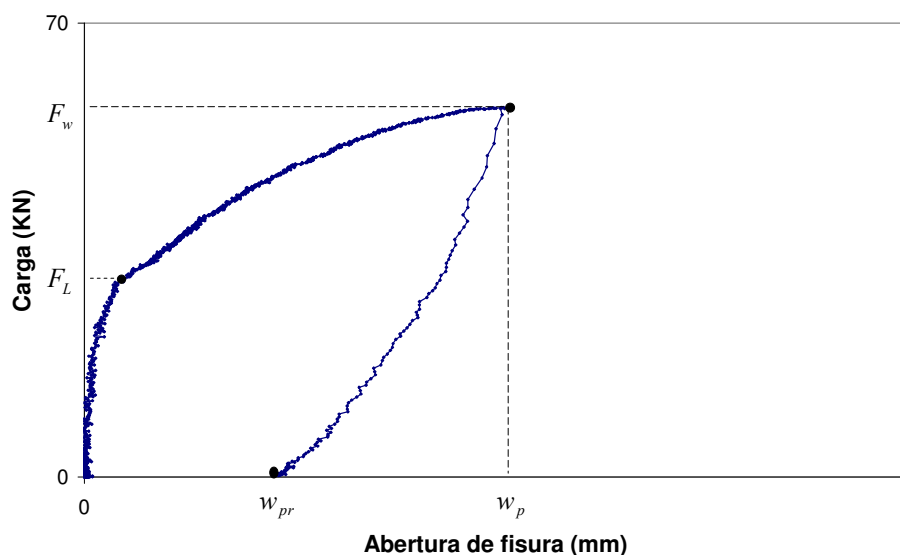


Figura 6.11. Curva de prefisuración de hormigón Tipo I-80/35-70-10 (Serie 1, Bastidor 2, Probeta 1).

La Figura 6.12 presenta un comportamiento a flexotracción donde la aparición de la primera fisura se detecta claramente en la curva, produciendo una pérdida de capacidad de carga; tras esta caída, a medida que aumenta la

abertura de fisura se refleja una capacidad de recuperación y aumento en los valores de resistencia residual (endurecimiento por deformación).

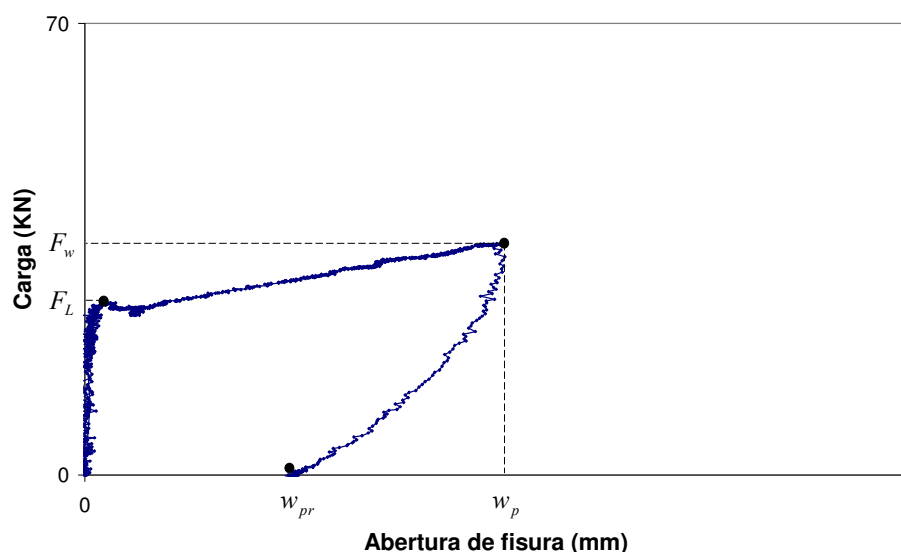


Figura 6.12. Curva de prefisuración de hormigón Tipo I-80/50-40-10 (Serie 3, Bastidor 3, Probeta 2).

La Figura 6.13 presenta un comportamiento a flexotracción donde la ocurrencia de la primera fisura es fácilmente detectable, produciendo una pérdida de capacidad de carga que a medida que aumenta la abertura de fisura desciende gradualmente, reflejando un ablandamiento.

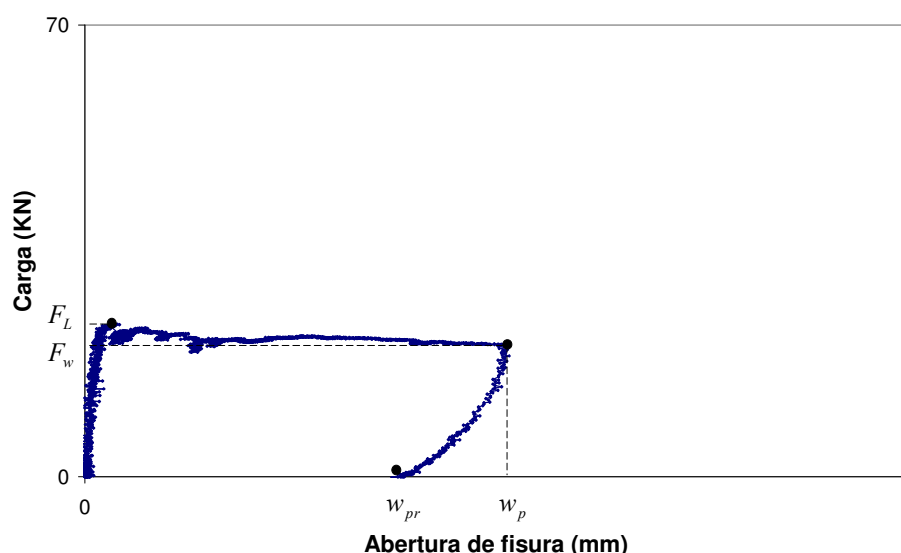


Figura 6.13. Curva de prefisuración de hormigón Tipo II-50/30-40-10 (Serie 2, Bastidor 1, Probeta 2).

Las Tablas 6.5, 6.6 y 6.7 presentan el resumen de los resultados del proceso de prefisuración a flexotracción para las series 1, 2 y 3, respectivamente. Para cada elemento se indican, además de los parámetros w_p , w_{pr} , F_L y F_w definidos anteriormente, los siguientes datos:

Hormigón: tipo de hormigón empleado (véanse Tablas 4.6 y 5.1).

Bastidor: número del bastidor en el que se realizó posteriormente el ensayo de fluencia.

Posición: ubicación de la probeta en la columna de ensayo (formada por 3 probetas como máximo, numeradas de arriba abajo, donde 1 es la superior).

w_n : abertura nominal de fisura.

F_{wn} : carga media soportada en ensayos de rotura a flexotracción (ver 5.2.2.2) en el nivel de prefisuración nominal w_n .

Tabla 6.5. Resultados del proceso de prefisuración, Serie 1.

Hormigón	Bastidor	Posición	w_n (mm)	w_p (mm)	w_{pr} (mm)	F_L (kN)	F_w (kN)	F_{wn} (kN)
I-80/35-40-10	1	1	0.5	0.501	0.266	25.3	27.9	28.8
		2		0.508	0.298	26.7	32.0	
		3		0.501	0.312	26.8	33.5	
I-80/35-70-10	2	1		0.511	0.234	30.8	57.0	53.1
		2		0.505	0.251	35.4	60.6	
		3		0.513	0.274	36.3	61.6	
I-80/35-70-10	3	1		0.505	0.253	31.3	49.5	
		2		0.509	0.253	30.2	49.6	
		3		0.505	0.246	31.0	50.8	
II-65/40-40-20	4	1		0.992	0.801	20.7	15.9	19.4
		2		0.599	0.430	18.4	15.8	
		3		0.507	0.330	19.5	14.3	
II-50/30-40-10	5	1	0.510	0.402	20.3	12.9	19.2	
		2	0.510	0.383	22.1	18.1		
		3	0.518	0.346	23.1	20.2		

Tabla 6.6. Resultados del proceso de prefisuración, Serie 2.

Hormigón	Bastidor	Posición	w_n (mm)	w_p (mm)	w_{pr} (mm)	F_L (kN)	F_w (kN)	F_{wn} (kN)
II-50/30-40-10	1	1*	0.5	0.513	0.354	23.8	17.1	19.2
		2*		0.510	0.364	24.2	19.1	
		3		0.509	0.364	25.7	21.3	
		1**		0.507	0.367	23.1	18.6	
		2**		0.516	0.386	23.6	20.5	
I-80/35-40-10	2	1		0.507	0.270	30.9	31.6	28.8
		2		0.514	0.291	32.1	38.1	
		3		0.520	0.285	33.4	45.1	
I-80/35-40-10	3	1		1.505	1.115	31.4	41.1	31.9
		2		1.505	1.068	30.6	42.8	
		3	1.504	1.092	30.6	45.5		
I-80/35-70-10	4	1*	0.5	0.511	0.244	34.4	50.1	53.1
		2*		0.507	0.178	42.0	50.3	
		3		0.518	0.229	33.8	60.0	
		1**		0.525	0.256	31.4	50.6	
		2**		0.516	0.243	31.6	52.1	
II-45/50-40-20	5	1		0.507	0.356	21.8	17.0	21.3
		2		0.510	0.356	22.8	21.3	
		3		0.513	0.332	23.2	22.6	

* elementos que experimentan rotura en proceso de puesta en carga o a pocos minutos de finalizar la puesta en carga en el ensayo de fluencia.

** elementos que reemplazan a los que llegan a la rotura en el ensayo de fluencia.

Tabla 6.7. Resultados del proceso de prefisuración, Serie 3.

Hormigón	Bastidor	Posición	w_n (mm)	w_p (mm)	w_{pr} (mm)	F_L (kN)	F_w (kN)	F_{wn} (kN)
II-45/50-40-20	1	1	0.5	0.511	0.357	23.6	20.5	21.3
		2		0.511	0.361	19.6	22.8	
		3		0.508	0.342	25.7	26.4	
II-80/50-40-20	2	1		0.505	0.254	21.0	23.3	27.4
		2		0.515	0.298	22.4	25.6	
		3		0.515	0.290	21.0	25.6	
I-80/50-40-10	3	1		1.110	0.738	30.2	32.8	33.6
		2		0.511	0.250	26.7	35.8	
		3		0.515	0.278	27.7	36.9	
II-2φ6-20	4	1		0.515	0.134	21.7	41.5	37.6
		2		0.517	0.157	21.5	42.1	
		3		0.515	0.170	22.5	41.7	
I-2φ8-10	5	1		0.530	0.096	25.7	62.0	68.3
		2		-	-	-	67.3	
		3		0.517	0.101	26.9	73.7	

- no se cuenta con estos datos, debido a problemas en el momento del ensayo con el sistema de adquisición de datos y/o instrumentos de medida.

Los elementos en posición 1 para II-65/40-40-20 y I-80/50-40-10 (Tablas 6.5 y 6.7), presentan valores de abertura de fisura de prefisuración w_p muy superiores al valor de abertura de fisura buscado w_n , debido a la pérdida de control en el proceso de prefisuración.

Todos los elementos colocados en un mismo bastidor corresponden a una misma amasada, excepto los elementos I-80/35-70-10 de la serie 2 (como se puede ver en la Tabla 6.4). Sin embargo, al analizar los valores F_w para cada hormigón se puede apreciar una importante dispersión de resultados. Los elementos I-80/35-40-10 (serie 2, bastidor 2) y I-2φ8-10 presentan una gran variación. Para el hormigón I-80/35-40-10, los elementos para la serie 1 y bastidor 1 presentaron menores valores medios de F_L y F_w (26.3 kN y 31.1 kN, respectivamente) que los elementos de la serie 2 y bastidor 2 (32.1 kN y 38.2 kN, respectivamente) y bastidor 3 (30.9 kN y 43.1 kN). Las importantes diferencias que se han presentado en las resistencias a compresión f_c (ensayos en probeta cúbica) para las probetas de acompañamiento de los hormigones en cuestión justifican estas diferencias (ver Tabla 5.3).

Además, en algunos bastidores existen elementos que destacan por tener valores notablemente diferentes a los experimentados por los elementos de su misma amasada, entre los que cabe reseñar: elemento 1 de II-50/30-40-10 (serie 1, bastidor 5), elemento 3 de I-80/35-40-10 (serie 2, bastidor 3), elemento 1 y 3 de II-45/50-40-20 (serie 2, bastidor 5, y serie 3, bastidor 1, respectivamente), y elemento I-80/50-40-10 (serie 3, bastidor 3). Así mismo, los elementos I-80/35-40-10 (serie 1, bastidor 1, y serie 2, bastidores 2 y 3), y I-80/35-70-10 (serie 1, bastidor 2) presentan valores de F_w considerablemente

mayores a F_{wn} , mientras que el elemento II-65/40-40-20 (serie 1, bastidor 4) presenta valores de F_w menores a F_{wn} .

Esta variabilidad se atribuye a la dispersión propia del ensayo de este tipo de hormigones. Las anteriores observaciones serán tenidas en cuenta al analizar el comportamiento de los elementos a fluencia.

6.2.2. ANÁLISIS DE LA FASE DE DESCARGA TRAS LA PREFISURACIÓN

Las Tablas 6.8 y 6.9 presentan, para hormigones Tipo I y Tipo II respectivamente, además del tipo de hormigón, la serie, el bastidor, la posición y la abertura de fisura nominal w_n , la capacidad de recuperación del elemento prefisurado al descargar $(w_p - w_{pr})/w_p$ y la relación entre la carga al nivel de prefisura y la carga de primera fisura F_w/F_L .

Tabla 6.8. Capacidad de recuperación al descargar y relación F_w/F_L (hormigones Tipo I).

	Hormigón	Serie	Bastidor	Posición	w_n (mm)	$\frac{F_w}{F_L}$	$\frac{w_p - w_{pr}}{w_p}$
Tipo I	80/35-40-10	1	1	1	0.5	1.10	0.47
				2		1.20	0.41
				3		1.25	0.38
		2	2	1		1.02	0.47
				2		1.19	0.43
				3		1.35	0.45
		3		1	1.5	1.31	0.26
				2		1.40	0.29
				3		1.49	0.27
	80/35-70-10	1	2	1	0.5	1.85	0.54
				2		1.71	0.50
				3		1.70	0.47
			3	1		1.58	0.50
				2		1.64	0.50
				3		1.64	0.51
		2	4	1*	1.46	0.52	
				2*	1.20	0.65	
				3	1.77	0.56	
				1**	1.61	0.51	
				2**	1.65	0.53	
	80/50-40-10	3	3	1	0.5	1.09	0.34
				2		1.34	0.51
				3		1.33	0.46
	2φ8-10	3	5	1	0.5	2.41	0.82
2				-		-	
3				2.74		0.80	

* elementos que experimentan rotura en proceso de puesta en carga o a pocos minutos de finalizar la puesta en carga en el ensayo de fluencia.

** elementos que reemplazan a los que llegan a la rotura en el ensayo de fluencia.

Tabla 6.9. Capacidad de recuperación al descargar y relación F_w / F_L (hormigones Tipo II).

Hormigón	Serie	Bastidor	Posición	w_n (mm)	$\frac{F_w}{F_L}$	$\frac{w_p - w_{pr}}{w_p}$
Tipo II	80/50-40-20	3	2	1	1.11	0.50
				2	1.14	0.42
				3	1.22	0.44
	65/40-40-20	1	4	1	0.77	0.19
				2	0.86	0.28
				3	0.73	0.35
	45/50-40-20	2	5	1	0.78	0.30
				2	0.93	0.30
				3	0.97	0.35
		3	1	1	0.87	0.30
				2	1.16	0.29
				3	1.03	0.33
	50/30-40-10	1	5	1	0.63	0.21
				2	0.82	0.25
				3	0.88	0.33
		2	1	1*	0.72	0.31
				2*	0.79	0.29
				3	0.83	0.28
				1**	0.80	0.28
				2**	0.87	0.25
	2φ6-20	3	4	1	1.92	0.74
2				1.96	0.70	
3				1.86	0.67	

* elementos que experimentan rotura en proceso de puesta en carga o a pocos minutos de finalizar la puesta en carga en el ensayo de fluencia.

** elementos que reemplazan a los que llegan a la rotura en el ensayo de fluencia.

En función de la capacidad de recuperación $(w_p - w_{pr}) / w_p$, de la relación de capacidad de carga F_w / F_L y de la relación carga máxima/carga de primera fisura (F_{max} / F_L) obtenida de los ensayos de rotura a flexotracción (véase Tabla 5.4), se pueden clasificar como se presenta en la Tabla 6.10.

En la Tabla 6.10 se puede distinguir un primer grupo de elementos que corresponde a los elementos armados, que muestran una clara tendencia al endurecimiento tras fisuración. Un segundo grupo que corresponde a los elementos con 70 kg/m^3 de fibras de esbeltez 80. El tercer grupo corresponde a los elementos con 40 kg/m^3 de fibras de esbeltez 80. Y un cuarto grupo que corresponde a los elementos con fibras de esbeltez inferior.

Las mayores capacidades de recuperación se obtienen con los hormigones que presentan endurecimiento por deformación y mayor reserva resistente, es decir, los que disponen de armadura tradicional (en primer lugar), mayor contenido de fibras (segundo lugar) o fibras más esbeltas (tercer lugar). Un último grupo de hormigones, con comportamiento de ablandamiento o con resistencia residual constante o con abertura de prefisura de 1.5 mm, muestran las peores capacidades de recuperación.

Para los valores de F_{\max} / F_L llama la atención la similitud entre los valores de I-80/35-70-10, I-80/50-40-10 y II-80/50-40-20, y la diferencia para I-80/35-40-10, que indican que la relación F_{\max} / F_L es función de la longitud de fibra y de la cantidad empleada independientemente del hormigón.

Tabla 6.10. Grupos de análisis del proceso de prefisuración en función del refuerzo.

Hormigón	Valores medios		
	$\frac{w_p - w_{pr}}{w_p}$	$\frac{F_w}{F_L}$	$\frac{F_{\max}}{F_L}$
I-2φ8-10	0.81	2.58	3.97
I-2φ6-20	0.70	1.91	3.39
I-80/35-70-10	0.53	1.62	1.72
I-80/35-40-10	0.44	1.18	1.24
I-80/50-40-10*	0.49	1.34	1.67
II-80/50-40-20	0.45	1.16	1.69
II-65/40-40-20*	0.32	0.79	1.08
II-45/50-40-20	0.31	0.96	1.09
II-50/30-40-10	0.28	0.79	1.00
I-80/35-40-10**	0.27	1.40	1.24

* no se han tenido en cuenta los elementos en posición 1 en la obtención de los valores medios, por tener valores diferentes de w_p .

** Elementos con $w_n = 1.5$ mm.

En relación con el proceso de descarga tras prefisuración, y con el fin de evaluar la capacidad de recuperación de las deformaciones, en la Tabla 6.11 se presentan los valores de abertura de fisura y deformación en compresión del hormigón correspondientes al proceso de prefisuración de los elementos de la Serie 3. Se presentan, además del tipo de hormigón, el bastidor (BA), la posición en el bastidor (P), F_w , w_p , w_{pr} y $(w_p - w_{pr}) / w_p$, los siguientes parámetros relativos a las deformaciones del hormigón en compresión:

ϵ_p : deformación en compresión correspondiente al nivel de prefisuración w_p definido.

ϵ_{pr} : deformación residual en compresión correspondiente a la abertura de fisura residual de prefisuración w_{pr} .

$\frac{\epsilon_p - \epsilon_{pr}}{\epsilon_p}$: capacidad de recuperación de las deformaciones en compresión.

$\frac{R_f}{R_c}$: relación entre la capacidad de recuperación de la abertura de fisura y la capacidad de recuperación de las deformaciones en compresión (%).

Tabla 6.11. Resultados de abertura de fisura y deformación en compresión en proceso de prefisuración, Serie 3 ($w_n = 0.5$ mm).

Hormigón	BA	P	F_w (kN)	Abertura fisura (mm)			Deformación (‰)			$\frac{R_f}{R_c}$ (%)
				w_p	w_{pr}	$\frac{w_p - w_{pr}}{w_p}$	ϵ_p	ϵ_{pr}	$\frac{\epsilon_p - \epsilon_{pr}}{\epsilon_p}$	
II-45/50-40-20	1	3	26.4	0.508	0.342	0.33	-	-	-	-
		D	31.0	0.509	0.353	0.31	0.802	0.388	0.52	60
II-80/50-40-20	2	3	25.6	0.515	0.290	0.44	0.780	0.318	0.59	74
		D	18.7	0.509	0.284	0.44	0.702	0.284	0.60	
I-80/50-40-10	3	2	35.8	0.511	0.250	0.51	0.759	0.258	0.66	80
		D	38.8	0.513	0.234	0.54	0.778	0.261	0.66	
II-2 ϕ 6-20	4	3	41.7	0.515	0.170	0.67	0.756	0.121	0.84	80
		D	42.8	-	-	-	0.800	0.139	0.83	
I-2 ϕ 8-10	5	2	68.1	-	-	-	0.879	0.111	0.87	-
		D	64.8	0.516	0.111	0.78	0.863	0.096	0.89	88

D: elementos para seguimiento de deformaciones sin carga, que se prefisuraron, pero que después no fueron cargados para ensayo de fluencia.

- datos no disponibles.

Los elementos presentan valores de ϵ_p entre 0.702 ‰ y 0.879 ‰, mostrando una tendencia general a tener mayores valores de ϵ_p para mayores valores de F_w . Las mayores deformaciones se presentan para I-2 ϕ 8-10, que son los elementos de mayor capacidad resistente y, por consiguiente, a los que se ha aplicado mayores valores de carga. Sin embargo las diferencias no son muy importantes, lo que indica claramente un mayor brazo mecánico en los elementos más resistentes.

La magnitud de los valores de la deformación en compresión indica que el hormigón comprimido está todavía lejos de su sollicitación máxima, pero que ha superado su fase elástica ampliamente.

La capacidad de recuperación de las aberturas de fisura (entre 0.31 y 0.78) es inferior a las deformaciones en compresión (entre 0.52 y 0.89). Aunque las diferencias no son excesivas, debe destacarse que son menores en los hormigones con fibras que en los elementos con armadura tradicional a pesar de estar trabajando con valores de carga mayores.

La relación entre ambas capacidades de recuperación (R_f / R_c) es un índice de la efectividad del sistema hormigón, tipo de fibras y cantidad de fibras.

6.3. ENSAYO DE FLUENCIA EN ETAPA DE CARGA

En el ensayo de fluencia se ha registrado la evolución a lo largo del tiempo de: la carga en cada bastidor, abertura de fisura w_c en cada elemento, deformación ϵ_c en cara de compresión en algunos elementos, y humedad y temperatura en el interior de la cámara de ensayos. También se han registrado dichos parámetros en el periodo de aclimatación (inicio de compensación

térmica e higroscópica) de los elementos en la cámara de humedad y temperatura controladas, que se da después de realizar el proceso de prefisuración y antes de poner en marcha el ensayo de fluencia.

Para cada elemento se ha elaborado un gráfico según el modelo establecido en 3.4.1 (Figura 3.42), así como una ficha de ensayo según el modelo establecido en 3.4.2 (Figura 3.43). En el Anejo 5 figuran los gráficos completos de ensayo (comprenden prefisuración, etapa de carga en ensayo de fluencia en carga, etapa de descarga y recuperación, y rotura post-fluencia) y la ficha de ensayo de cada uno de los elementos ensayados a fluencia.

6.3.1. ABERTURA DE FISURA EN ENSAYO DE FLUENCIA

En este apartado se toma como origen de tiempos el inicio de la puesta en carga en el bastidor de fluencia y considerando la abertura de fisura en ese momento como cero.

Un ejemplo de la respuesta abertura de fisura total w_{ct}^j vs. tiempo, donde j es el tiempo de carga en días, se ilustra en la Figura 6.14. En la curva se destacan los parámetros w_{ci} , w_{cd}^{90} y w_{ct}^{90} , que se definen del siguiente modo:

- w_{ci} : abertura de fisura inicial producida durante la puesta en carga (medida tras estabilizar la carga durante 1 minuto), medida en captador (mm).
- w_{cd}^{90} : abertura de fisura diferida a tiempo j igual a 90 días, medida en captador (mm).
- w_{ct}^{90} : abertura de fisura total a tiempo j igual a 90 días, medida en captador (mm), obtenida como:

$$w_{ct}^{90} = w_{ci} + w_{cd}^{90}$$

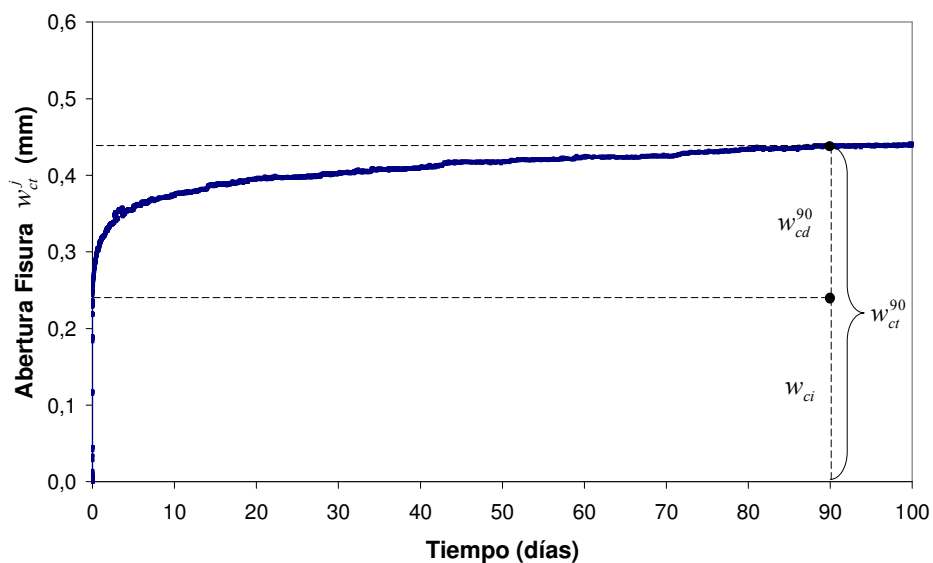


Figura 6.14. Abertura de fisura en elemento Tipo I-80/35-40-10 (Serie 1, Bastidor 1, Probeta 2).

Los resultados experimentales correspondientes a curvas abertura de fisura-tiempo de los elementos ensayados a fluencia figuran en el Anejo 4.

Las Tablas 6.12, 6.13 y 6.14 recogen el resumen de los resultados obtenidos en cada serie. Además de los parámetros w_{ci} , w_{cd}^{90} y w_{ct}^{90} , para cada elemento se indican los siguientes datos:

- Hormigón.
- Bastidor.
- Índice de carga nominal IF_n (relación nominal en % entre la carga del ensayo y la carga resistida en el nivel de prefisuración w_n que se quiere aplicar según el programa experimental).
- Índice de carga aplicada a cada elemento IF_a .

$$IF_a = \frac{F_a}{F_w} \cdot 100\%$$

Donde:

F_a : carga realmente aplicada (kN).

F_w : capacidad de carga en abertura de fisura w_p (kN).

- Posición en bastidor (siendo 1 el elemento superior).
- Número de identificación del elemento.

Tabla 6.12. Resultados de comportamiento de elementos ensayados a fluencia, Serie 1.

Hormigón	Bastidor	IF_n (%)	IF_a (%)	F_a (kN)	Posición	Id elem	w_{ci} (mm)	w_{cd}^{90} (mm)	w_{ct}^{90} (mm)	
I-80/35-40-10	1	60	60.9	17.0	1	1	0.263	0.229	0.492	
			54.9	17.6	2	2	0.231	0.208	0.439	
			54.2	18.2	3	3	0.147	0.123	0.270	
I-80/35-70-10	2		61.9	35.3	1	4	0.278	0.259	0.537	
			59.2	35.9	2	5	0.294	0.348	0.642	
			59.2	36.5	3	6	0.153	0.131	0.283	
I-80/35-70-10	3		80	81.0	40.1	1	7	0.617	0.470	1.087
			82.2	40.7	2	8	0.649	0.479	1.127	
			81.3	41.3	3	9	0.294	0.278	0.572	
II-65/40-40-20	4	60	56.2	9.0	1	10	0.312	0.153	0.465	
			60.4	9.5	2	11	0.221	0.129	0.350	
			70.8	10.1	3	12	0.191	0.160	0.351	
II-50/30-40-10	5		76.3	9.8	1	13	0.212	0.499	0.711	
			57.7	10.4	2	14	0.127	0.162	0.289	
			54.4	11.0	3	15	0.102	0.143	0.245	

Tabla 6.13. Resultados de comportamiento de elementos ensayados a fluencia, Serie 2.

Hormigón	Bastidor	IF_n (%)	IF_a (%)	F_a (kN)	Posición	Id elem	W_{ci} (mm)	W_{cd}^{90} (mm)	W_{ct}^{90} (mm)
II-50/30-40-10	1	80%	-	-	1**	16	-	-	-
			-	-	2**	17	-	-	-
			-	-	3	18	-	-	-
			68.6	14.6	3	18	-	-	-
			76.4	14.2	1**	19	-	-	-
			72.3	14.8	2	20	-	-	-
			72.2	15.4	3	18	-	-	-
			72.9	14.9	2	20	0.329	1.323	1.652
I-80/35-40-10	2	80%	97.0	30.6	1	21	0.764	0.798	1.562
			81.9	31.2	2	22	0.544	0.496	1.041
			70.5	31.8	3	23	0.207	0.146	0.353
	3*		82.9	34.1	1	24	0.904	0.798	1.702
			81.0	34.6	2	25	0.936	0.750	1.686
			77.4	35.2	3	26	0.437	0.603	1.039
I-80/35-70-10	4	95%	91.4	45.8	1	27	1.036	-	-
			92.1	46.3	2**	28	1.432	-	-
			78.2	46.9	3	29	0.298	-	-
			83.5	41.8	2**	27	-	-	-
			70.6	42.4	3	29	-	-	-
			84.8	50.9	3	29	0.324	-	-
			93.7	47.4	1	30	0.816	1.193	2.009
			92.1	48.0	2	31	0.889	0.887	1.776
II-45/50-40-20	5	80%	80.9	48.6	3	29	0.344	0.329	0.674
			97.2	16.5	1	32	0.404	0.553	0.958
			80.2	17.1	2	33	0.357	0.652	1.009
			78.3	17.7	3	34	0.195	0.320	0.515

* $w_n = 1.5$ mm.

** elementos que experimentan rotura en proceso de puesta en carga o a pocos minutos de finalizar la puesta en carga en el ensayo de fluencia.

Tabla 6.14. Resultados de comportamiento de elementos ensayados a fluencia, Serie 3.

Hormigón	Bastidor	IF_n (%)	IF_a (%)	F_a (kN)	Posición	Id elem	W_{ci} (mm)	W_{cd}^{90} (mm)	W_{ct}^{90} (mm)
II-45/50-40-20	1	80%	90.9	18.7	1	35	0.615	0.770	1.385
			84.4	19.2	2	36	0.353	0.830	1.183
			75.1	19.8	3	37	0.268	0.550	0.818
II-80/50-40-20	2		88.1	20.5	1	38	0.506	0.585	1.091
			82.5	21.1	2	39	0.401	0.497	0.898
			82.2	21.7	3	40	0.220	0.406	0.625
I-80/50-40-10	3		-	-	1	-	-	-	-
			79.6	28.5	2	41	0.457	0.334	0.791
			78.8	29.1	3	42	0.306	0.332	0.637
II-2φ6-20	4		79.8	33.1	1	43	0.495	0.140	0.635
		80.0	33.7	2	44	0.489	0.180	0.669	
		82.2	34.3	3	45	0.370	0.346	0.716	
I-2φ8-10	5	87.6	54.3	1	46	0.773	0.455	1.228	
		81.6	54.9	2	47	0.734	0.202	0.936	
		75.1	55.5	3	48	0.360	0.082	0.442	

6.3.2. DEFORMACIONES EN COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN ε_c

Las deformaciones de la zona en compresión de los elementos se midieron en las series 2 y 3, en un elemento por bastidor (excepto en el bastidor 1 de la serie 2, debido a que se produjo la rotura del elemento que tenía el dispositivo de medida).

Con el mismo criterio en la definición del origen que el comentado en 6.3.1, la Figura 6.15 presenta un ejemplo de la respuesta de la deformación total del hormigón en la zona en compresión ε_{ct}^j vs. tiempo, donde j es el tiempo de carga en días, para el hormigón I-80/35-40-10. Además se destacan en detalle los parámetros ε_{ci} , ε_{cd}^{90} y ε_{ct}^{90} , que se definen del siguiente modo:

- ε_{ci} : deformación en compresión inicial producida durante la puesta en carga (medida tras estabilizar la carga durante 1 minuto) (‰).
- ε_{cd}^{90} : deformación en compresión diferida a tiempo j igual a 90 días (‰).
- ε_{ct}^{90} : deformación en compresión total a tiempo j igual a 90 días (‰), obtenida como:

$$\varepsilon_{ct}^{90} = \varepsilon_{ci} + \varepsilon_{cd}^{90}$$

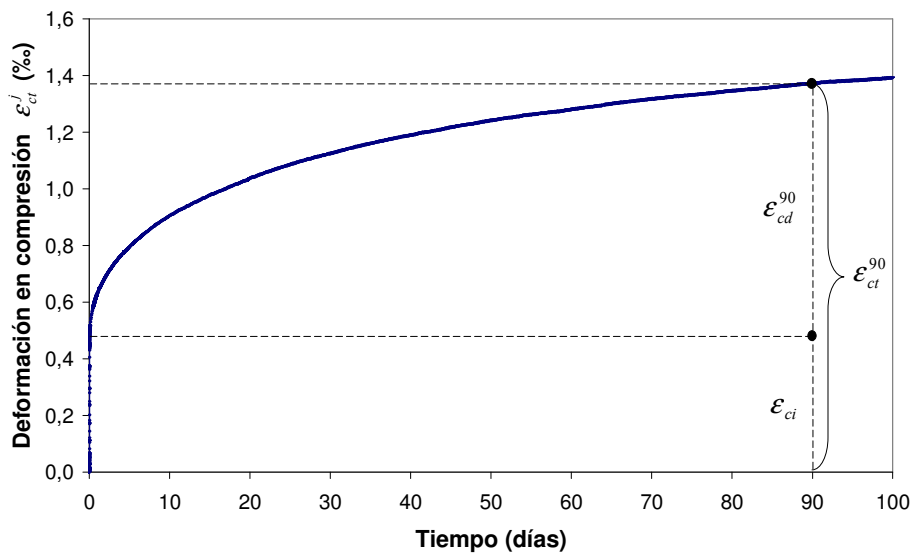


Figura 6.15. Deformación en compresión en ensayo de fluencia para I-80/35-40-10 (Serie 2, Bastidor 2, Probeta 3).

El resumen de las deformaciones de los elementos ensayados a fluencia se presenta, para cada serie (2 y 3), en las Tablas 6.15 y 6.16 respectivamente, en las que se indica, además de los parámetros ε_{ci} , ε_{cd}^{90} y ε_{ct}^{90} ya definidos, el tipo de hormigón, el bastidor, el índice de carga aplicada IF_a y la posición del elemento en la columna de probetas.

Tabla 6.15. Deformaciones en compresión de elementos ensayados a fluencia, Serie 2.

Serie	Hormigón	Bastidor	IF_a (%)	Posición	ϵ_{ci} (‰)	ϵ_{cd}^{90} (‰)	ϵ_{ct}^{90} (‰)
2	I-80/35-40-10	2	70.5	3	0.447	0.926	1.373
	I-80/35-40-10 (1.5 mm)	3	77.4		0.753	1.410	2.163
	I-80/35-70-10	4	80.9		0.672	0.851	1.523
	II-45/50-40-20	5	78.3		0.363	1.082	1.445

Tabla 6.16. Deformaciones en compresión de elementos ensayados a fluencia, Serie 3.

Serie	Hormigón	Bastidor	IF_a (%)	Posición	ϵ_{ci} (‰)	ϵ_{cd}^{90} (‰)	ϵ_{ct}^{90} (‰)
3	II-45/50-40-20	1	75.1	3	0.436	1.107	1.543
	II-80/50-40-20	2	82.2	3	0.469	1.268	1.733
	I-80/50-40-10	3	79.6	2	0.621	0.845	1.465
	II-2 ϕ 6-20	4	82.2	3	0.650	1.094	1.744
	I-2 ϕ 8-10	5	81.6	2	0.961	0.973	1.934

Los elementos de la serie 3 han tenido probetas prefisuradas de seguimiento sin carga, con el fin de conocer la magnitud de las deformaciones en compresión debidas a fenómenos ajenos a la carga (humedad y temperatura).

En la Figura 6.16 se muestran las deformaciones diferidas en la zona de compresión correspondientes a un elemento cargado (ϵ_{cd}^j) y a un elemento de acompañamiento (ϵ_{sh}^j) del mismo tipo de hormigón, donde puede observarse que las deformaciones ϵ_{sh}^j alcanzan un orden de magnitud del orden del 40% de ϵ_{cd}^j para el hormigón en cuestión.

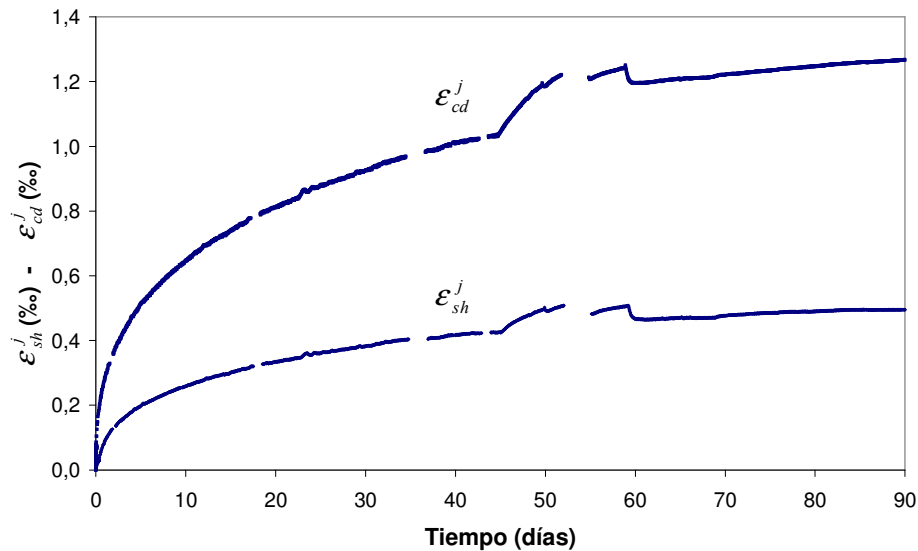


Figura 6.16. Deformaciones en compresión ϵ_{sh}^j y ϵ_{cd}^j , en Tipo II-80/50-40-20 (Serie 3, Bastidor 2, Probetas 3 y de seguimiento).

En la Tabla 6.17 se presentan los valores de las deformaciones ϵ_{sh}^j y ϵ_{cd}^j , para los tiempos j de 14, 30 y 90 días.

Tabla 6.17. Deformaciones en cara de compresión de elementos de seguimiento (sin carga) (ϵ_{sh}^j) y de deformaciones de fluencia diferida en compresión (ϵ_{cd}^j), Serie 3.

Hormigón	BA	ϵ_{sh}^{14}	ϵ_{sh}^{30}	ϵ_{sh}^{90}	ϵ_{cd}^{14}	ϵ_{cd}^{30}	ϵ_{cd}^{90}	$\frac{\epsilon_{sh}^j}{\epsilon_{cd}^j}$ (%)		
								$j = 14$	$j = 30$	$j = 90$
II-45/50-40-20	1	0.232	0.316	0.421	0.568	0.815	1.107	41	39	38
II-80/50-40-20	2	0.269	0.357	0.469	0.723	0.925	1.268	37	39	37
I-80/50-40-10	3	0.172	0.237	0.319	0.518	0.660	0.861	33	36	37
II-2 ϕ 6-20	4	0.260	0.367	0.529	0.633	0.811	1.133	41	45	47
I-2 ϕ 8-10	5	0.155	0.225	0.332	0.530	0.680	0.892	29	33	37

BA: número de bastidor en el que se realiza el ensayo.

Las deformaciones en los elementos de seguimiento son menos sensibles al tipo de armado que al tipo de hormigón.

6.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE FLUENCIA EN PROCESO DE CARGA

6.4.1. CARGA APLICADA DURANTE EL ENSAYO DE FLUENCIA

El ensayo de fluencia se inicia con el proceso de carga de los elementos a ensayar. Tal como se indicó en el apartado 6.3.1, el índice de carga nominal IF_n es un índice de referencia del nivel de carga teórico inicialmente previsto.

IF_n difícilmente se puede aplicar en su valor exacto a los elementos debido a que se trabaja en columna de 3 probetas por bastidor (al que se aplica un mismo valor de carga) y a que existe una importante dispersión en el comportamiento mecánico, como es típico de los elementos fabricados con SFRC en este tipo de ensayos. Por ello se define el índice de carga aplicada IF_a como:

$$IF_a = \frac{F_a}{F_w} \cdot 100\%$$

Donde:

F_a : carga realmente aplicada en la probeta (kN).

F_w : capacidad de carga en abertura de fisura w_p (kN).

En la Figura 6.17 se presentan los valores del índice de carga aplicada IF_a para los distintos valores de IF_n previamente establecidos en el programa experimental para todos los elementos. La línea inclinada indica la ubicación ideal de los puntos. Los valores que están por debajo de esta línea presentan

valores de IF_a mayores que IF_n . Las líneas verticales punteadas permiten clasificar los valores en tres rangos de IF_a .

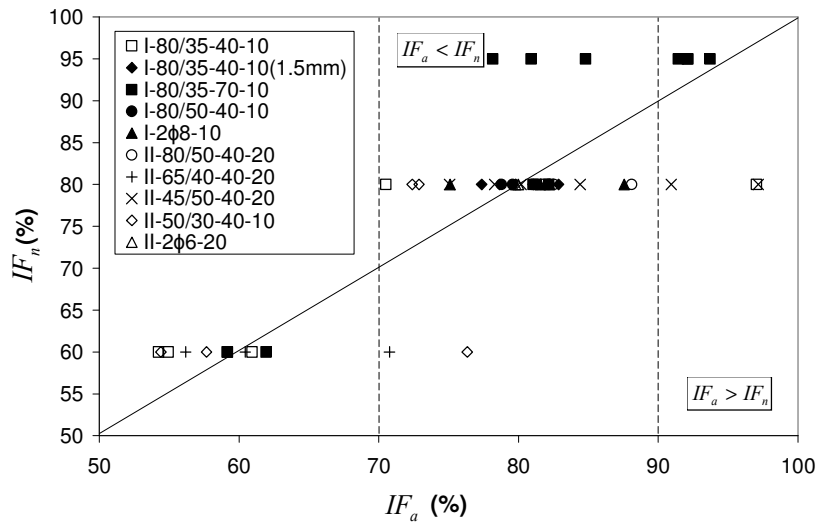


Figura 6.17. Relación entre valores de IF_n y IF_a .

En la Tabla 6.18 figuran los valores de IF_n definidos inicialmente y los valores del índice de carga aplicada IF_a resultantes. Se indican los valores máximo, mínimo y medio.

Tabla 6.18. Valores de IF_n y valores máximo-mínimo de los IF_a resultantes.

IF_n (%)	IF_a (%)	Valor medio de IF_a (%)
60	54.2 - 76.3	60.5
80	68.6 - 97.2	80.4
95	70.6 - 93.7	85.3

Excepto para el caso de IF_n del 95%, las medias presentan valores muy cercanos al índice de carga nominal. Para el caso de IF_n del 95% se produjeron roturas de algunos elementos, bien durante el proceso de carga, o bien pocos minutos después de finalizar dicho proceso, por lo que llegar al 95% presentó dificultades.

Por lo tanto, el análisis de resultados se va a realizar a partir de los valores de IF_a en lugar de IF_n , de acuerdo con el criterio de agrupación indicado en la Tabla 6.19.

Tabla 6.19. Rangos de IF_a establecidos para el análisis de resultados.

IF_a (%)	Criterio de agrupación (%)	Rango de valores aplicados de IF_a (%)
60	50 - 70	54.2 - 61.9
80	70 - 90	70.5 - 88.1
95	>90	90.9 - 97.2

El número de elementos ensayados en los rangos de IF_a de 60%, 80% y 95% son 10, 28 y 5 respectivamente, y el número de hormigones ensayados son 4, 9 y 3, respectivamente

6.4.2. ABERTURA DE FISURA INICIAL w_{ci}

Los valores de la abertura de fisura inicial w_{ci} se han presentado en las Tablas 6.12, 6.13 y 6.14, y se pueden ver gráficamente relacionados con IF_a para cada hormigón en la Figura 6.18 y relacionado con F_a en la Figura 6.19.

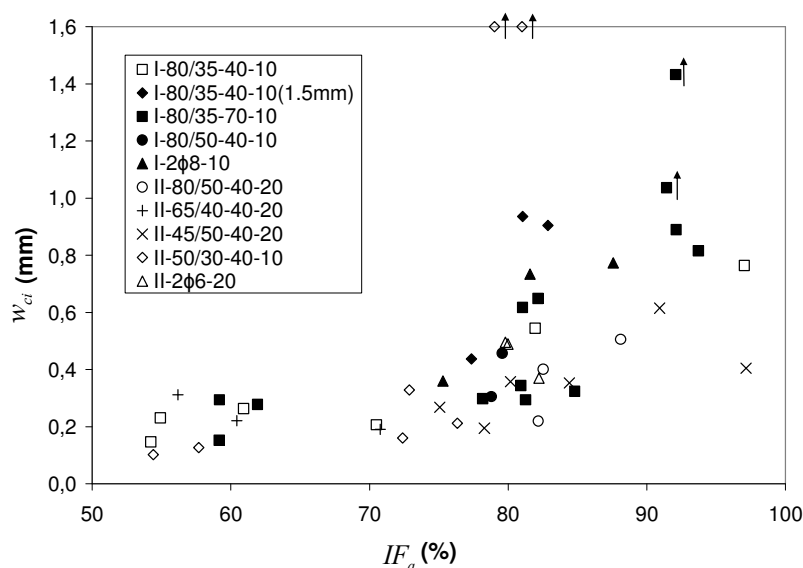


Figura 6.18. Valores de w_{ci} en función de IF_a .

En las Figuras 6.18 y 6.19 los elementos acompañados por \uparrow han llegado a la rotura; los que tienen valores de w_{ci} dentro del recuadro de la figura han roto unos minutos después del proceso de carga, mientras que los que están en el límite superior del recuadro de la figura (1.6 mm) han roto durante el proceso de carga.

Los valores máximos, mínimos y medios de w_{ci} para los diferentes rangos de IF_a , para todos los hormigones y ensayos, se presentan en la Tabla 6.20.

Tabla 6.20. Valores máximos y mínimos de w_{ci} en función de IF_a .

IF_a (%)	Valores de w_{ci} (mm)		
	Máximo	Mínimo	Medio
60	0.312	0.102	0.213
80 ($w_n=0.5$ mm)	0.773	0.161	0.387
80 ($w_n=1.5$ mm)	0.936	0.437	0.759
95	1.432	0.404	0.851

Se aprecia una tendencia a aumentar los valores de w_{ci} a medida que aumenta IF_a para cada tipo de hormigón, como es de esperar. Así mismo se detecta una tendencia a aumentar la dispersión de resultados a medida que aumenta IF_a .

Los valores máximos de w_{ci} (para elementos con abertura de prefisura nominal w_n de 0.5 mm) se presentan para los elementos con mayores resistencias residuales al nivel de prefisura definido (I-80/35-70-10 y I-2φ8-10), lo que implica mayores valores de carga aplicada F_a para niveles iguales de IF_a . El valor máximo para el IF_a del 60% corresponde a un elemento II-65/40-40-20 que presentó un valor de w_p de 0.992 mm. Descartando este caso, los valores máximos de w_{ci} para cualquiera de los valores de IF_a (60%, 80% (0.5 mm) y 95%) para los SFRC, corresponden a elementos I-80/35-70-10 con valores de 0.294 mm (elemento 5), 0.649 mm (elemento 8) y 1.432 mm (elemento 28, elemento que después ha sufrido rotura en bastidor).

Los valores mínimos de w_{ci} para valores de IF_a de 60%, 80% (0.5 mm) y 95% corresponden a elementos con hormigones Tipo II: II-50/30-40-10 para IF_a de 60% e IF_a de 80%, y II-45/50-40-20 para IF_a de 95%. Los valores mínimos de w_{ci} se presentan en los elementos con menores resistencias residuales al nivel de prefisura definido, y por tanto con menor valor de carga aplicada (Figura 6.19).

Para IF_a de 80% y abertura de prefisura nominal w_n de 1.5 mm, se trabajó únicamente con hormigón Tipo I-80/35-40-10, siendo los valores de w_{ci} mayores que los de los elementos con w_n de 0.5 mm.

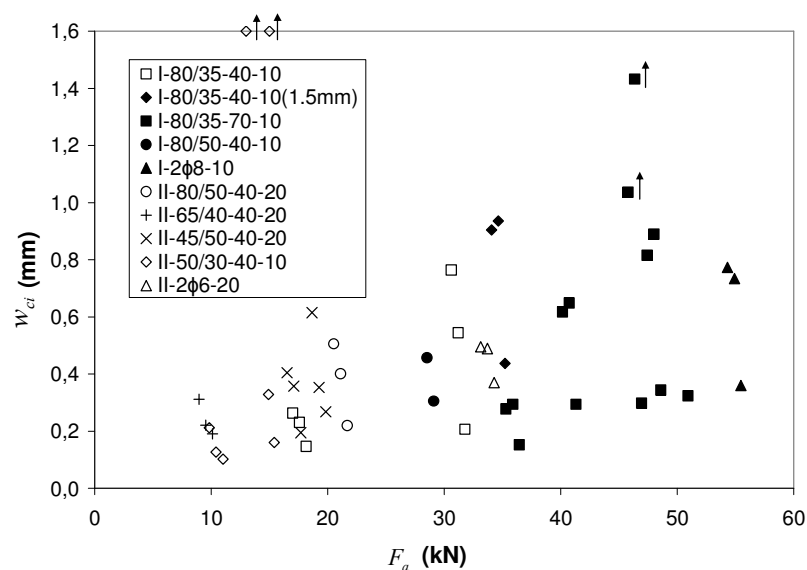


Figura 6.19. Valores de w_{ci} en función de F_a .

6.4.3. ABERTURA DE FISURA DIFERIDA w_{cd}^j

Los valores de abertura de fisura diferida después de 90 días de ensayo w_{cd}^{90} se muestran en las Tablas 6.12, 6.13 y 6.14, y se presentan gráficamente en las Figuras 6.20 y 6.21 relacionados con IF_a y F_a , respectivamente.

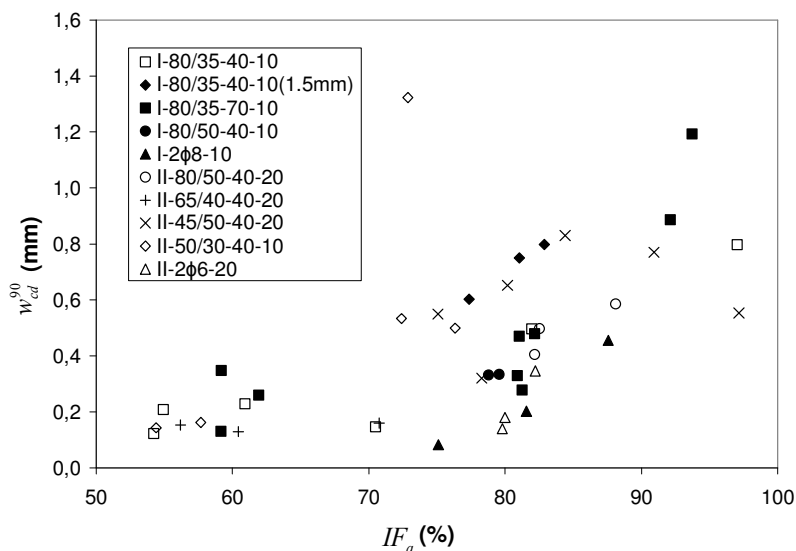


Figura 6.20. Valores de w_{cd}^{90} en función de IF_a .

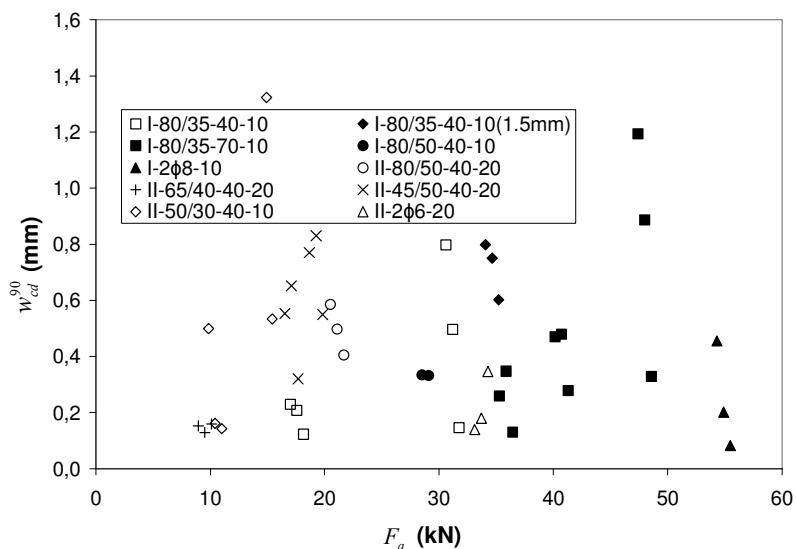


Figura 6.21. Valores de w_{cd}^{90} en función de F_a .

En la Figura 6.20 se aprecia la tendencia a tener mayores valores de w_{cd}^{90} para mayores valores de IF_a , tal como era de esperar.

La evolución de la abertura de fisura a lo largo del tiempo ha seguido, en la mayoría de los elementos ensayados, una respuesta como la ilustrada en la Figura 6.14, en la que se aprecia un aumento instantáneo de la abertura de

fisura correspondiente al proceso de carga seguido de un aumento lento y continuo, que se desarrolla a lo largo del tiempo con velocidad de deformación sensiblemente decreciente. Ahora bien, algunos elementos han presentado aumentos súbitos de w_{ct}^j como el presentado en la Figura 6.22, reflejando en la curva un fenómeno similar al correspondiente al instante de carga, seguido de una zona de fluencia rápida que se desacelera lentamente hasta recobrar la tendencia de velocidad de deformación anterior a la variación súbita de w_{ct}^j .

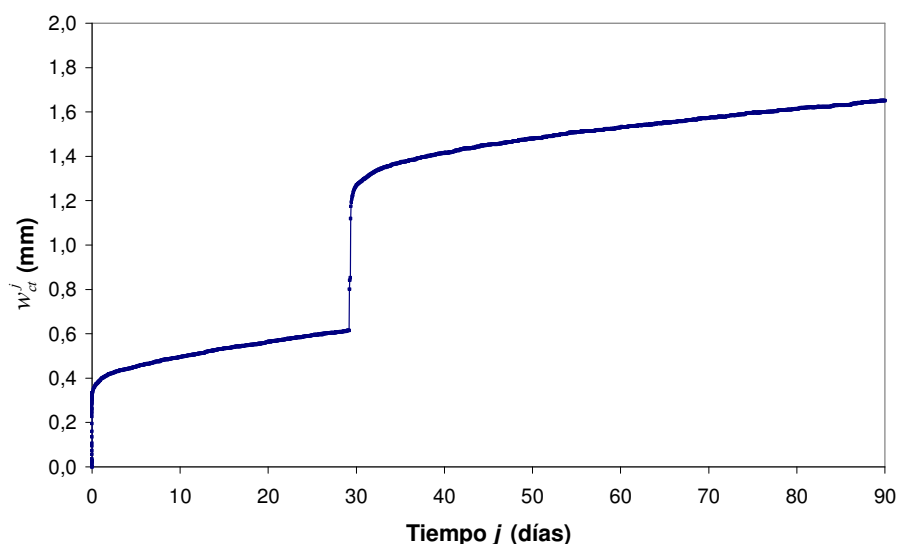


Figura 6.22. Abertura de fisura total en función del tiempo, con aumento súbito de la abertura de fisura en $j \approx 30$ días, en elemento II-50/30-40-10 (Serie 2, Bastidor 1, Probeta 2).

De los 48 elementos ensayados a fluencia, 15 presentaron aumentos súbitos de w_{ct}^j . En la Tabla 6.21 se presentan los elementos que sufrieron aumentos súbitos de abertura de fisura, indicando:

- Serie
- Hormigón
- Bastidor
- Posición
- Identificación del elemento (Id elem)
- IF_a : índice de carga aplicada (kN)
- t : tiempo en el que sucede el incremento súbito de abertura de fisura (días).
- Δw : magnitud del incremento (mm).
- w_{cd}^{90} : abertura de fisura diferida a los 90 días de ensayo (mm)
- Δ : magnitud del incremento en % sobre w_{cd}^{90} .

Los valores de Δw se sitúan entre 0.012 mm (I-80/35-70-10 y II-50/30-40-10) y 0.559 mm (II-50/30-40-10). Los elementos que han mostrado incrementos súbitos de abertura de fisura han correspondido a valores de IF_a entre 72.4% y 97.2%, y la magnitud de estos incrementos suponen desde un 2% hasta un 42% del valor de la abertura de fisura diferida a 90 días w_{cd}^{90} .

Los niveles importantes de abertura de fisura súbita, se presentan esencialmente en el elemento 21 (I-80/35-40-10) que ha sido sometido a un índice de carga del 97%, el elemento 20 (II-50/30-40-10) y los elementos II-45/50-40-20, con incrementos acumulados que llegan a alcanzar el 40%.

Para los elementos con fibras de esbeltez alta (80), los aumentos súbitos más importantes se presentaron para valores altos de carga ($IF_a > 90\%$). En las fibras con esbeltez 45 y 50, los incrementos súbitos se presentaron incluso para elementos con índices IF_a de 72.4% y 75.1%, respectivamente.

En la serie 2, II-50/30-40-10 presenta incrementos de abertura de fisura en dos elementos, siendo el incremento en el elemento 18 consecuencia del golpe producido por el gran incremento experimentado en el elemento 20. Este efecto se aprecia en los 3 elementos II-45/50-40-20, aunque en este caso puedan ser producto de situaciones accidentales ajenas al ensayo.

Para los elementos armados se presentan valores de Δw negativos, que corresponden a reducciones súbitas en los valores de la abertura de fisura. Estos son ocasionados por la aparición de fisuras fuera de la entalla, que producen una relajación de la fisura existente (Figura 6.23).

Tabla 6.21. Tabla resumen de elementos que han presentado aumentos súbitos de w_{ct}^j .

Serie	Hormigón	Bastidor	Posición	Id elem	IF_a (%)	t (días)	Δw (mm)	w_{cd}^{90} (mm)	Δ
1	I-80/35-70-10	3	1	7	81.0	42	0.012	0.470	3%
	II-50/30-40-10	5		13	76.3	3	0.012	0.499	2%
2	II-50/30-40-10	1	3	18	72.4	29	0.039	0.533	7%
			2	20	72.9	29	0.559	1.323	42%
	I-80/35-40-10	2	1	21	97.0	20	0.100	0.798	13%
	I-80/35-70-10	4	2	31	92.1	37	0.034	0.887	4%
	II-45/50-40-20	5	1	32	97.2	7	0.092	0.553	17%
						10	0.044		8%
						36	0.081		15%
			2	33	80.2	7	0.082	0.652	13%
						10	0.058		10%
						36	0.095		17%
	3	34	78.3		7	0.035	0.320	11%	
					10	0.019		3%	
36					0.033	6%			
3	II-45/50-40-20	1	2	36	84.4	24	0.173	0.830	21%
			3	37	75.1	24	0.039	0.550	7%
	II-2 ϕ 6-20	4	1	43	79.8	0	-0.035	0.140	-25%
			2	44	80.0	0	-0.018	0.180	-10%
	I-2 ϕ 8-10	5	3	48	75.1	1	-0.019	0.082	-23%
						2	-0.017		-21%

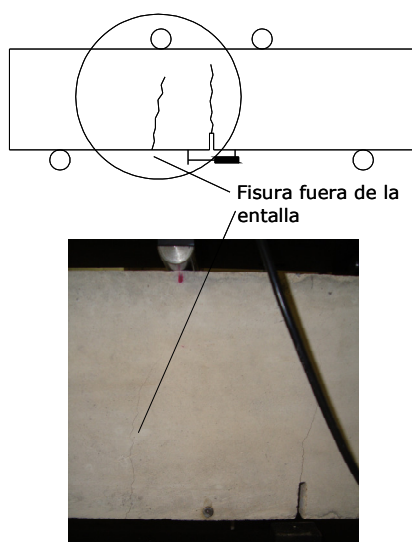


Figura 6.23. Elemento armado con fisura fuera de la entalla.

En todos los casos los incrementos súbitos se presentan desde el día 1 de carga hasta el día 42, lo que indica que en los elementos en que esto sucede se presenta de forma indiferente a lo largo del ensayo hasta alrededor de los 50 días, para nuestro caso.

Los valores máximos, mínimos y medios de w_{cd}^{90} para los diferentes rangos de IF_a , para todos los hormigones y ensayos, se presentan en la Tabla 6.22.

Tabla 6.22. Valores máximos y mínimos de w_{cd}^{90} en función de IF_a .

IF_a (%)	Valores de w_{cd}^{90} (mm)		
	Máximo	Mínimo	Medio
60	0.348	0.123	0.188
80 ($w_n=0.5$ mm)	1.323	0.082	0.425
80 ($w_n=1.5$ mm)	0.798	0.603	0.717
95	1.193	0.553	0.840

Los valores máximos de w_{cd}^{90} (en elementos con abertura de prefisura nominal w_n de 0.5 mm) para IF_a de 60%, 80% y 95% corresponden a elementos de hormigón I-80/35-70-10 (elemento 5), II-50/30-40-10 (elemento 20), el cual ha presentado aumento súbito del valor de abertura de fisura el día 29 de ensayo) y I-80/35-70-10 (elemento 30), respectivamente.

Los valores mínimos de w_{cd}^{90} (en elementos con abertura de prefisura nominal w_n de 0.5 mm) para IF_a de 60%, 80% y 95% corresponden a elementos con hormigones I-80/35-40-10 (elemento 3), I-2 ϕ 8-10 (elemento 48), el cual ha presentado reducción en los valores de abertura de fisura debido a la aparición de fisuras fuera de la entalla) y II-45/50-40-20 (elemento 32, el cual ha presentado aumento súbito del valor de abertura de fisura), respectivamente.

6.4.4. COEFICIENTES DE FLUENCIA PARA LA ABERTURA DE FISURA φ_{wj}

El coeficiente de fluencia puede definirse como el cociente entre la abertura de fisura diferida y la abertura de fisura del elemento tras la puesta en carga para el ensayo de fluencia (abertura de fisura inicial). Teniendo en cuenta que el procedimiento de ensayo incluye un proceso de prefisuración previo a la puesta en carga para el ensayo de fluencia, se ha planteado el análisis del coeficiente de fluencia considerando dos posibles orígenes de coordenadas para la definición de la abertura de fisura inicial.

Así, se definen dos coeficientes de fluencia, uno considerando como referencia la abertura de fisura inicial desde el inicio del ensayo (es decir, remontándose al proceso de prefisuración) (φ_{wj}^o) y otro (φ_{wj}^c) considerando como referencia la abertura de fisura inicial originada por el efecto de la puesta en carga en el ensayo de fluencia.

El coeficiente de fluencia a origen a tiempo j φ_{wj}^o , puede definirse como:

$$\varphi_{wj}^o = \frac{w_{cd}^j}{w_{ci}^o}$$

Donde:

w_{ci}^o : abertura de fisura inicial a origen (mm), que se obtiene:

$$w_{ci}^o = w_{pr} + w_{ci}$$

w_{pr} : abertura de fisura residual en el proceso de prefisuración (mm).

w_{ci} : abertura de fisura inicial (mm) en la etapa de carga del ensayo de fluencia.

w_{cd}^j : abertura de fisura diferida a tiempo j (mm).

El coeficiente de fluencia a tiempo j φ_{wj}^c considerando exclusivamente la abertura de fisura desarrollada en la etapa de carga, puede definirse como:

$$\varphi_{wj}^c = \frac{w_{cd}^j}{w_{ci}}$$

Donde:

w_{ci} : abertura de fisura inicial (mm) en la etapa de carga del ensayo de fluencia.

w_{cd}^j : abertura de fisura diferida a tiempo j (mm).

Se han calculado los coeficientes de fluencia para valores de j igual a 14, 30 y 90 días, que se presentan para todos los ensayos realizados en las Tablas 6.23 y 6.24.

Tabla 6.23. Valores de φ_{wj}^o y φ_{wj}^c para hormigones Tipo I, en orden ascendente según IF_a .

Hormigón	Id elem	IF_a (%)	φ_{w14}^o	φ_{w30}^o	φ_{w90}^o	φ_{w14}^c	φ_{w30}^c	φ_{w90}^c
I-80/35-40-10	3	54.2	0.197	0.224	0.268	0.617	0.702	0.840
	2	54.9	0.289	0.326	0.394	0.662	0.746	0.902
	1	60.9	0.297	0.340	0.433	0.598	0.684	0.870
	23	70.5	0.193	0.226	0.297	0.459	0.537	0.706
	26	77.4	0.268	0.306	0.394	0.936	1.071	1.379
	25	81.0	0.270	0.307	0.374	0.579	0.658	0.801
	22	81.9	0.435	0.486	0.594	0.668	0.746	0.911
	24	82.9	0.270	0.315	0.395	0.602	0.703	0.882
	21	97.0	0.444	0.657	0.771	0.601	0.890	1.043
I-80/35-70-10	6	59.2	0.208	0.242	0.306	0.582	0.676	0.856
	5	59.2	0.455	0.503	0.638	0.844	0.932	1.183
	4	61.9	0.363	0.424	0.506	0.668	0.782	0.933
	29	80.9	0.318	0.394	0.574	0.530	0.656	0.956
	7	81.0	0.415	0.451	0.540	0.585	0.636	0.762
	9	81.3	0.411	0.452	0.516	0.754	0.830	0.947
	8	82.2	0.441	0.477	0.531	0.612	0.664	0.738
	31	92.1	0.548	0.606	0.783	0.697	0.771	0.997
	30	93.7	0.780	0.881	1.113	1.025	1.157	1.463
I-80/50-40-10	42	78.8	0.366	0.409	0.568	0.699	0.781	1.085
	41	79.6	0.309	0.360	0.472	0.478	0.557	0.731
I-2 ϕ 8-10	48	75.1	0.083	0.110	0.178	0.107	0.140	0.228
	47	81.6	-	-	-	0.091	0.128	0.275
	46	87.6	0.314	0.374	0.524	0.352	0.420	0.589

- no se tienen datos de w_{pr} (Ver Tabla 6.7).

Tabla 6.24. Valores de φ_{wj}^o y φ_{wj}^c para hormigones Tipo II, en orden ascendente según IF_a .

Hormigón	Id elem	IF_a (%)	φ_{w14}^o	φ_{w30}^o	φ_{w90}^o	φ_{w14}^c	φ_{w30}^c	φ_{w90}^c
II-80/50-40-20	40	82.2	0.521	0.615	0.796	1.208	1.427	1.846
	39	82.5	0.480	0.561	0.711	0.837	0.978	1.240
	38	88.1	0.484	0.577	0.770	0.727	0.866	1.157
II-65/40-40-20	10	56.2	0.081	0.097	0.137	0.291	0.345	0.489
	11	60.4	0.117	0.143	0.199	0.345	0.422	0.585
	12	70.8	0.202	0.248	0.307	0.551	0.676	0.836
II-45/50-40-20	37	75.1	0.441	0.672	0.900	1.004	1.529	2.048
	34	78.3	0.393	0.448	0.608	1.062	1.211	1.643
	33	80.2	0.592	0.656	0.914	1.182	1.309	1.825
	36	84.4	0.465	0.901	1.164	0.940	1.824	2.354
	35	90.9	0.500	0.595	0.793	0.791	0.940	1.254
	32	97.2	0.513	0.543	0.728	0.965	1.022	1.369
II-50/30-40-10	15	54.4	0.168	0.214	0.319	0.739	0.940	1.401
	14	57.7	0.185	0.221	0.318	0.742	0.889	1.277
	18	72.4	0.328	0.544	1.016	1.070	1.775	3.315
	20	72.9	0.276	1.311	1.851	0.600	2.850	4.023
	13	76.3	0.555	0.634	0.814	1.611	1.840	2.361
II-2 ϕ 6-20	43	79.8	0.113	0.156	0.222	0.143	0.198	0.282
	44	80.0	0.181	0.210	0.279	0.240	0.227	0.368
	45	82.2	0.382	0.460	0.641	0.557	0.672	0.936

La Tabla 6.25 presenta los valores máximos y mínimos para los coeficientes de fluencia.

Tabla 6.25. Valores máximos y mínimos de ϕ_{wj}^o y ϕ_{wj}^c .

Valor	ϕ_{w14}^o	ϕ_{w30}^o	ϕ_{w90}^o	ϕ_{w14}^c	ϕ_{w30}^c	ϕ_{w90}^c
Máximo	0.780	1.311	1.851	1.611	2.850	4.023
	I-80/35-70-10	II-50-30-40-10		II-50-30-40-10		
Mínimo	0.081	0.097	0.137	0.091	0.128	0.489
	II-65/40-40-20			I-2φ8-10		

Los valores máximos de los coeficientes de fluencia se presentan para un elemento I-80/35-70-10 (elemento 30) con un índice de carga aplicada IF_a del 97%; y para elementos II-50/30-40-10, los cuales han presentado aumentos súbitos de la abertura de fisura en los periodos correspondientes.

Los valores mínimos de coeficientes de fluencia referenciados a origen ϕ_{wj}^o se presentan para elementos II-65/40-40-20, elementos con bajos valores de carga, y bajos valores de abertura de fisura diferida w_{cd}^j . Para el coeficiente de fluencia debido exclusivamente a la etapa de carga ϕ_{wj}^c , los valores mínimos se presentan para elementos armados que han presentado recuperaciones súbitas de los valores de las aberturas de fisura (Tabla 6.21).

6.4.4.1. Análisis de conjunto

En las Figuras 6.24, 6.25 y 6.26 se presentan los valores de ϕ_{w14}^c , ϕ_{w30}^c y ϕ_{w90}^c para los distintos valores de IF_a , respectivamente. Los valores más altos se han producido en el rango de IF_a de 80%, en elementos II-50/30-40-10 con aumentos súbitos de abertura de fisura.

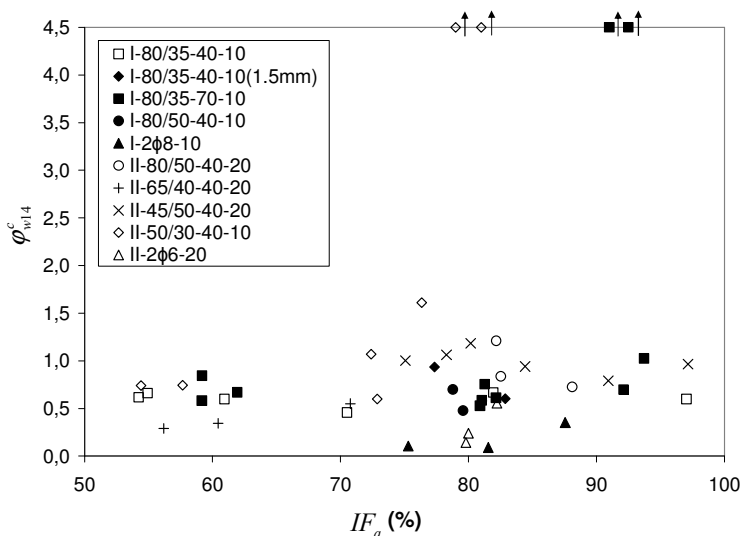


Figura 6.24. ϕ_{w14}^c en función de IF_a .

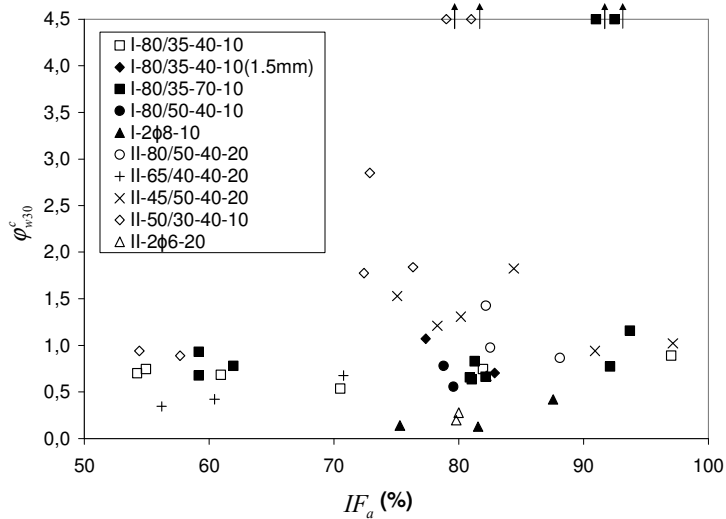


Figura 6.25. φ_{w30}^c en función de IF_a .

Si bien ya se detectan diferencias entre hormigones a 14 días, éstas se incrementan de forma sustancial a 30 días diferenciándose ya los casos que finalmente serán problemáticos, y que se destacan a los 90 días. Parece evidente que un plazo mínimo de un mes es necesario para detectar tendencias, y que en 3 meses éstas quedan claramente definidas. Sin embargo, periodos más largos pueden ser necesarios por lo menos para corroborar que esta tendencia continúa y llega a la estabilización, y no se incrementa indefinidamente hasta llevar el elemento a la rotura.

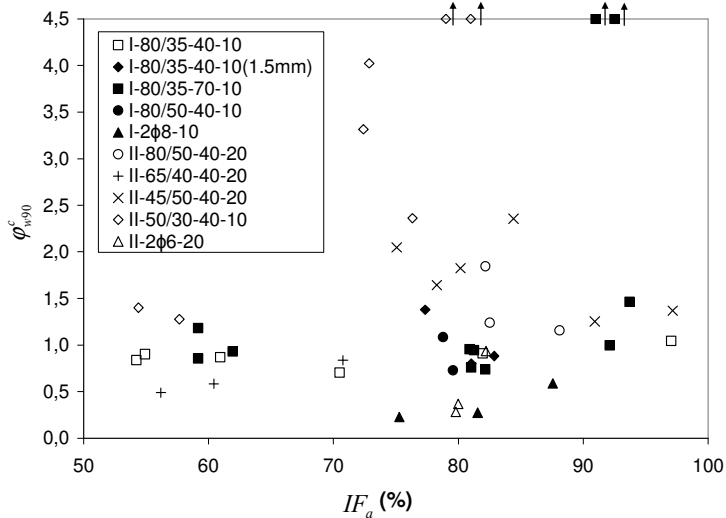


Figura 6.26. φ_{w90}^c en función de IF_a .

En la Figura 6.26 puede observarse que los elementos armados presentan los menores valores de φ_{w90}^c ; esto es debido a que como ya se comentó en el apartado 6.4.3, las fisuras ubicadas fuera de la entalla generan un falso panorama (elementos 47 y 48 para I-2 ϕ 8-10 y 43 y 44 para II-2 ϕ 6-20, elementos en la zona inferior). La posición de los elementos que no muestran

fisuras fuera de la zona de medida (entalla) (46 para I-2φ8-10 y 45 para II-2φ6-20), presentan valores similares a los SFRC con idéntico IF_a .

Para índices de carga aplicada $IF_a \approx 60\%$, los coeficientes de fluencia φ_{w90}^c (Figura 6.26) son bajos y poco variables; φ_{w90}^c no llega a 1.3, salvo para II-50/30-40-10 que lo sobrepasa ligeramente. En estos casos, los valores de φ_{w90}^c no toman valores muy bajos, porque el valor de las deformaciones iniciales es pequeño y las deformaciones diferidas son poco importantes. El tipo de fibra y hormigón no parece influir de forma clara.

Así mismo, en la Figura 6.26 puede observarse que la mayoría de hormigones presentan una tendencia a mantener valores de φ_{w90}^c por debajo de 1.5 (elementos II-2φ6-20, I-2φ8-10, I-80/35-40-10 y I-80/35-70-10), para cualquier nivel de carga, y otros para niveles no superiores al 80% (elementos II-65/40-40-20, I-80/35-40-10 (1.5 mm) y I-80/50-40-10). En cualquier caso, los valores mínimos siguen la tendencia comentada en el párrafo anterior.

Solo los hormigones II-50/30-40-10 y II-45/50-40-20 muestran valores muy elevados de coeficiente de fluencia, incluso para niveles de carga bajos. Los elementos II-80/50-40-20 han mostrado una tendencia poco definida.

En la Figura 6.27 se muestran los valores de φ_{w90}^c en función de la carga aplicada F_a . Analizando en conjunto las Figuras 6.26 y 6.27 se aprecia una influencia combinada $IF_a - F_a$ sobre los coeficientes de fluencia obtenidos. Parece que φ_{w90}^c aumenta con F_a aunque con pendientes muy distintas según tipos de hormigón y fibras. Los elementos II-50/30-40-10 incrementan la fluencia al aumentar tanto IF_a como F_a . En este caso para un incremento de IF_a grande (de 55% a 75%) la carga aplicada F_a presenta un aumento pequeño. Por otro lado, todos los hormigones II-45/50-40-20 que han sido ensayados fueron sometidos a un valor de F_a similar, aunque el valor de IF_a varía mucho. En este caso parecería que φ_{w90}^c disminuye con IF_a . Probablemente es una falsa apreciación debida a la dispersión de resultados inherente a la determinación de las propiedades de estos hormigones (ver Tabla 6.5) y que origina que los elementos con $IF_a \approx 95\%$ arrojen valores que se corresponden con los de un IF_a de 80%.

La dispersión de resultados es grande en general, pero aumenta mucho en los casos en que la fluencia es mayor; esto se aprecia nuevamente en la Figura 6.26 para los elementos II-50/30-40-10 y en la Figura 6.27 para los elementos II-45/50-40-20, II-50/30-40-10 y II-80/50-40-20.

La comparación de tipos de fibras iguales en distintos tipos de hormigón muestra que el hormigón Tipo II (de menor resistencia) registra mayor fluencia y mayor dispersión de resultados, aunque la carga aplicada en II-80/50-40-20

es menor que en I-80/50-40-10 (Figura 6.27). En estos casos F_a es muy parecido.

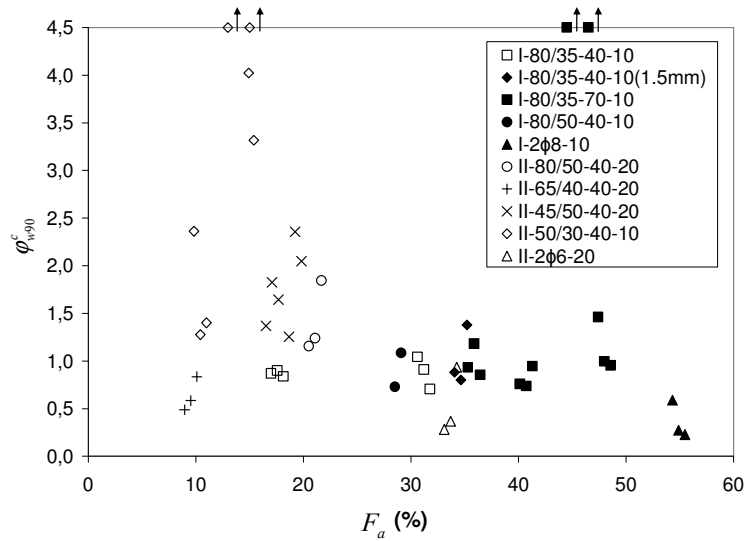


Figura 6.27. ϕ_{w90}^c en función de F_a .

Estas observaciones resultan coherentes con lo reflejado en la Figura 6.20 respecto a la evolución de las deformaciones diferidas w_{cd}^{90} en función de IF_a , verificándose la tendencia a aumentar w_{cd}^{90} con IF_a , especialmente en los casos ya comentados de los elementos II-45/50-40-20 y II-50/30-40-10; pero también se detecta una tendencia a alcanzar valores altos en I-80/35-40-10 con valores de prefisura de 1.5 mm. Evidentemente, el valor de w_{cd}^{90} es también muy alto en los casos con $IF_a \approx 95\%$ aunque el valor de ϕ_{w90}^c toma valores bajos ya que toma como referencia una deformación inicial también elevada.

La importancia relativa de la carga aplicada F_a y tipo de hormigón se aprecia asimismo en la Figura 6.21, quedando en evidencia que los hormigones Tipo I permiten cargas superiores y a pesar de ello las deformaciones diferidas son del mismo orden, por lo que los valores de coeficiente de fluencia para un mismo IF_a se ven compensados (Figuras 6.26 y 6.27).

Si el coeficiente de fluencia se analiza sobre la abertura de fisura inicial a origen desde el inicio del ensayo (Figura 6.28), los valores de ϕ_{wj}^o (véase apartado 6.4.4) son sensiblemente menores a los anteriormente comentados, en especial para los elementos poco resistentes (Figura 6.28 en comparación con la Figura 6.26).

En la Figura 6.28 se ha incluido el límite de referencia 1, que se obtiene al estimar la relación λ (flecha diferida/flecha instantánea) según las propuestas de la instrucción EHE y el código ACI, en los que para 90 días se propone un valor de $\lambda=1$; con este criterio, en la mayoría de ensayos realizados no se alcanza el valor de 1.

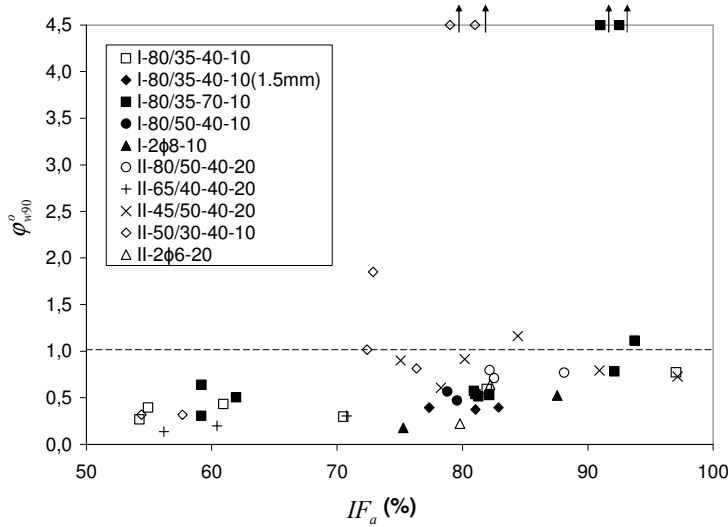


Figura 6.28. ϕ_{w90}^o en función de IF_a .

En consecuencia, salvo en algunos casos de nivel de carga muy alta (elementos II-45/50-40-20 y II-50/30-40-10), presentan valores asumibles y comparables con los propuestos por el modelo EHE-ACI.

6.4.4.2. Análisis de los coeficientes de fluencia según el tipo de hormigón

En adelante se analizan los resultados obtenidos en los elementos de cada uno de los hormigones por separado. Se presentan gráficamente las relaciones entre los coeficientes de fluencia ϕ_{wj}^o y los índices de carga aplicada IF_a , así como las relaciones entre los coeficientes de fluencia ϕ_{wj}^o y el tiempo de ensayo en etapa de carga. En este último caso se contrastan estos valores con el modelo EHE-ACI para la estimación de flecha diferida a partir de la flecha instantánea, adoptándose λ igual a 0.5, 0.7 y 1 para los casos de 14, 28 y 90 días, respectivamente. Asimismo, se presentan tablas resumen con los valores de coeficiente de fluencia y el recorrido relativo registrado entre los distintos elementos.

6.4.4.2.1. Elementos I-80/35-40-10

En la Figura 6.29 se presentan los valores de ϕ_{wj}^o en función de IF_a , para los ensayos realizados con elementos I-80/35-40-10 (9 elementos con IF_a entre 54.2% y 97%).

Se observa una tendencia a presentar mayores valores de coeficiente de fluencia ϕ_{wj}^o para mayores valores de IF_a . También se observan mayores diferencias entre los distintos ϕ_{wj}^o a medida que se incrementa IF_a .

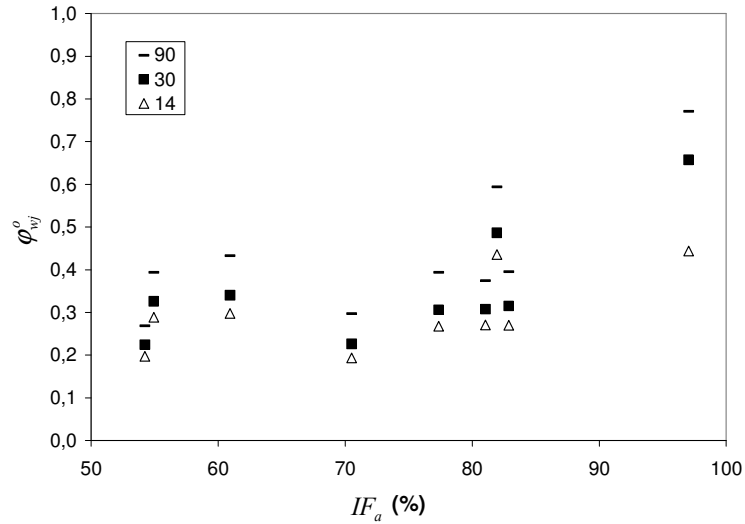


Figura 6.29. $\phi_{w_j}^o$ vs. IF_a para elementos I-80/35-40-10.

La Figura 6.30 y la Tabla 6.26 presentan los resultados de los elementos con IF_a de 60% (elementos 1, 2 y 3).

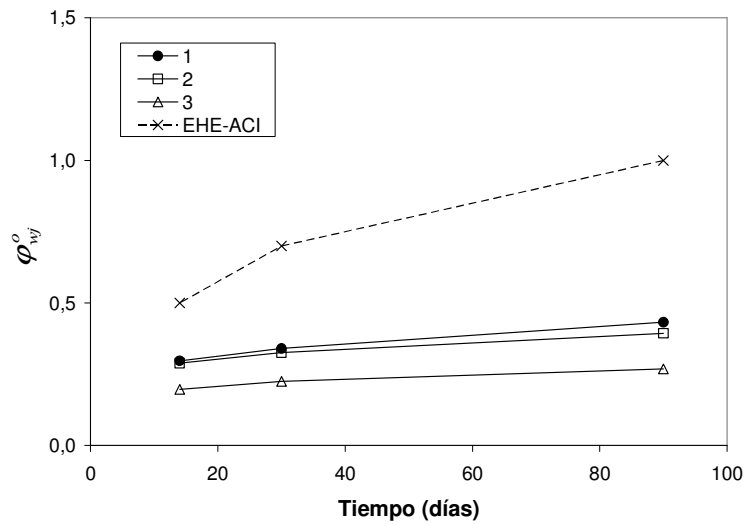


Figura 6.30. $\phi_{w_j}^o$ vs. tiempo para elementos I-80/35-40-10 con IF_a de 60%.

Tabla 6.26. $\phi_{w_j}^o$ para elementos I-80/35-40-10.

IF_a (%)	I-80/35-40-10	Media	Recorrido relativo
60	$\phi_{w_{14}}^o$ (mm)	0.261	0.38
	$\phi_{w_{30}}^o$ (mm)	0.297	0.39
	$\phi_{w_{90}}^o$ (mm)	0.365	0.45

La Figura 6.31 y la Tabla 6.27 muestran los resultados de los elementos con IF_a de 80% (elementos 22 y 23 con, w_n de 0.5 mm, y elementos 24, 25 y 26, con w_n de 1.5 mm).

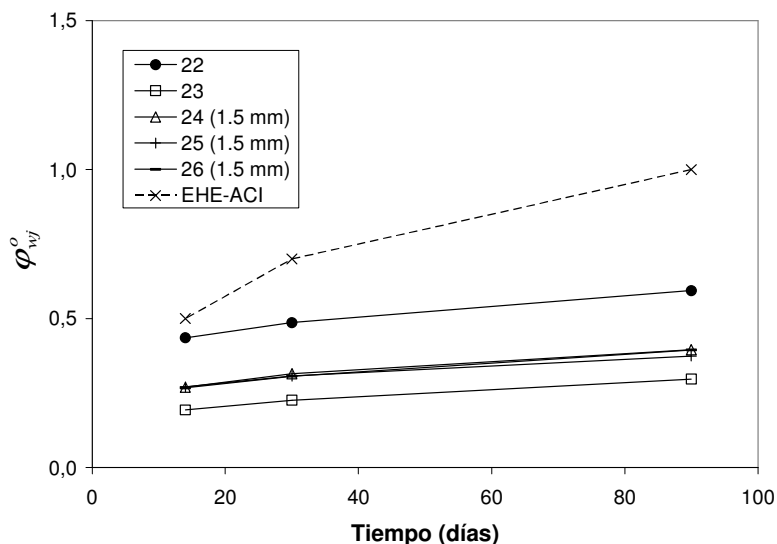


Figura 6.31. ϕ_{wj}^o vs. tiempo para elementos I-80/35-40-10 con IF_a de 80%.

Tabla 6.27. ϕ_{wj}^o para elementos I-80/35-40-10.

IF_a (%)	I-80/35-40-10	Media	Recorrido relativo
80	ϕ_{w14}^o (mm)	0.314	0.77
	ϕ_{w30}^o (mm)	0.356	0.73
	ϕ_{w90}^o (mm)	0.446	0.67
	ϕ_{w14}^o (1.5 mm)	0.269	0.01
	ϕ_{w30}^o (1.5 mm)	0.310	0.03
	ϕ_{w90}^o (1.5 mm)	0.388	0.05

La Figura 6.32 muestra el elemento con IF_a de 95% (elemento 21).

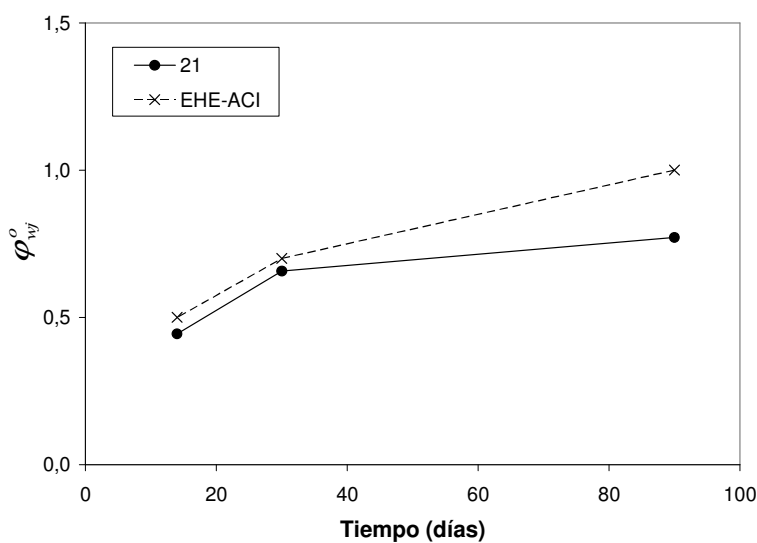


Figura 6.32. ϕ_{wj}^o vs. tiempo para elementos I-80/35-40-10 con IF_a de 95%.

Finalmente, se presentan los resultados de φ_{wj}^o a lo largo del tiempo para el conjunto de rangos de IF_a . Las curvas presentadas en la Figura 6.33 corresponden a las medias de la totalidad de ensayos realizados para el I-80/35-40-10, organizados en rangos de IF_a 60%, 80% (0.5 mm), 80% (1.5 mm) y 95%; el número de elementos ensayados para cada situación son 3, 2, 3 y 1, respectivamente.

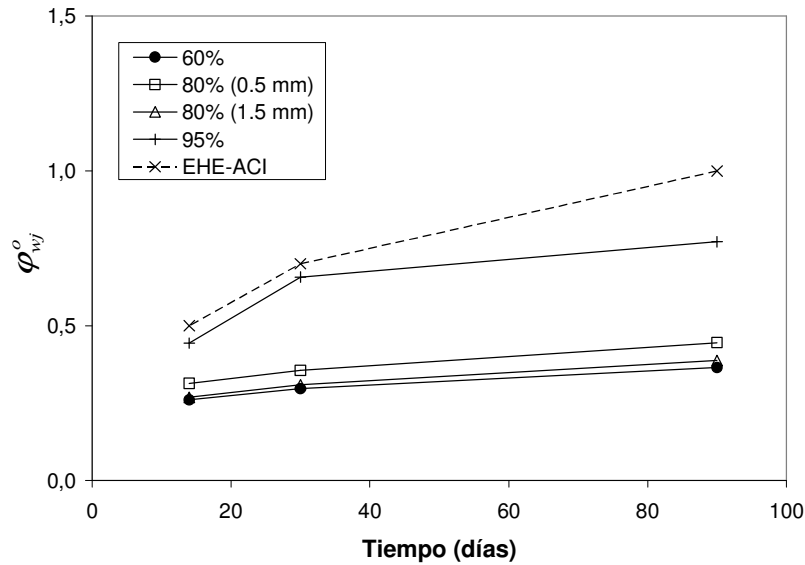


Figura 6.33. φ_{wj}^o vs. tiempo para elementos I-80/35-40-10.

Se puede observar que para todas las edades, todos los valores obtenidos están claramente por debajo de los coeficientes de fluencia propuestos por EHE-ACI, presentando además tendencias más estables. Solo para valores de IF_a del 95% los valores obtenidos se aproximan a los límites normativos.

6.4.4.2.2. Elementos I-80/35-70-10

En la Figura 6.34 se presentan los resultados de los φ_{wj}^o de los elementos I-80/35-70-10 para todos los valores de IF_a . Se han ensayado 9 elementos, con valores de IF_a entre 59.2% y 93.7%.

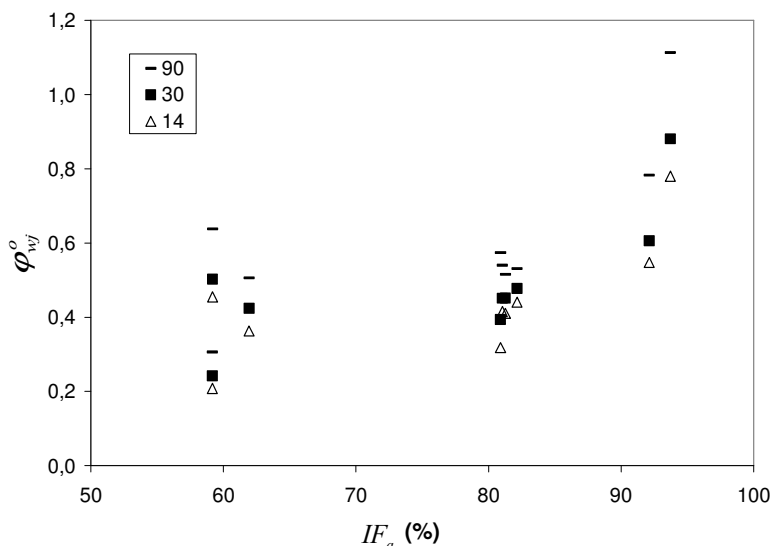


Figura 6.34. ϕ_{wj}^o vs. IF_a para elementos I-80/35-70-10.

Se aprecia una clara tendencia a presentar mayores valores de ϕ_{wj}^o para mayores valores de IF_a (Figura 6.34).

La Figura 6.35 y la Tabla 6.28 muestran los resultados de los valores de ϕ_{wj}^o de los elementos con IF_a de 60% (elementos 4, 5 y 6).

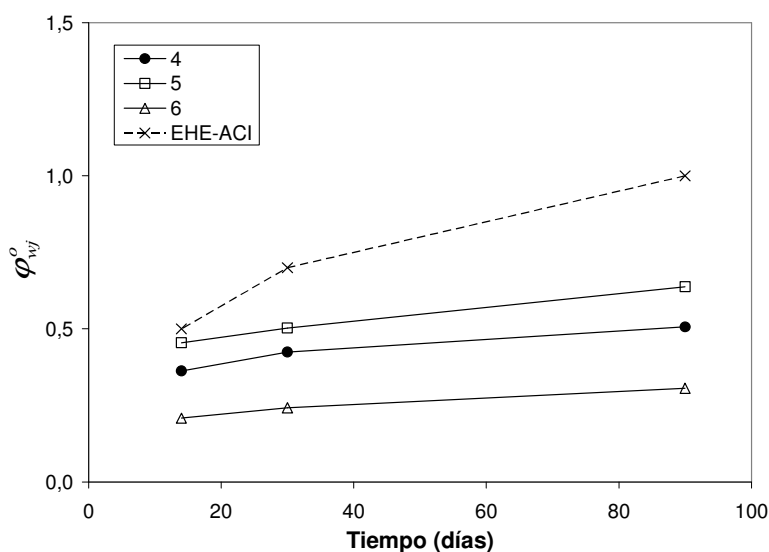


Figura 6.35. ϕ_{wj}^o vs. tiempo para elementos I-80/35-70-10 con IF_a del 60%.

Tabla 6.28. ϕ_{wj}^o para elementos I-80/35-70-10 para IF_a de 60%.

IF_a (%)	I-80/35-70-10	Media	Recorrido relativo
60	ϕ_{w14}^o (mm)	0.342	0.72
	ϕ_{w30}^o (mm)	0.390	0.70
	ϕ_{w90}^o (mm)	0.484	0.67

La Figura 6.36 y la Tabla 6.29 presentan los resultados de los elementos con IF_a de 80% (elementos 7, 8, 9 y 29).

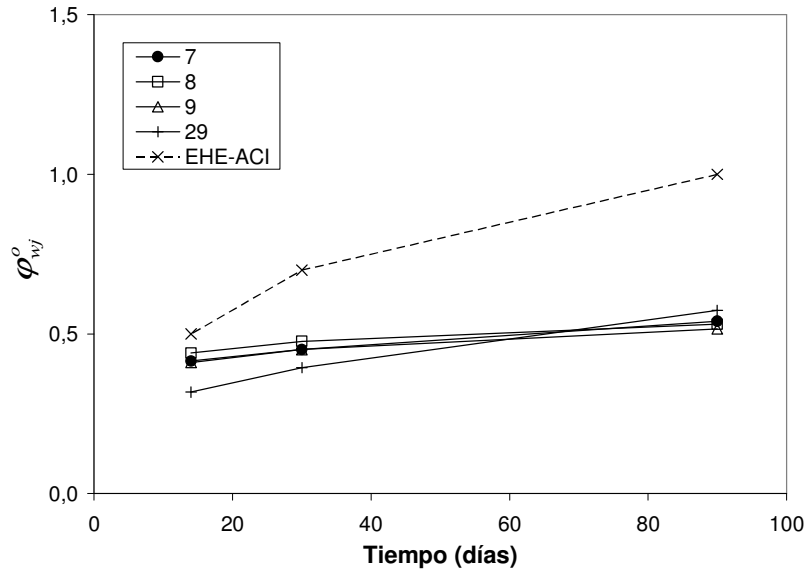


Figura 6.36. φ_{wj}^o vs. tiempo para elementos I-80/35-70-10 con IF_a de 80%.

Tabla 6.29. φ_{wj}^o para elementos I-80/35-70-10.

IF_a (%)	I-80/35-70-10	Media	Recorrido relativo
80	φ_{w14}^o (mm)	0.396	0.31
	φ_{w30}^o (mm)	0.444	0.19
	φ_{w90}^o (mm)	0.540	0.11

La Figura 6.37 y la Tabla 6.30 presentan los resultados de los elementos con IF_a de 95% (elementos 30 y 31).

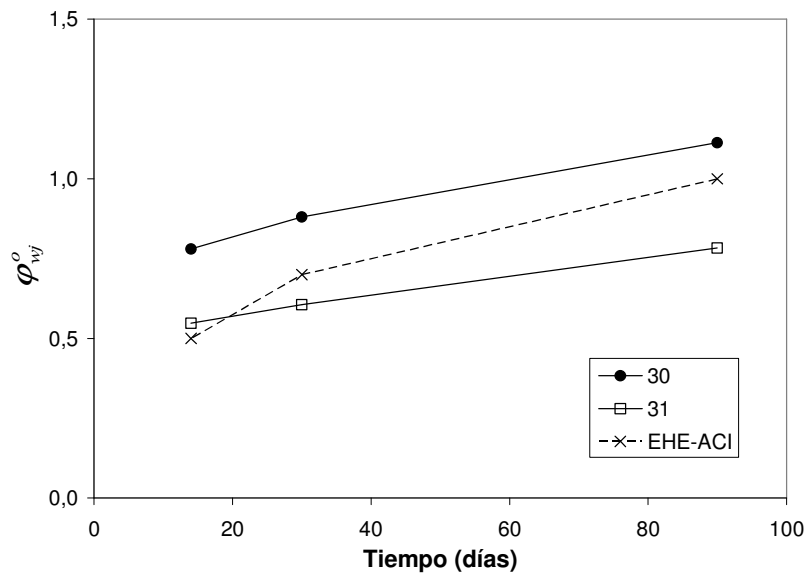


Figura 6.37. φ_{wj}^o vs. tiempo para elementos I-80/35-70-10 con IF_a de 95%.

Tabla 6.30. ϕ_{wj}^o para elementos I-80/35-70-10.

IF_a (%)	I-80/35-70-10	Media	Recorrido relativo
95	ϕ_{w14}^o (mm)	0.664	0.35
	ϕ_{w30}^o (mm)	0.743	0.37
	ϕ_{w90}^o (mm)	0.948	0.35

Finalmente, se presentan y analizan los resultados de ϕ_{wj}^o a lo largo del tiempo para el conjunto de rangos de IF_a . Las curvas presentadas en la Figura 6.38 corresponden a las medias de la totalidad de ensayos realizados para el I-80/35-70-10, organizados en rangos de IF_a 60%, 80% y 95%; el número de elementos ensayados para cada situación son 3, 4, y 2, respectivamente. Para el caso de IF_a de 95% se registran valores de ϕ_{wj}^o que superan los establecidos por el modelo EHE-ACI, pero con menor pendiente (mayor tendencia a estabilización); mientras que para IF_a de 60% y de 80%, que presentan tendencias y valores similares, éstos son claramente menores que los del modelo de referencia.

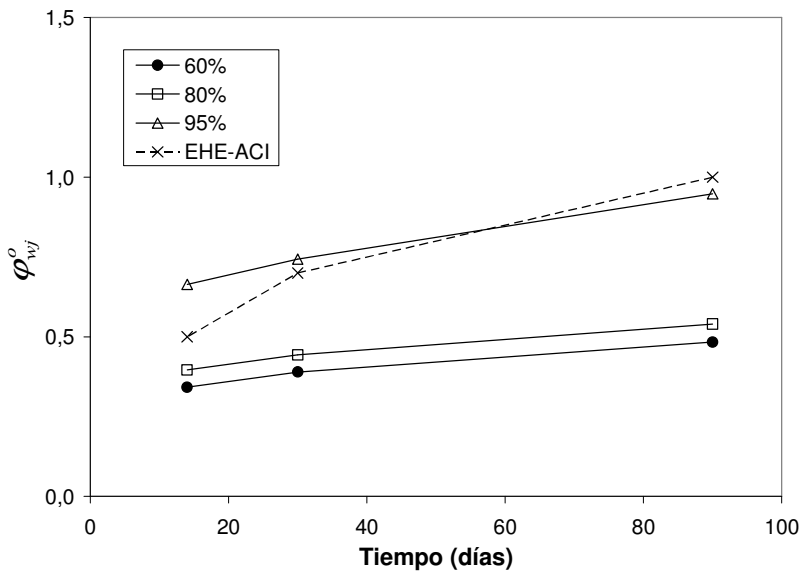


Figura 6.38. ϕ_{wj}^o vs. tiempo para elementos I-80/35-70-10.

6.4.4.2.3. Elementos I-80/50-40-10

En la Figura 6.39 y la Tabla 6.31 se presentan los resultados de los ϕ_{wj}^o de los elementos I-80/50-40-10; se han ensayado a fluencia 2 elementos, con valores de IF_a de 78.8% y 79.6%.

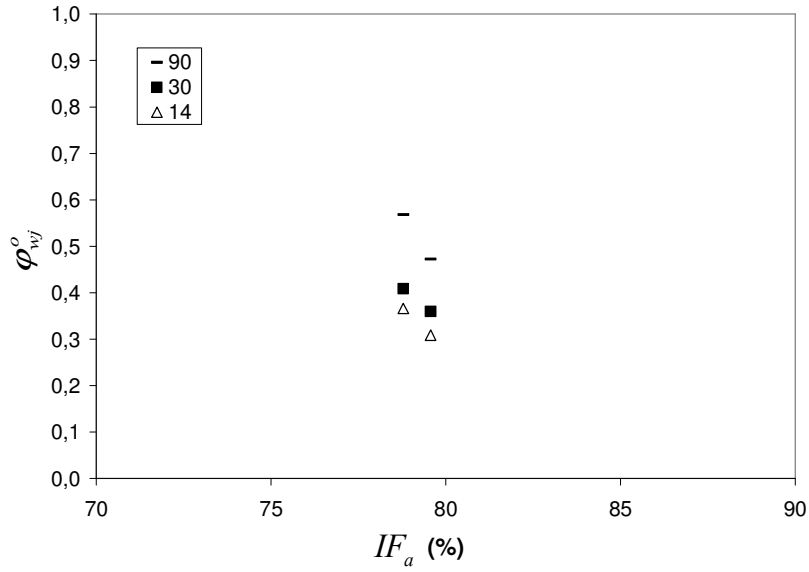


Figura 6.39. ϕ_{wj}^o vs. IF_a para elementos I-80/50-40-10.

Tabla 6.31. ϕ_{wj}^o para elementos I-80/50-40-10.

I-80/50-50-10	Media	Recorrido relativo
ϕ_{w14}^o (mm)	0.338	0.17
ϕ_{w30}^o (mm)	0.384	0.13
ϕ_{w90}^o (mm)	0.520	0.18

En la Figura 6.40 se presentan los valores de ϕ_{wj}^o para los elementos 41, 42 y la media de estos.

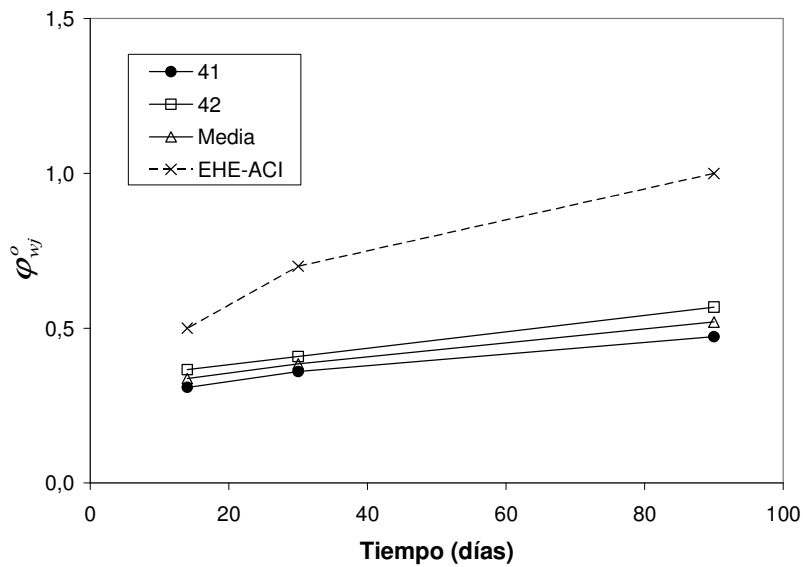


Figura 6.40. ϕ_{wj}^o vs. tiempo para elementos I-80/50-40-10 con IF_a de 80%.

Los valores obtenidos muestran un amplio margen de distancia con el modelo EHE-ACI.

6.4.4.2.4. Elementos I-2φ8-10

En la Figura 6.41 y la Tabla 6.32 se presentan los resultados de los φ_{wj}^o de los elementos I-2φ8-10 para todos los valores de IF_a . Se han ensayado 3 elementos, con valores de IF_a de 75.1%, 81.6% y 87.6%.

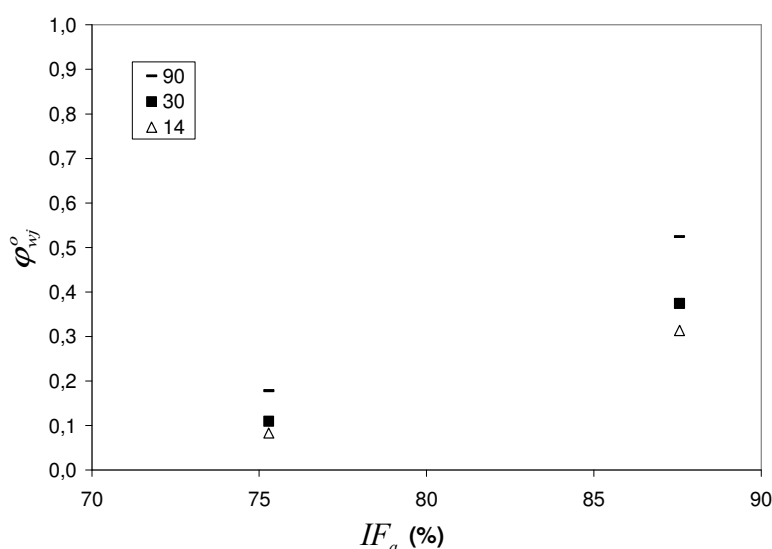


Figura 6.41. φ_{wj}^o vs. IF_a para elementos I-2φ8-10.

En la Figura 6.41 se presentan resultados de solamente dos elementos; esto es debido a que para el elemento 47, se presentaron problemas con el equipo de adquisición de datos en el proceso de prefisuración y no se cuenta con el valor de abertura de fisura residual w_{pr} , necesario para calcular φ_{wj}^o .

Tabla 6.32. φ_{wj}^o para elementos I-2φ8-10.

I-2φ8-10	Media	Recorrido relativo
φ_{w14}^o (mm)	0.198	1.16
φ_{w30}^o (mm)	0.242	1.09
φ_{w90}^o (mm)	0.351	0.99

En la Figura 6.42 se presentan los valores de φ_{wj}^o para los elementos 46 y 48, junto con la media de estos. Las pendientes de los dos tramos para 46 y 48 son similares y con valores notoriamente menores que las del modelo EHE-ACI.

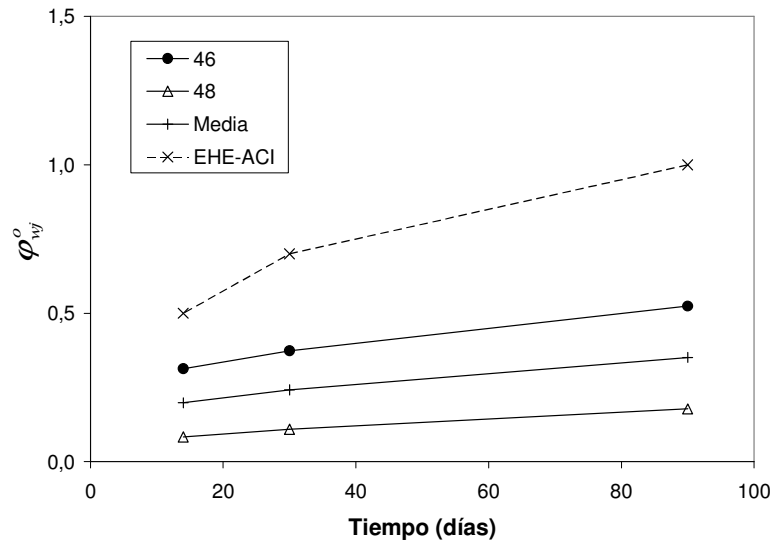


Figura 6.42. ϕ_{wj}^o vs. tiempo para elementos I-2 ϕ 8-10.

6.4.4.2.5. Elementos II-80/50-40-20

En la Figura 6.43 y la Tabla 6.33 se presentan los resultados de los ϕ_{wj}^o de los elementos II-80/50-40-20. Se han ensayado 3 elementos, con valores de IF_a de 82.2%, 82.5% y 88.1%.

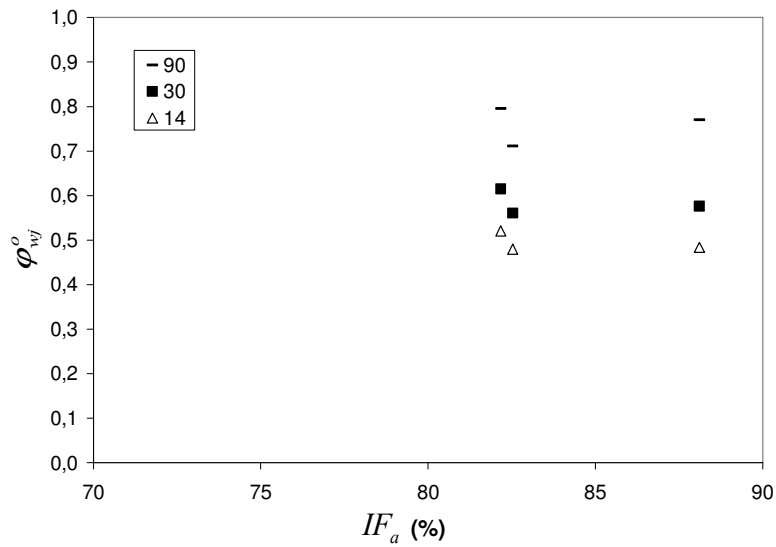


Figura 6.43. ϕ_{wj}^o vs. IF_a para elementos II-80/50-40-20.

Tabla 6.33. ϕ_{wj}^o para elementos II-80/50-40-20.

II-80/50-40-20	Media	Recorrido relativo
ϕ_{w14}^o (mm)	0.495	0.08
ϕ_{w30}^o (mm)	0.584	0.09
ϕ_{w90}^o (mm)	0.759	0.11

En la Figura 6.44 se presentan los valores de ϕ_{wj}^o para los elementos 38, 39 y 40, junto con la media de estos. A corto plazo (14 días) se dan valores de ϕ_{w14}^o coincidentes con el valor propuesto por el modelo EHE-ACI, registrándose posteriormente un menor desarrollo de deformaciones diferidas que el estimado por EHE-ACI.

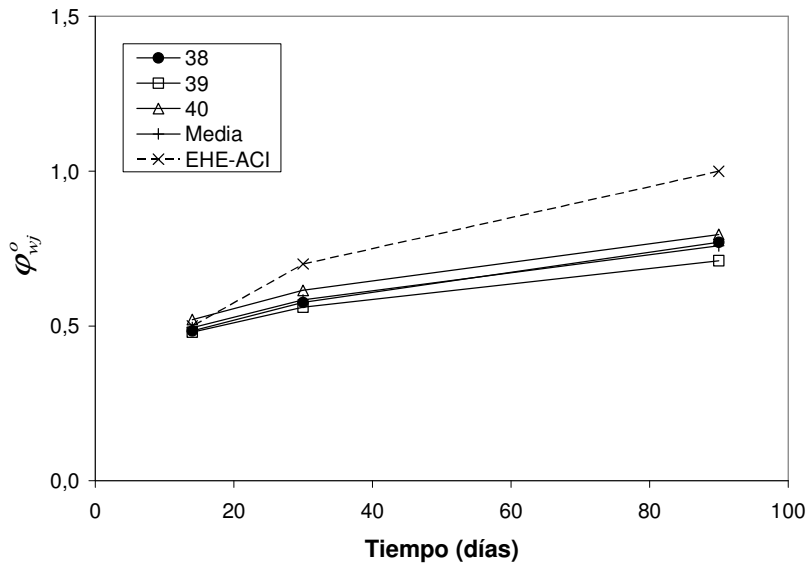


Figura 6.44. ϕ_{wj}^o vs. tiempo para elementos II-80/50-40-20.

6.4.4.2.6. Elementos II-65/40-40-20

En la Figura 6.45 y la Tabla 6.34 se presentan los resultados de los ϕ_{wj}^o de los elementos II-65/40-40-20. Se han ensayado 3 elementos, con valores de IF_a de 56.2%, 60.4% y 70.8%.

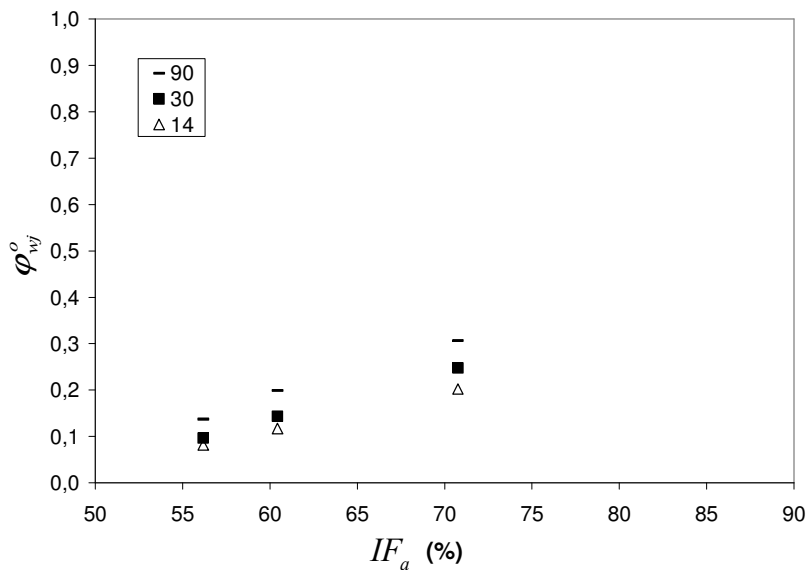


Figura 6.45. ϕ_{wj}^o vs. IF_a para elementos II-65/40-40-20.

Se observa una tendencia a tener mayores valores de ϕ_{wj}^o para mayores valores de IF_a .

Tabla 6.34. ϕ_{wj}^o en elementos II-65/40-40-20.

II-65/40-40-20	Media	Recorrido relativo
ϕ_{w14}^o (mm)	0.134	0.90
ϕ_{w30}^o (mm)	0.163	0.93
ϕ_{w90}^o (mm)	0.214	0.79

En la Figura 6.46 se presentan los valores de ϕ_{wj}^o para los elementos 10, 11 y 12, junto con la media de estos.

Todos los elementos ensayados presentan valores muy inferiores a los propuestos por EHE-ACI.

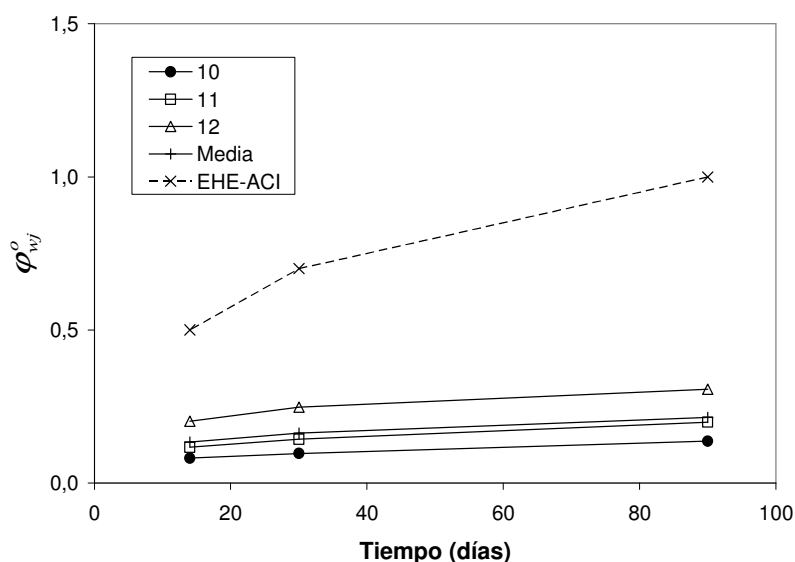


Figura 6.46. ϕ_{wj}^o vs. tiempo para elementos II-65/40-40-20.

6.4.4.2.7. Elementos II-45/50-40-20

En la Figura 6.47 se presentan los resultados de los ϕ_{wj}^o de los elementos II-45/50-40-20. Se han ensayado 6 elementos, con valores de IF_a entre 75.1% y 97.2%. No se aprecia una tendencia de comportamiento clara para los valores de ϕ_{wj}^o en función de IF_a .

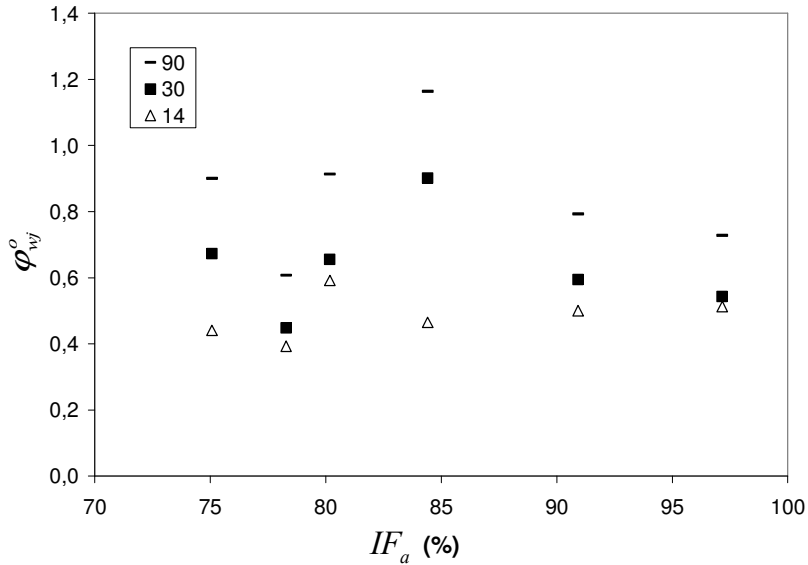


Figura 6.47. ϕ_{wj}^o vs. IF_a para elementos II-45/50-40-20.

La Figura 6.48 y la Tabla 6.35 presentan los resultados de ϕ_{wj}^o de los elementos 33, 34, 36 y 37 con valores de IF_a entre 75.1% y 84.4%. Los elementos 36 y 37, presentan pendientes fuertes en el tramo de 14-30 días, debido a abertura de fisura súbita el día 24 de ensayo.

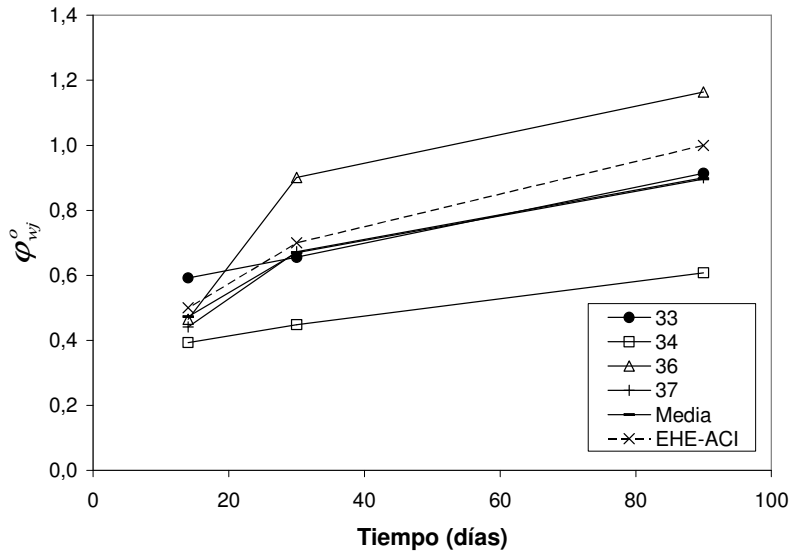


Figura 6.48. ϕ_{wj}^o vs. tiempo para elementos II-45/50-40-20 con IF_a de 80%.

Tabla 6.35. ϕ_{wj}^o en elementos II-45/50-40-20.

IF_a (%)	II-45/50-40-20	Media	Recorrido relativo
80	ϕ_{w14}^o (mm)	0.473	0.42
	ϕ_{w30}^o (mm)	0.669	0.68
	ϕ_{w90}^o (mm)	0.896	0.62

La Figura 6.49 y la Tabla 6.36 presentan los resultados de los elementos 32 y 35, con valores de IF_a de 97.2% y 90.9%.

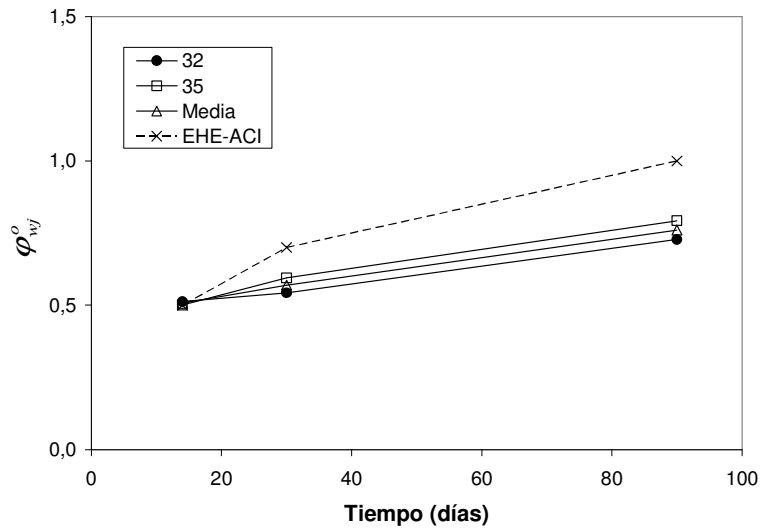


Figura 6.49. ϕ_{wj}^o vs. tiempo para elementos II-45/50-40-20.

Tabla 6.36. ϕ_{wj}^o para elementos II-45/50-40-20.

IF_a (%)	II-45/50-40-20	Media	Recorrido relativo
95	ϕ_{w14}^o (mm)	0.507	0.02
	ϕ_{w30}^o (mm)	0.569	0.09
	ϕ_{w90}^o (mm)	0.760	0.09

Finalmente, las curvas presentadas en la Figura 6.50, corresponden a las medias de la totalidad de ensayos realizados para el Tipo II-45/50-40-20, organizados en rangos de IF_a 80% y 95%; el número de elementos ensayados para cada situación son 4 y 2, respectivamente.

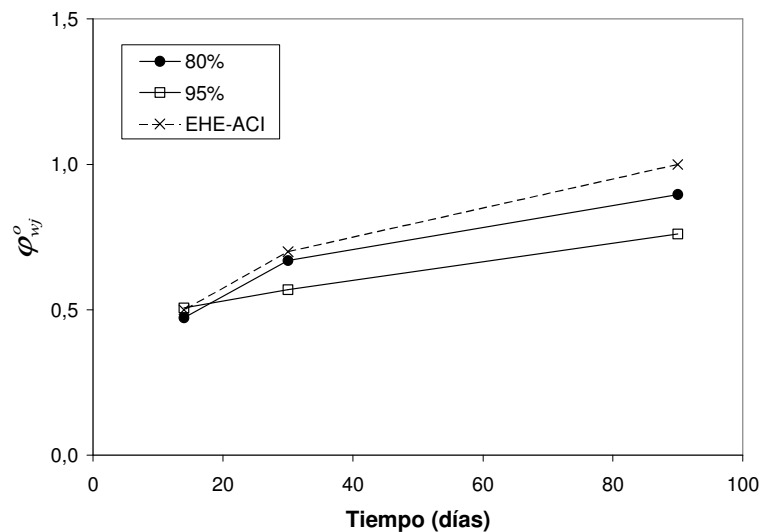


Figura 6.50. ϕ_{wj}^o vs. tiempo para elementos II-45/50-40-20.

Estos elementos muestran valores muy próximos a los parámetros propuestos por EHE-ACI, y analizados por separado algunos elementos superan estos límites. En estos casos, contrariamente a lo detectado en los anteriores ensayos, se aprecia un cambio de pendiente en el tramo 14-30 días y 30-90 días.

6.4.4.2.8. Elementos II-50/30-40-10

En la Figura 6.51 se presentan los resultados de los coeficientes ϕ_{wj}^o de los elementos II-50/30-40-10 para todos los valores de IF_a . Se han ensayado 5 elementos, con valores de IF_a entre 54.4% y 76.3%.

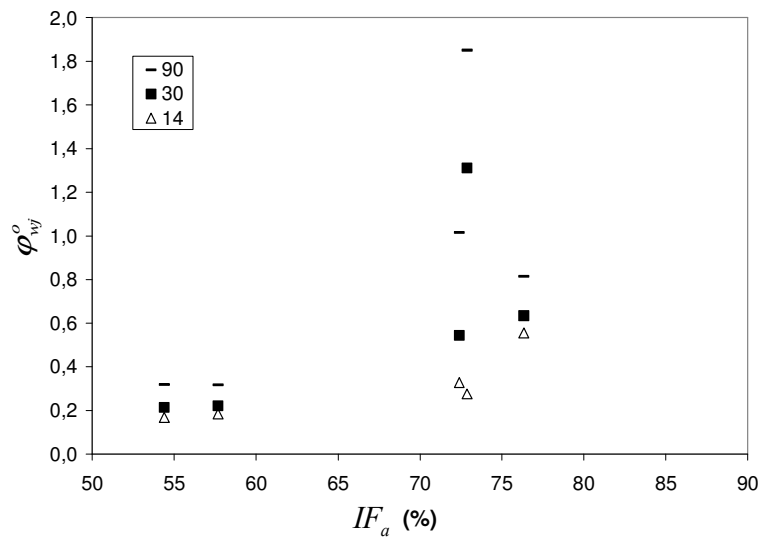


Figura 6.51. ϕ_{wj}^o para elementos II-50/30-40-10.

La Figura 6.52 y la Tabla 6.37 presentan los resultados de los elementos 14 y 15 con valores de IF_a de 57.7% y 54.4%.

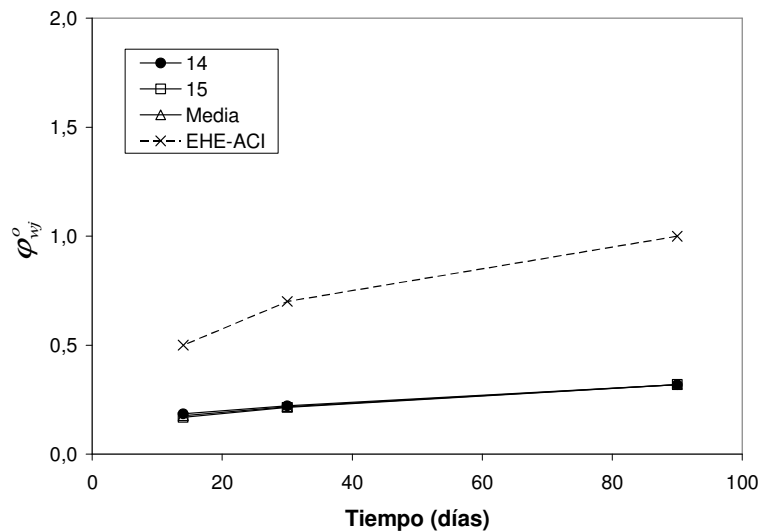


Figura 6.52. ϕ_{wj}^o vs. tiempo para elementos II-50/30-40-10 con IF_a de 60%.

Tabla 6.37. φ_{wj}^o para elementos II-50/30-40-10 con IF_a de 60%.

IF_a (%)	II-50/30-40-10	Media	Recorrido relativo
60	φ_{w14}^o (mm)	0.166	0.09
	φ_{w30}^o (mm)	0.218	0.03
	φ_{w90}^o (mm)	0.318	0.00

La Figura 6.53 y Tabla 6.38 presentan los resultados de los elementos 13, 18 y 20 con valores de IF_a entre 72.4% y 76.3%.

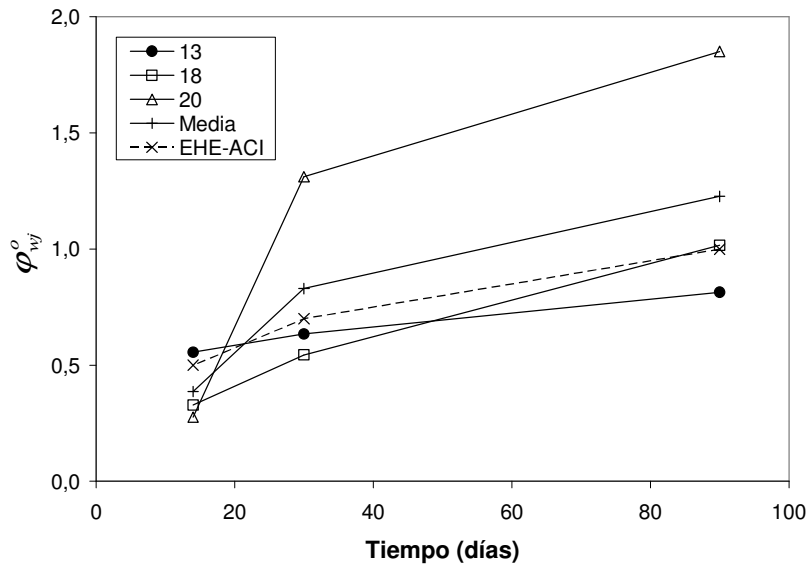


Figura 6.53. φ_{wj}^o vs. tiempo para elementos II-50/30-40-10 con IF_a de 80%.

Los tres elementos presentan valores de φ_{wj}^o mayores que los del modelo de referencia en alguno de sus tramos. Las curvas para los tres elementos tienen pendientes muy distintas entre sí. Los elementos 18 y 20 tienen una pendiente muy fuerte en el tramo 14-30 días debido a un aumento súbito en la w_{cd}^j a los 29 días de ensayo.

Tabla 6.38. φ_{wj}^o para elementos II-50/30-40-10 con IF_a de 80%.

IF_a (%)	II-50/30-40-10	Media	Recorrido relativo
80	φ_{w14}^o (mm)	0.386	0.72
	φ_{w30}^o (mm)	0.830	0.92
	φ_{w90}^o (mm)	1.227	0.84

Finalmente, se presentan y analizan los resultados de φ_{wj}^o a lo largo del tiempo para el conjunto de rangos de IF_a . Las curvas presentadas en la Figura 6.54 corresponden a las medias de la totalidad de ensayos realizados para el

II-50/30-40-10, organizados en rangos de IF_a de 60% y 80%; el número de elementos ensayados para cada situación son 2 y 3, respectivamente.

Las conclusiones para este tipo de hormigón son similares a las del II-45/50-40-20, detectando valores mayores a los previstos en los códigos, y pendientes más fuertes en el tramo 14-30 días.

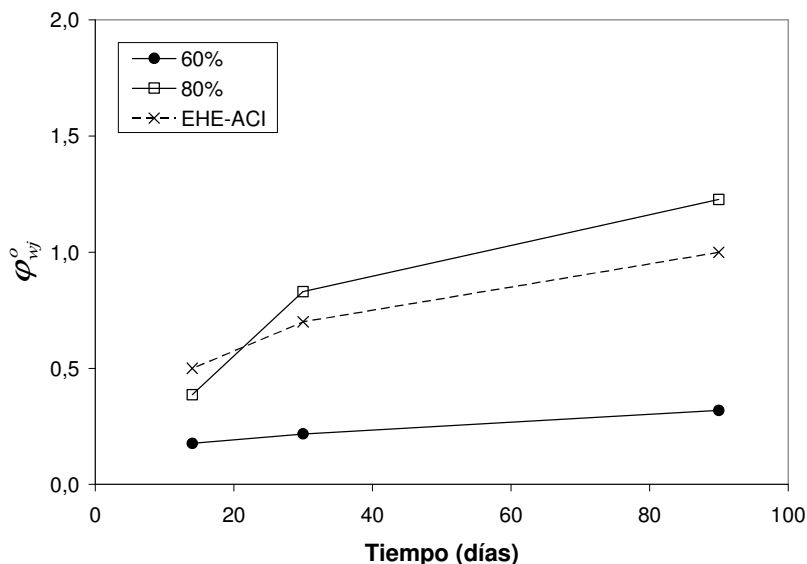


Figura 6.54. ϕ_{wj}^o vs. tiempo para hormigones II-50/30-40-10.

6.4.4.2.9. Elementos II-2 ϕ 6-20

En la Figura 6.55 y la Tabla 6.39 se presentan los resultados de los ϕ_{wj}^o de los elementos II-2 ϕ 6-20. Se han ensayado 3 elementos, con valores de IF_a de 80.0%, 82.2% y 87.6%.

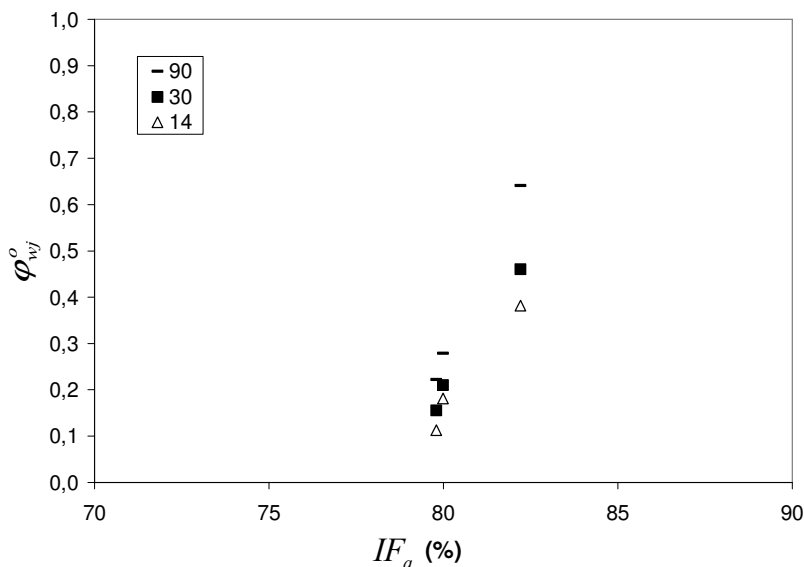


Figura 6.55. ϕ_{wj}^o vs. IF_a para elementos II-2 ϕ 6-20.

Tabla 6.39. φ_{wj}^o de elementos II-2 ϕ 6-20.

II-2 ϕ 6-20	Media	Recorrido relativo
φ_{w14}^o (mm)	0.225	1.09
φ_{w30}^o (mm)	0.275	0.99
φ_{w90}^o (mm)	0.380	0.97

En la Figura 6.56 se presentan los valores de φ_{wj}^o para los elementos 43, 44 y 45, junto con la media de estos.

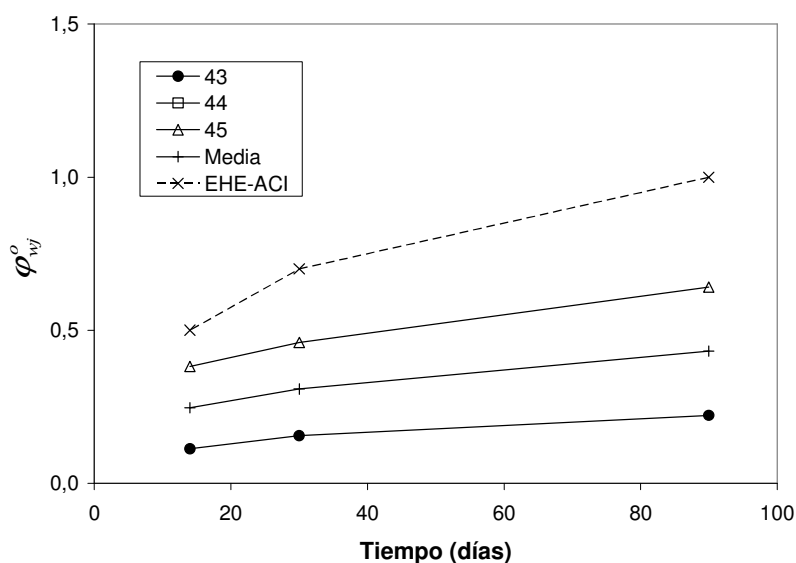


Figura 6.56. φ_{wj}^o vs. tiempo para elementos II-2 ϕ 6-20.

6.4.4.2.10. Conclusiones generales

Solo los hormigones II-45/50-40-20 y II-50/30-40-10 muestran valores de fluencia superiores a los propuestos por los códigos, incluso para niveles de carga del 80%. Incluso en estos casos, algunos de los elementos ensayados entrarían en los niveles admisibles.

Con niveles de carga del 95% también presentan valores de fluencia altos los hormigones I-80/35-40-10. Los elementos que alcanzan valores de fluencia elevados suelen presentar una pendiente de evolución del coeficiente de fluencia con el tiempo mayor en el tramo 14-30 días que en el tramo 30-90 días.

6.4.5. VELOCIDAD DE ABERTURA DE FISURA

Para analizar la evolución de la fluencia y su tendencia a la estabilización se ha definido el parámetro $COR^{j_1-j_2}$ (Crack Opening Rate) (Barragán y Zerbino, 2008) como la velocidad media con la que evoluciona la

abertura de fisura en un periodo de tiempo determinado. Se puede obtener a partir de los valores de abertura de fisura diferida w_{cd}^j mediante la siguiente expresión:

$$COR^{j_1-j_2} = \frac{w_{cd}^{j_2} - w_{cd}^{j_1}}{j_2 - j_1}$$

Donde:

j_1 : límite inferior del periodo de tiempo en el que se evalúa $COR^{j_1-j_2}$ (días).

j_2 : límite superior del periodo de tiempo en el que se evalúa $COR^{j_1-j_2}$ (días).

$w_{cd}^{j_1}$: abertura de fisura diferida a tiempo j_1 (mm).

$w_{cd}^{j_2}$: abertura de fisura diferida a tiempo j_2 (mm).

Se han establecido los siguientes periodos:

- Inicio – 14 días.
- 14 días – 30 días.
- 30 días – 90 días.

En las Tablas 6.41 y 6.42 se presentan los valores de $COR^{j_1-j_2}$ para los hormigones Tipo I y Tipo II, respectivamente.

Tabla 6.40. Valores de $COR^{j_1-j_2}$ en elementos Tipo I.

Hormigón	Id elem	IF_a (%)	Velocidad de abertura de fisura (10^{-3} mm/día)		
			COR^{0-14}	COR^{14-30}	COR^{30-90}
I-80/35-40-10	3	54.2	6.46	0.79	0.34
	2	54.9	10.90	1.21	0.60
	1	60.9	11.23	1.42	0.82
	23	70.5	6.79	1.01	0.58
	26	77.4	29.22	3.69	2.24
	25	81.0	38.70	4.65	2.23
	22	81.9	25.97	2.67	1.50
	24	82.9	38.91	5.72	2.70
	21	97.0	32.80	13.80*	1.96
I-80/35-70-10	6	59.2	6.35	0.90	0.46
	5	59.2	17.71	1.63	1.23
	4	61.9	13.26	1.96	0.70
	29	80.9	13.03	2.72	1.72
	7	81.0	25.80	1.97	1.29*
	9	81.3	15.83	1.38	0.58
	8	82.2	28.38	2.08	0.80
	31	92.1	44.30	4.11	3.34*
	30	93.7	59.72	6.74	4.15
I-80/50-40-10	42	78.8	15.26	1.56	1.55
	41	79.6	15.61	2.26	1.32
I-2φ8-10	48	75.1	2.74*	0.76	0.53
	47	81.6	4.76*	1.72	1.79
	46	87.6	19.45	3.28	2.18

* Ocurrencia de aumentos súbitos en la abertura de fisura para ese periodo de tiempo.

Tabla 6.41. Valores de $COR^{j_1-j_2}$ en elementos Tipo II.

Hormigón	Id elem	IF_a (%)	Velocidad de abertura de fisura (10^{-3} mm/día)		
			COR^{0-14}	COR^{14-30}	COR^{30-90}
II-80/50-40-20	40	82.2	18.96	3.01	1.53
	39	82.5	23.95	3.54	1.75
	38	88.1	26.27	4.40	2.45
II-65/40-40-20	10	56.2	6.47	1.05	0.75
	11	60.4	5.44	1.06	0.60
	12	70.8	7.52	1.49	0.51
II-45/50-40-20	37	75.1	19.24	8.82*	2.32
	34	78.3	14.79*	1.82	1.40*
	33	80.2	30.16*	2.83	3.07*
	36	84.4	23.69	19.48*	3.12
	35	90.9	34.73	5.72	3.21
	32	97.2	27.86*	1.44	2.34*
II-50/30-40-10	15	54.4	5.38	1.28	0.78
	14	57.7	6.72	1.16	0.82
	18	72.4	12.30	7.09*	4.13
	20	72.9	14.09	46.26*	6.43
	13	76.3	24.34*	3.03	1.84
II-2 ϕ 6-20	43	79.8	5.06*	1.69	0.70
	44	80.0	8.37*	1.15	0.74
	45	82.2	14.73	2.66	1.63

* Ocurrencia de aumentos súbitos en la abertura de fisura para ese periodo de tiempo.

Se han obtenido valores entre 27.4 y 597.2, entre 7.6 y 462.6, y entre 3.4 y 64.3 (valores de $COR^{j_1-j_2}$ en 10^{-3} mm/día), para COR^{0-14} , COR^{14-30} y COR^{30-90} respectivamente.

En la Tabla 6.42 se presentan los valores de $COR^{j_1-j_2}$ máximos y mínimos.

Tabla 6.42. Valores de $COR^{j_1-j_2}$ máximos y mínimos para hormigones Tipo I y II.

Valores de $COR^{j_1-j_2}$		Hormigón y velocidad de abertura de fisura (10^{-3} mm/día)					
		$COR^{j_1-j_2}$	Tipo I	Id	$COR^{j_1-j_2}$	Tipo II	Id
COR^{0-14}	Max	59.72	80/35-70-10*	30	34.73	45/50-40-20	35
	Min	2.74	2 ϕ 8-10**	48	5.06	2 ϕ 6-20	43
COR^{14-30}	Max	13.80	80/35-70-10	9	46.26	50/30-40-10*	20
	Min	0.76	2 ϕ 8-10**	48	1.05	65/40-40-20	10
COR^{30-90}	Max	4.15	80/35-70-10	30	6.43	50/30-40-10*	20
	Min	0.34	80/35-40-10**	3	0.51	65/40-40-20	12

* Valor máximo para todos los ensayos.

** Valor mínimo para todos los ensayos.

El valor máximo de COR^{0-14} para la totalidad de ensayos se ha presentado en el elemento 30 que tiene un IF_a del 93.7%, y para los COR^{14-30} y COR^{30-90} en el elemento 20 con IF_a de 72.9%, que ha presentado inestabilidades (aumentos súbitos de abertura de fisura) el día 29 y con fluencia rápida hasta el día 33 (afectando COR^{14-30} y COR^{30-90}). Los valores mínimos

para COR^{0-14} y COR^{14-30} los ha presentado el elemento 48 (elemento armado Tipo I) y para COR^{30-90} el elemento 3.

Los valores mínimos para Tipo I y II se han presentado en elementos armados para los primeros días (COR^{0-14} para Tipo I y II, y COR^{14-30} para Tipo I), pero a medida que aumenta el tiempo los mínimos se han presentado en elementos reforzados con fibras con bajos niveles de carga (COR^{14-30} para Tipo II y de COR^{30-90} para Tipo I y II), lo que sugiere una tendencia de aproximación a la estabilización más rápida para los SFRC.

Los elementos que no han presentado variaciones súbitas en los valores de abertura de fisura, presentan valores entre 5.38 y 59.72 para COR^{0-14} , 0.79 y 6.74 para COR^{14-30} , y 0.34 y 4.15 para COR^{30-90} (valores de $COR^{j_2-j_1}$ en 10^{-3} mm/día). Los valores máximos se han presentado para el elemento 30 (I-80/35-70-10) que tiene un IF_a de 93.7% y los valores mínimos para los elementos 15 (II-50/30-40-10) y 3 (I-80/50-40-10) con valores de IF_a de 54.4% y 54.2%, respectivamente. Estos rangos de valores de $COR^{j_1-j_2}$ se pueden considerar respuestas estables para los hormigones y las condiciones de carga estudiadas.

Como indicador de tendencia a la estabilización se pueden destacar las siguientes consideraciones:

- El valor de $COR^{j_1-j_2}$ se reduce sustancialmente al pasar de COR^{0-14} a COR^{14-30} . Esta reducción es del orden de 5 veces como mínimo en los casos en los que la tendencia a estabilizarse es manifiesta. De esta tendencia solo se escapan los elementos de los hormigones II-45/50-40-20 y II-50/30-40-10 sometidos a niveles de carga del orden del 80% y el elemento 21 del hormigón I-80/35-40-10 con un muy alto nivel de carga.
- Los valores de $COR^{j_1-j_2}$ que pueden considerarse estabilizados no superan los $4.0 \mu\text{m/día}$ para COR^{30-90} , aunque los elementos más estables consiguen este nivel a partir de los 14 días.

Dado que cada uno de los hormigones analizados muestra un comportamiento post-fisura diferente, con resistencias residuales muy variadas, se ha definido el término $\overline{COR}^{j_1-j_2}$ (Specific Crack Opening Rate) (Barragán y Zerbino, 2008), como la velocidad media con la que evoluciona la abertura de fisura en un periodo de tiempo determinado dividida por la tensión de tracción a flexotracción producida por F_a (f_{Fa}), y se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\overline{COR}^{j_1-j_2} = \frac{w_{cd}^{j_2} - w_{cd}^{j_1}}{j_2 - j_1} \cdot \frac{1}{f_{Fa}} = \frac{COR^{j_1-j_2}}{f_{Fa}}$$

Donde:

- j_1 : límite inferior del periodo de tiempo en el que se evalúa $COR^{j_1-j_2}$ (días).
- j_2 : límite superior del periodo de tiempo en el que se evalúa $COR^{j_1-j_2}$ (días).
- $w_{cd}^{j_1}$: abertura de fisura diferida a tiempo j_1 (mm).
- $w_{cd}^{j_2}$: abertura de fisura diferida a tiempo j_2 (mm).
- f_{Fa} : tensión de tracción producida por la carga aplicada F_a (MPa), que se obtiene mediante la siguiente expresión (véase 2.2.4):

$$f_{Fa} = \frac{3.F_a.l}{2.b.h_{sp}^2}$$

En las Tablas 6.43 y 6.44 se presentan los valores de $\overline{COR}^{j_1-j_2}$ para los hormigones Tipo I y Tipo II, respectivamente.

Tabla 6.43. Valores de $\overline{COR}^{j_1-j_2}$ en los elementos Tipo I.

Hormigón	Id elem	IF_a (%)	f_{Fa} (Mpa)	Velocidad de fisura (10^{-3} mm/día.MPa)		
				\overline{COR}^{0-14}	\overline{COR}^{14-30}	\overline{COR}^{30-90}
I-80/35-40-10	3	54.2	3.49	1.85	0.22	0.10
	2	54.9	3.37	3.23	0.36	0.18
	1	60.9	3.26	3.44	0.44	0.25
	23	70.5	6.10	1.11	0.17	0.10
	26	77.4	6.76	4.32	0.55	0.33
	25	81.0	6.65	5.82	0.70	0.34
	22	81.9	5.99	4.34	0.44	0.25
	24	82.9	6.54	5.95	0.87	0.41
	21	97.0	5.88	5.58	2.35*	0.33
I-80/35-70-10	6	59.2	7.00	0.91	0.13	0.07
	5	59.2	6.89	2.57	0.24	0.18
	4	61.9	6.78	1.96	0.29	0.10
	29	80.9	9.33	1.40	0.29	0.18
	7	81.0	7.71	3.35	0.26	0.17*
	9	81.3	7.93	2.00	0.17	0.07
	8	82.2	7.82	3.63	0.27	0.10
	31	92.1	9.22	4.81	0.45	0.36*
	30	93.7	9.10	6.56	0.74	0.46
I-80/50-40-10	42	78.8	5.59	2.73	0.28	0.28
	41	79.6	5.48	2.85	0.41	0.24
I-2φ8-10	48	75.1	10.65	0.26*	0.07	0.05
	47	81.6	10.54	0.45*	0.16	0.17
	46	87.6	10.43	1.86	0.31	0.21

* Ocurrencia de aumentos súbitos en la abertura de fisura para ese periodo de tiempo.

Tabla 6.44. Valores de $\overline{COR}^{j_1-j_2}$ en los elementos Tipo II.

Hormigón	Id elem	IF_a (%)	f_{Fa} (Mpa)	Velocidad de fisura (10^{-3} mm/día.MPa)		
				\overline{COR}^{0-14}	\overline{COR}^{14-30}	\overline{COR}^{30-90}
II-80/50-40-20	40	82.2	4.16	4.56	0.72	0.37
	39	82.5	4.05	5.91	0.87	0.43
	38	88.1	3.94	6.67	1.12	0.62
II-65/40-40-20	10	56.2	1.72	3.77	0.61	0.44
	11	60.4	1.83	2.97	0.58	0.33
	12	70.8	1.94	3.87	0.77	0.26
II-45/50-40-20	37	75.1	3.81	5.05	2.32*	0.61
	34	78.3	3.39	4.36*	0.54	0.41*
	33	80.2	3.28	9.19*	0.86	0.94*
	36	84.4	3.70	6.41	5.27*	0.84
	35	90.9	3.58	9.69	1.60	0.90
	32	97.2	3.17	8.79*	0.45	0.74*
II-50/30-40-10	15	54.4	2.11	2.55	0.61	0.37
	14	57.7	2.00	3.36	0.58	0.41
	18	72.4	2.96	4.15	2.39*	1.40
	20	72.9	2.86	4.92	16.15*	2.24
	13	76.3	1.89	12.88*	1.60	0.97
II-2φ6-20	43	79.8	6.36	0.80*	0.27	0.11
	44	80.0	6.47	1.29*	0.18	0.11
	45	82.2	6.58	2.24	0.40	0.25

* Ocurrencia de aumentos súbitos en la abertura de fisura para ese periodo de tiempo.

Se han obtenido valores entre 0.26 y 12.88, 0.07 y 16.15, y 0.05 y 2.24 (valores de $\overline{COR}^{j_1-j_2}$ en 10^{-3} mm/día.MPa), para \overline{COR}^{0-14} , \overline{COR}^{14-30} y \overline{COR}^{30-90} , respectivamente. Los valores máximos han correspondido a elementos II-50/30-40/10 con aumentos súbitos (elementos 13, 20 y 20, respectivamente), y los valores mínimos a I-2φ8-10 (elemento 48).

Los valores máximos para los elementos Tipo I los han presentado I-80/35-40-10 y I-80/35-70-10 (elementos 30, 20 y 30, respectivamente), con valores de IF_a entre 93.7% y 97.0%.

Los valores mínimos para los elementos Tipo II los han presentado I-2φ6-20 (elementos 43, 44 y 43, respectivamente).

Los elementos que no han presentado variaciones súbitas en los valores de abertura de fisura presentan valores \overline{COR} entre 0.91 y 9.69 para \overline{COR}^{0-14} , 0.13 y 1.60 para \overline{COR}^{14-30} , y 0.07 y 1.40 para \overline{COR}^{30-90} (valores de $\overline{COR}^{j_1-j_2}$ en 10^{-3} mm/día.MPa). Los valores máximos se han presentado para los elementos 35 (de \overline{COR}^{0-14} y \overline{COR}^{14-30}) y 18 (de \overline{COR}^{30-90}) que tienen un IF_a de 90.9% y 72.4% (para el primer elemento un valor muy alto y para el segundo se han registrado los menores valores de resistencia residual y ablandamiento), respectivamente. Los valores mínimos de $\overline{COR}^{j_1-j_2}$ se han obtenido en el elemento 6 (I-80/35-70-10) con IF_a de 59.2%. Estos rangos de valores de

$\overline{COR}^{j_1-j_2}$ se pueden considerar respuestas estables para los hormigones y las condiciones de carga estudiadas.

Al igual que los valores del $COR^{j_1-j_2}$, los correspondientes al $\overline{COR}^{j_1-j_2}$ indican claramente la estabilización cuando se alcanzan valores inferiores a $0.3-0.4 \mu\text{m} / \text{día.MPa}$, lo que puede ya detectarse en algunos elementos a los 14 días.

La reducción de velocidad entre \overline{COR}^{0-14} y \overline{COR}^{14-30} vuelve a ser un buen indicador de tendencia a la estabilización y puede valorarse de la misma forma que el caso anterior. Los elementos en los que se detecta coinciden con los ya comentados para $COR^{j_1-j_2}$.

6.4.6. ANÁLISIS DE LA FLUENCIA A PARTIR DE LA DEFORMACIÓN EN LA ZONA COMPRIMIDA DEL HORMIGÓN

En este apartado se presentan y analizan los datos obtenidos a partir de las bandas extensométricas colocadas en la cabeza comprimida de algunos de los elementos ensayados. La presentación de resultados, nomenclatura y proceso de análisis seguirá un camino paralelo al realizado anteriormente con las aberturas de fisura.

Con ello se pretende comparar esta respuesta con la evolución de la abertura de fisura y observar las relaciones entre ambas respuestas.

6.4.6.1. Deformación inicial en compresión del hormigón ε_{ci}

Los valores de las deformaciones iniciales en compresión del hormigón ε_{ci} se han presentado previamente en las Tablas 6.15 y 6.16.

En la Figura 6.57 se muestran los valores de las deformaciones iniciales en compresión ε_{ci} en función del índice de carga aplicada IF_a ; se observa una tendencia a que se produzcan mayores deformaciones en compresión para mayores valores de IF_a y, de forma general, los hormigones Tipo I presentan mayores niveles de deformación ε_{ci} que los Tipo II incluso para valores menores de IF_a , lo que puede deberse a que los elementos Tipo I han sido sometidos a mayores niveles de carga F_a .

En la Figura 6.58 se presentan los valores de las deformaciones iniciales en compresión ε_{ci} en función de la de carga aplicada F_a . Se observa una clara tendencia a aumentar ε_{ci} con la carga aplicada, como es lógico.

El mayor valor de ε_{ci} se presenta para el elemento I-2 ϕ 8-10 con mayor F_a (54.9 kN). Los menores valores se presentan para los elementos Tipo II-45/50-40-20 con F_a de 17.7 kN y 19.8 kN.

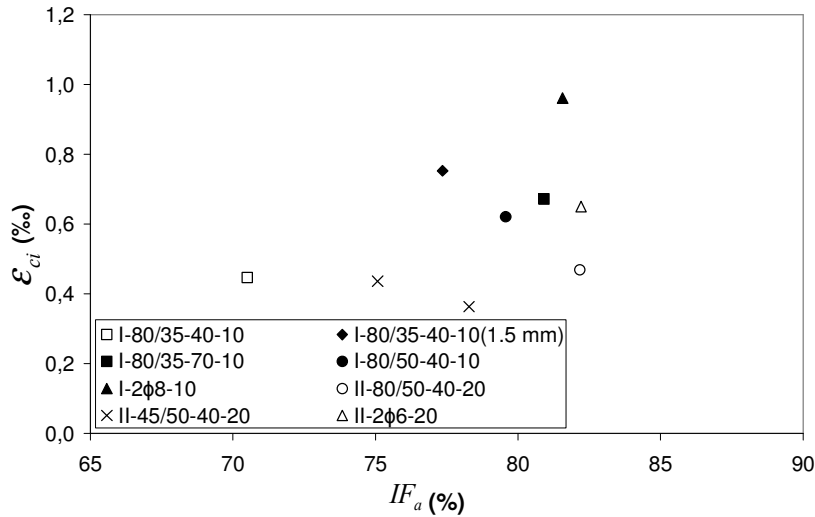


Figura 6.57. Deformaciones iniciales en compresión ε_{ci} en función de IF_a .

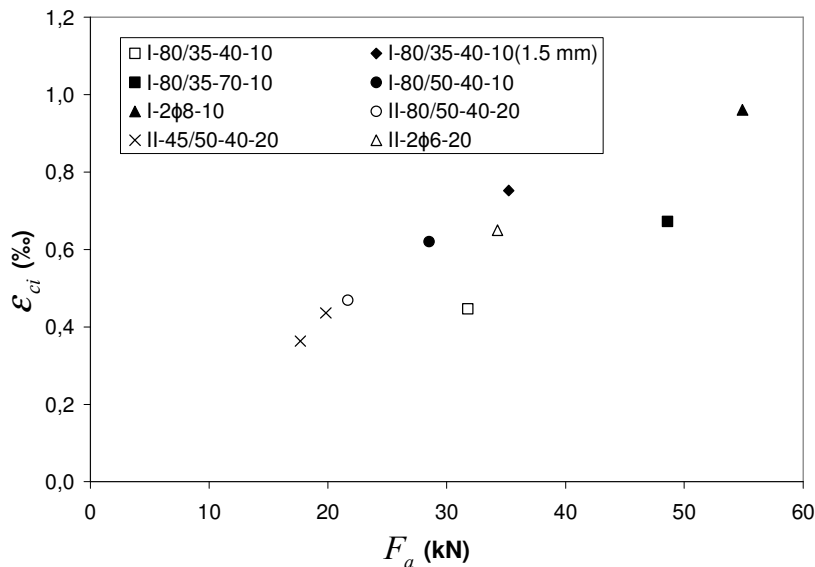


Figura 6.58. Deformaciones iniciales en compresión ε_{ci} en función de F_a .

6.4.6.2. Deformación diferida en compresión del hormigón ε_{cd}^j

Los valores de las deformaciones diferidas en compresión a los 90 días de ensayo se presentan en la Figura 6.59 (en función del índice de carga aplicado IF_a) y en la Figura 6.60 (en función de la carga aplicada F_a), y constan en las Tablas 6.15 y 6.16.

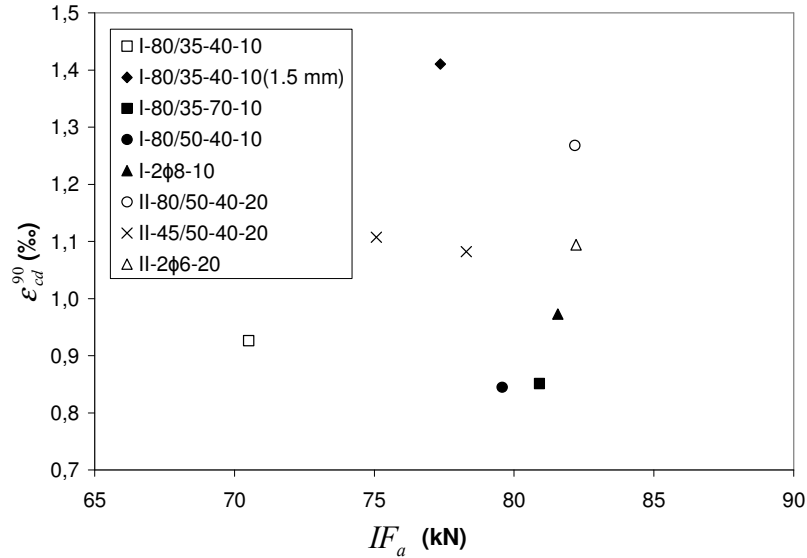


Figura 6.59. Deformaciones diferidas en compresión ϵ_{cd}^{90} en función de IF_a .

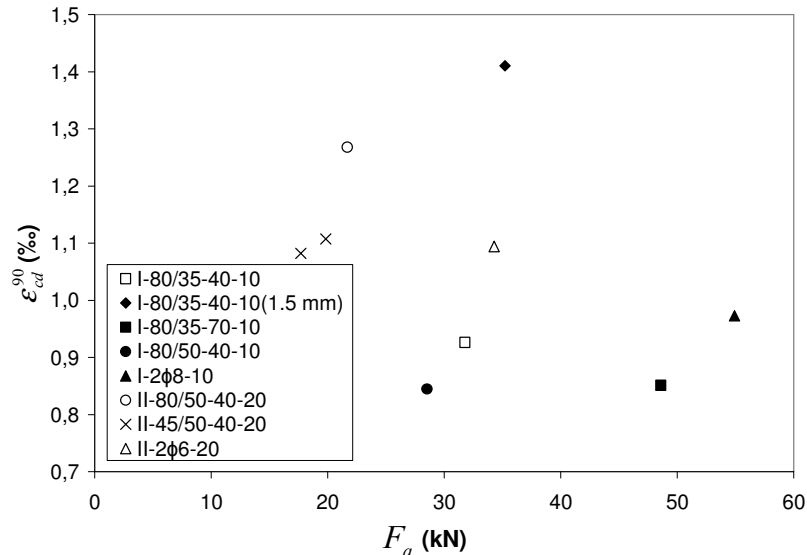


Figura 6.60. Deformaciones diferidas en compresión ϵ_{cd}^{90} en función de F_a .

Las mayores deformaciones de ϵ_{cd}^{90} (1.410‰) se obtienen para los hormigones I-80/35-40-10 (1.5 mm) y un F_a de 35.2 kN; para los elementos con hormigones Tipo II: elementos II-45/50-40-20 (Serie 2 y 3) y II-2φ6-20 con valores de ϵ_{cd}^{90} muy similares (1.082‰, 1.107‰ y 1.094‰), y II-80/50-40-20 con un ϵ_{cd}^{90} de 1.268‰; y para los elementos Tipo I y w_n de 0.5 mm: I-80/50-40-10, I-80/35-70-10, I-80/35-40-10 y I-2φ8-10 con valores ϵ_{cd}^{90} de 0.845‰, 0.851‰, 0.926‰ y 0.973‰, respectivamente.

Los elementos armados presentan un comportamiento intermedio, del mismo orden al obtenido con los SFRC, lo que contrasta con los menores valores de aberturas de fisura obtenidas. Aquí no influye el efecto de las fisuras

fuera de la zona central. El hormigón Tipo I muestra menores deformaciones que el Tipo II a pesar de ser sometido a niveles de carga superiores.

En la Tabla 6.21 se mostraron los elementos que presentan aumentos súbitos de abertura de fisura; dos de dichos elementos fueron instrumentados para medir sus deformaciones en compresión. En la Figura 6.61 se presenta a modo de ilustración la influencia de los aumentos súbitos de abertura de fisura en las deformaciones ϵ_{ct}^j en función del tiempo, y en la Tabla 6.45 se presentan los elementos que han sufrido aumentos súbitos de deformaciones en compresión y la magnitud de estas deformaciones (las curvas de las deformaciones de fluencia se presentan en los Anejos 4 y 5).

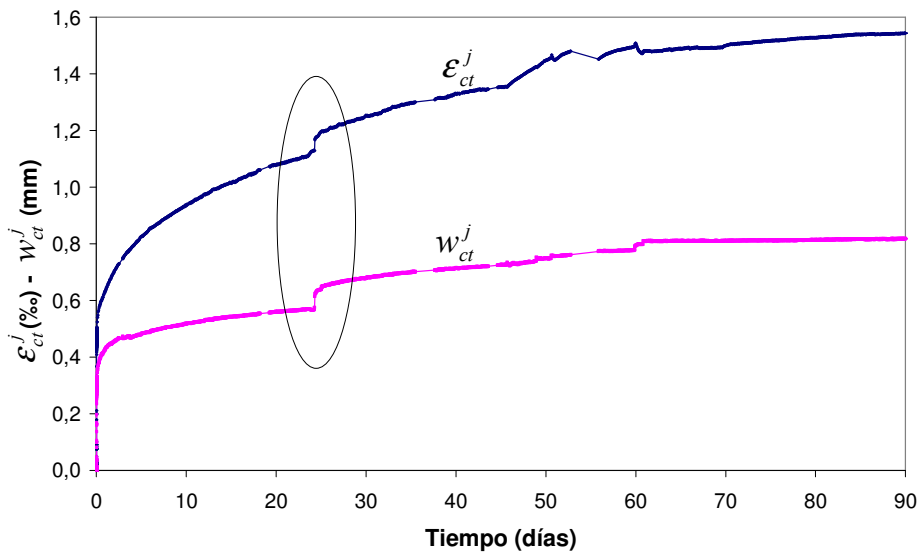


Figura 6.61. Evolución de ϵ_{ct}^j y w_{ct}^j en función de F_a , hormigón II-45/50-40-20 (Serie 3, Bastidor 1, Elemento 3).

En la Tabla 6.45 se presentan los elementos que han presentado aumentos súbitos de las deformaciones en compresión, indicando además de la serie, hormigón, bastidor, posición, identificación del elemento, el índice de carga aplicada IF_a :

- $\Delta\epsilon$: incremento súbito de la deformación en compresión (%).
- ϵ_{cd}^{90} : deformación diferida en compresión a los 90 días de ensayo (%).
- Δ : proporción de $\Delta\epsilon$ respecto de ϵ_{cd}^{90} .

Tabla 6.45. Tabla resumen de elementos que han presentado aumentos súbitos de ϵ_{cd}^j .

Serie	Hormigón	Bastidor	Posición	Id elem	IF_a (%)	$\Delta\epsilon$ (%)	ϵ_{cd}^{90} (%)	Δ (%)
2	II-45/50-40-20	5	3	34	78.3	0.037	1.082	3.7
						0.024		2.4
						0.038		3.8
3	II-45/50-40-20	1	3	37	75.1	0.038	1.107	3.8

Los incrementos $\Delta\epsilon$ suceden en instantes de tiempo coincidentes con los incrementos de abertura de fisura Δw , por lo que se consideran producto

del mismo fenómeno. Mientras que $\Delta\varepsilon$ presenta valores del orden de un 2-4% de ε_{cd}^{90} , Δw para estos elementos presenta valores entre un 6% y 11% de w_{cd}^{90} (véase Tabla 6.21).

Se aprecia que ninguno de los elementos armados ha presentado deformaciones súbitas. Esto confirma la hipótesis de que los valores de saltos negativos en aberturas de fisura eran debidos a las fisuras fuera de control y que la evolución real es similar a la de los SFRC con igual tipo de carga.

Por otro lado, se han llevado a cabo medidas de deformaciones en compresión ε_c en algunos elementos de seguimiento en ausencia de carga, con la finalidad de registrar deformaciones correspondientes a efectos diferidos ajenos a las cargas impuestas.

En la Tabla 6.17 se presentaron los resultados de las probetas de seguimiento para las deformaciones en compresión de la serie 3. En la Figura 6.62 se comparan las deformaciones de los elementos cargados ε_{ct}^j con las deformaciones ε_{sh}^j de los elementos de seguimiento sin carga, simbolizados con líneas punteadas.

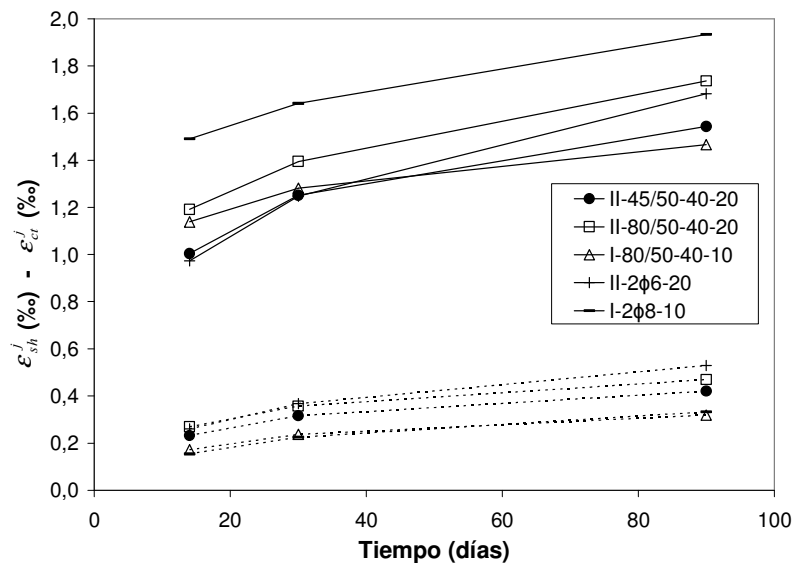


Figura 6.62. Deformaciones en cara en compresión en función del tiempo (ε_{ct}^j), para elementos de seguimiento sin carga (ε_{sh}^j) y elementos ensayados a fluencia.

En las deformaciones de las probetas de seguimiento ε_{sh}^j , se diferencian dos comportamientos: los menores valores (valores muy similares entre ellos), corresponden a los dos elementos con hormigón Tipo I; y los mayores valores, con mayores diferencias entre sí, corresponden a los hormigones Tipo II. Las deformaciones ε_{sh}^j presentan valores entre el 10.4% y 29.7% de las correspondientes deformaciones ε_{ct}^j .

6.4.6.3. Coeficientes de fluencia en función de las deformaciones en compresión φ_{ej}

Se definen dos coeficientes de fluencia en función de las deformaciones en compresión φ_{ej} , uno en función de la deformación en compresión inicial a origen φ_{ej}^o y otro φ_{ej}^c en función de la deformación en compresión inicial debida exclusivamente al efecto de la puesta en carga en el ensayo de fluencia.

El coeficiente de fluencia a tiempo j φ_{ej}^o a origen de ensayo, obtenido a partir de los valores de deformación en compresión, puede definirse como:

$$\varphi_{ej}^o = \frac{\varepsilon_{cd}^j}{\varepsilon_{ci}^o}$$

Donde:

ε_{ci}^o : deformación en compresión inicial a origen (‰), que se obtiene como:

$$\varepsilon_{ci}^o = \varepsilon_{pr} + \varepsilon_{ci}$$

ε_{pr} : deformación en compresión residual en el proceso de prefisuración (‰).

ε_{ci} : deformación en compresión inicial (‰) en la fase de fluencia en carga.

ε_{cd}^j : deformación en compresión diferida a tiempo j (‰).

El coeficiente de fluencia a tiempo j φ_{ej}^c considerando exclusivamente las deformaciones desarrolladas en la etapa de carga, puede definirse como:

$$\varphi_{ej}^c = \frac{\varepsilon_{cd}^j}{\varepsilon_{ci}}$$

Donde:

ε_{ci} : deformación en compresión inicial (‰).

ε_{cd}^j : deformación en compresión diferida a tiempo j (‰).

Se han calculado los coeficientes de fluencia para valores de j igual a 14, 30 y 90 días. En la Tabla 6.46 figura el resumen de resultados para los distintos elementos ensayados. Los coeficientes φ_{ej}^o , como es lógico, al tener mayores valores de deformación en compresión inicial (mayores valores de abertura de fisura inicial), presentan menores valores respecto de φ_{ej}^c .

Tabla 6.46. Valores de φ_{ej}^o y φ_{ej}^c .

Hormigón	IF_a (%)	F_a (kN)	Id elem	$\varphi_{\varepsilon 14}^o$	$\varphi_{\varepsilon 30}^o$	$\varphi_{\varepsilon 90}^o$	$\varphi_{\varepsilon 14}^c$	$\varphi_{\varepsilon 30}^c$	$\varphi_{\varepsilon 90}^c$
I-80/35-40-10	70.5	31.8	23	-	-	-	1.161	1.520	2.074
I-80/35-40-10 (1.5 mm)	77.4	35.2	26	-	-	-	1.159	1.438	1.874
I-80/35-70-10	80.9	48.6	29	-	-	-	0.620	0.852	1.266
I-80/50-40-10	79.6	28.5	41	0.589	0.751	0.961	0.834	1.064	1.388
I-2 ϕ 8-10	81.6	54.9	47	0.494	0.635	0.907	0.552	0.708	1.012
II-45/50-40-20 (Serie 2)	78.3	17.7	34	-	-	-	1.624	2.115	2.978
II-45/50-40-20 (Serie 3)	75.1	19.8	37	-	-	-	1.302	1.868	2.538
II-80/50-40-20	82.2	21.7	40	0.918	1.176	1.611	1.541	1.972	2.702
II-2 ϕ 6-20	82.2	34.3	45	0.821	1.052	1.419	0.973	1.248	1.683

En términos generales, independientemente de si se analiza φ_{ej}^o o φ_{ej}^c , los elementos con hormigón Tipo I presentan menores valores de coeficientes de fluencia que los elementos con hormigón Tipo II, y también menor diferencia entre sus valores para los diferentes valores de tiempo j . Los elementos armados presentan los menores valores de coeficientes de fluencia para el hormigón Tipo I y II (I-2 ϕ 8-10 y II-2 ϕ 6-20, respectivamente). El elemento II-2 ϕ 6-20 incluso ha presentado menores valores de φ_{ej}^c que los elementos I-80/35-40-10 (para los dos niveles de w_n 0.5 mm y 1.5 mm).

En la Figura 6.63 se presentan los valores de φ_{ej}^o en función de IF_a , y en la Figura 6.64 en función de F_a .

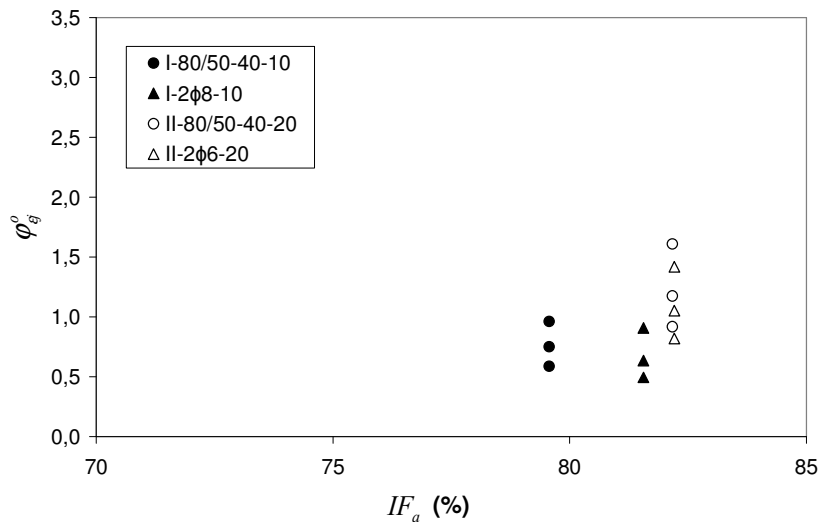


Figura 6.63. φ_{ej}^o en función de IF_a .

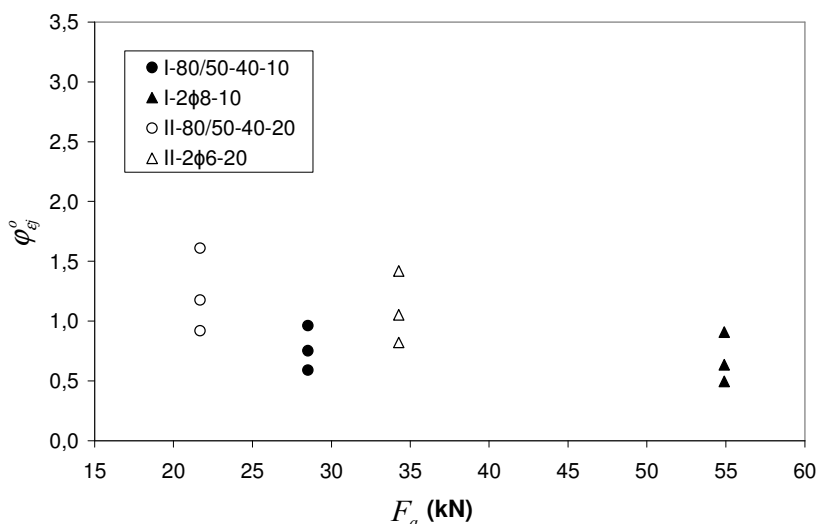


Figura 6.64. φ_{ej}^o en función de F_a .

Aunque se trate de elementos con valores similares de IF_a , el valor de F_a varía mucho entre los distintos elementos. Así, los elementos armados presentan valores de φ_{ej}^o del mismo orden al de los elementos con su mismo tipo de hormigón y IF_a similares, pero para valores de F_a muy diferentes.

En la Figura 6.65 se presentan los valores de φ_{ej}^c en función de IF_a y en la Figura 6.66 en función de F_a .

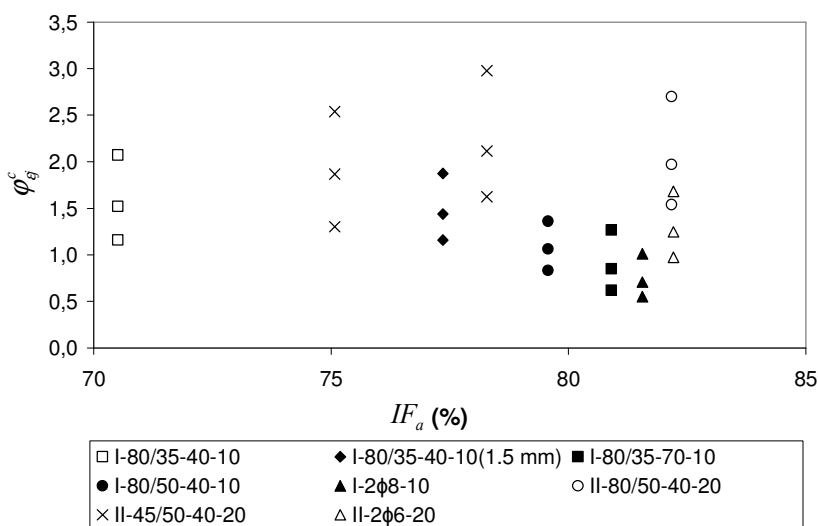


Figura 6.65. φ_{ej}^c en función de IF_a .

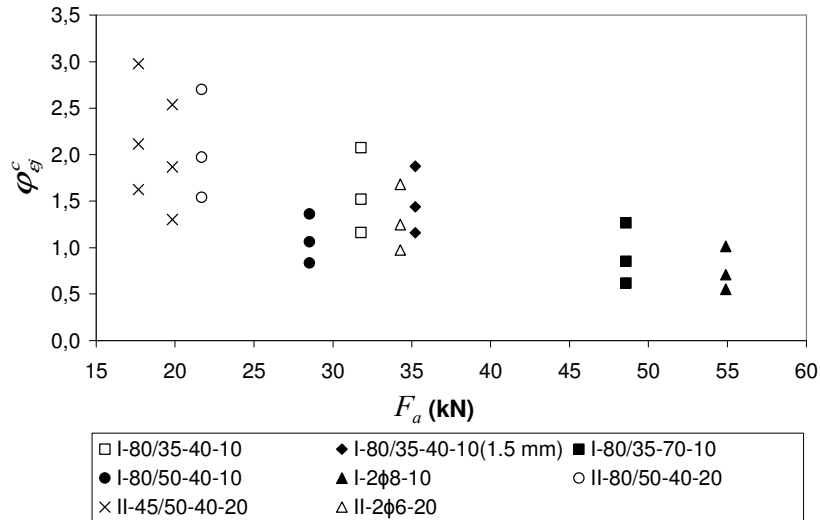


Figura 6.66. φ_{wj}^c en función de F_a .

Se aprecia una tendencia general de los elementos con hormigón Tipo I a presentar menores valores de φ_{ej}^o y φ_{ej}^c .

El elemento I-2φ8-10 presenta el mejor comportamiento, seguido de cerca por los elementos I-80/35-70-10 y I-80/50-40-10. Para los hormigones Tipo I, los elementos I-80/35-40-10 (w_n de 0.5 y 1.5 mm), presentan el comportamiento menos bueno, con valores similares (sensiblemente superiores) a II-2φ6-20. Los mayores valores y con mayores variaciones para los diferentes tiempos j , se presentaron para II-80/50-40-20 y II-45/50-40-20.

Cabe aclarar que un valor de coeficiente de fluencia bajo no garantiza una deformación total baja y viceversa. Los valores altos de coeficiente de fluencia corresponden siempre a deformaciones diferidas importantes. Sin embargo, los valores bajos de coeficiente de fluencia son debidos a deformaciones instantáneas elevadas que compensan las deformaciones diferidas que también pueden ser elevadas.

En las Figuras 6.67 y 6.68 se presentan los valores de φ_{ej}^o en función del tiempo para los elementos Tipo I y Tipo II, respectivamente. Se puede observar cómo el coeficiente de fluencia φ_{ej}^o favorece a los elementos con mayores valores de abertura de prefisuración, llevando al elemento I-80/35-40-10 al nivel del I-2φ8-10 en la Figura 6.67, mientras que en la Figura 6.68 los valores de φ_{ej}^c son del orden del doble para el SFRC. Además, se corrobora la tendencia general de los hormigones Tipo II a presentar mayores valores de φ_{ej}^o y φ_{ej}^c .

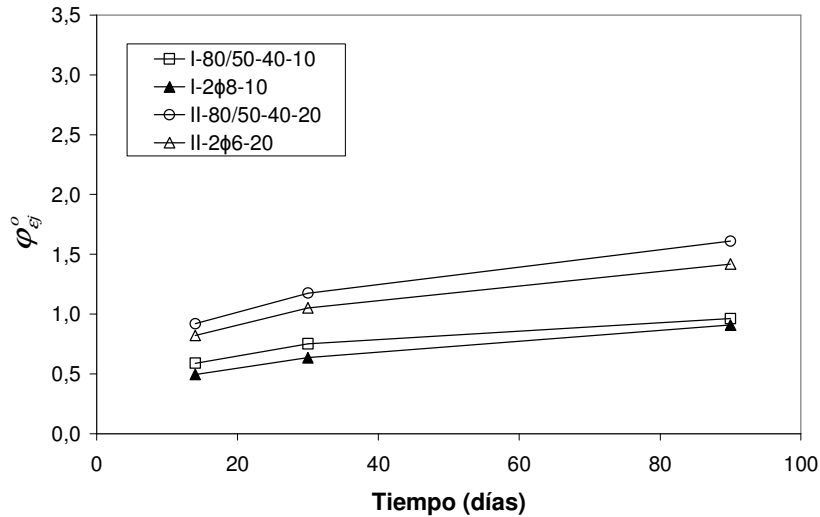


Figura 6.67. ϕ_{ej}^o vs. tiempo.

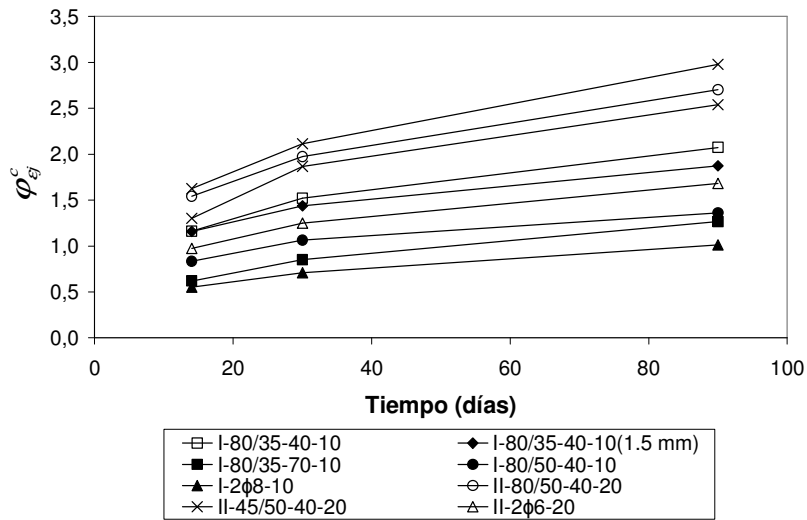


Figura 6.68. ϕ_{ej}^c vs. tiempo.

6.4.6.4. Velocidad de deformación en compresión del hormigón $DR^{j_1-j_2}$

El término $DR^{j_1-j_2}$ es la velocidad de deformación en compresión del hormigón en un periodo de tiempo determinado $j_1 - j_2$, y se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$DR^{j_1-j_2} = \frac{\epsilon_{cd}^{j_2} - \epsilon_{cd}^{j_1}}{j_2 - j_1}$$

Donde:

j_1 : límite inferior del periodo de tiempo en el que se evalúa el $DR^{j_1-j_2}$ (días).

j_2 : límite superior del periodo de tiempo en el que se evalúa el $DR^{j_1-j_2}$ (días).

$\varepsilon_{cd}^{j_1}$: deformación en compresión diferida a tiempo j_1 (‰).

$\varepsilon_{cd}^{j_2}$: deformación en compresión diferida a tiempo j_2 (‰).

La Tabla 6.47 presenta los valores de velocidad de deformación en compresión $DR^{j_1-j_2}$ para los hormigones Tipo I y Tipo II.

Tabla 6.47. Valores de $DR^{j_1-j_2}$ para deformaciones en compresión.

Hormigón	Id elem	F_a (kN)	Velocidad de deformación (10^{-3} ‰/día)		
			DR^{0-14}	DR^{14-30}	DR^{30-90}
I-80/35-40-10	23	31.8	37.03	10.03	4.12
I-80/35-40-10	26**	35.2	62.32	13.10	5.47
I-80/35-70-10	29	48.6	29.78	9.71	4.65
I-80/50-40-10	41	28.5	36.97	8.92	3.35
I-2 ϕ 8-10	47	54.9	37.86*	9.38	5.03
II-80/50-40-20	40	21.7	51.64	12.65	5.71
II-45/50-40-20	34	17.7	42.14*	11.16	5.23*
II-45/50-40-20	37	19.8	40.57	15.44*	4.87
II-2 ϕ 6-20	45	34.3	45.20	11.17	5.35

* Ocurrencia de aumentos súbitos en la deformación para ese periodo de tiempo.

** Elemento con $w_n = 1.5$ mm.

Se aprecia una importante reducción en los valores de velocidad de deformación $DR^{j_1-j_2}$ a medida que se evalúa para rangos de tiempo mayores.

El elemento I-80/35-40-10 con abertura de prefisura w_n de 1.5 mm presenta los mayores valores para los elementos Tipo I; el mayor valor de w_p induce una altura de fisura mayor que reduce la zona que resiste en compresión, incrementando los niveles tensionales y generando mayores deformaciones ε_{cd} . Para los elementos Tipo I, los valores de DR^{30-90} presentan tendencia a aumentar con la carga aplicada F_a , tendencia que no se presenta claramente para DR^{0-14} y DR^{14-30} .

Para los elementos Tipo II el elemento II-80/50-40-20 presenta los mayores valores de deformaciones en compresión para los tres rangos evaluados, comportamiento que contrasta con los valores presentados por I-80/50-40-10 (resaltando la importancia del tipo de hormigón).

6.5. PROCESO DE DESCARGA Y RECUPERACIÓN

6.5.1. RESULTADOS DE LOS ELEMENTOS ENSAYADOS A FLUENCIA: PROCESO DE DESCARGA Y RECUPERACIÓN

Los elementos ensayados a fluencia han sido descargados con el fin de conocer su capacidad de recuperación relativa de abertura de fisura y deformaciones en compresión.

A modo de ejemplo, se muestran los resultados de la etapa de descarga y recuperación obtenidos del hormigón I-80/35-40-10 (Serie 2, Bastidor 3, Probeta 3), para abertura de fisura (Figuras 6.69 y 6.70) y para deformación en compresión del hormigón (Figuras 6.71 y 6.72)

La Figura 6.69 muestra la evolución de la abertura de fisura en las fases de carga y descarga. En esta se indican los siguientes parámetros:

- w_{ct}^{ff} : abertura de fisura total en el instante previo a la descarga (tiempo final t_f), medida en captador (mm).
- w_{cr}^{ff} : abertura de fisura residual al final del ensayo de fluencia (tiempo t_t), después de la etapa de recuperación, medida en captador (mm).

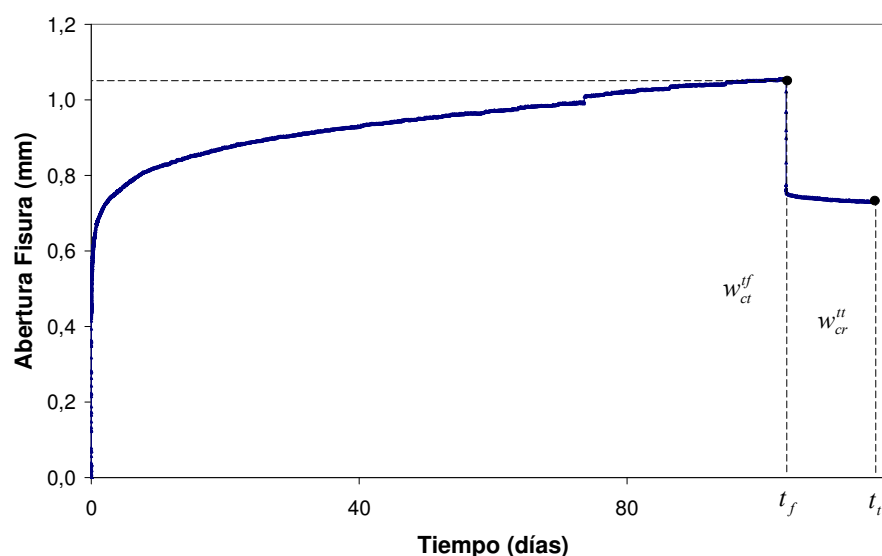


Figura 6.69. Evolución de la abertura de fisura con el tiempo en etapas de carga, descarga y recuperación en Tipo I-80/35-40-10 (Serie 2, Bastidor 3, Probeta 3).

La Figura 6.70 presenta en detalle la evolución de la abertura de fisura w en la fase de descarga. En ella se indican los siguientes parámetros:

- w_{cui} : abertura de fisura inicial recuperada al descargar (tras estabilizar la descarga durante 1 minuto), medida en captador (mm).
- w_{cud} : abertura de fisura diferida recuperada durante la etapa de recuperación (2 semanas), medida en captador (mm).
- w_{cut} : abertura de fisura total recuperada medida en captador (mm), que se puede expresar como:

$$w_{cut} = w_{cui} + w_{cud}$$

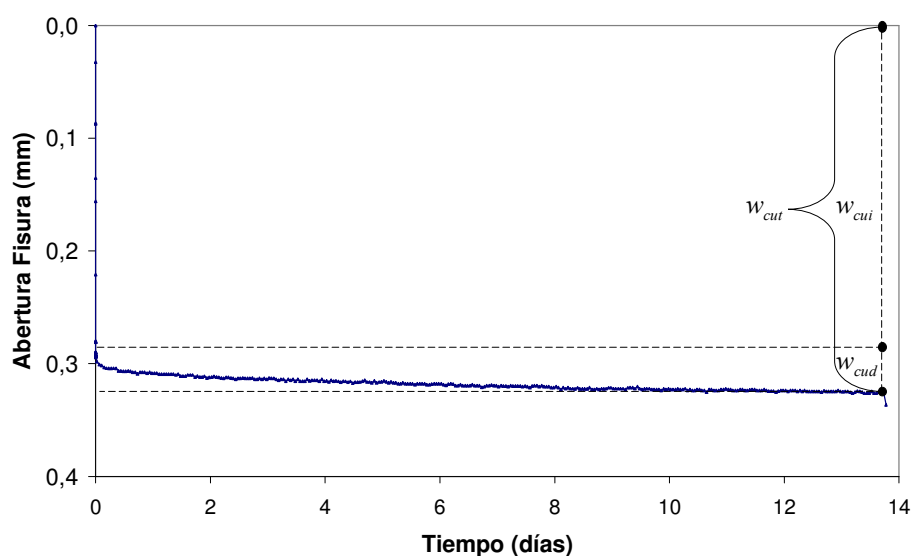


Figura 6.70. Evolución de la abertura de fisura con el tiempo en etapa de descarga y recuperación en I-80/35-40-10 (Serie 2, Bastidor 3, Probeta 3).

Los resultados experimentales correspondientes a curvas abertura de fisura-tiempo de los elementos ensayados a fluencia figuran en el Anejo 4.

Se presenta un resumen de los resultados de las aberturas de fisura para cada serie en las Tablas 6.48, 6.49 y 6.50, en las que se indica: el hormigón, el bastidor, la posición e identificación del elemento, IF_a , F_a y los términos w_{ct}^{ff} , w_{cui} , w_{cud} y w_{cut} .

Tabla 6.48. Resultados de abertura de fisura en etapa de descarga y recuperación, Serie 1.

Hormigón	Bastidor	Posición	Id elem	IF_a (%)	F_a (kN)	w_{ct}^{ff} (mm)	w_{cui} (mm)	w_{cud} (mm)	w_{cut} (mm)
I-80/35-40-10	1	1	1	60.9	17.0	0.511*	-	-	0.214
		2	2	54.9	17.6	0.452*	-	-	0.180
		3	3	54.2	18.2	0.282*	-	-	0.103
I-80/35-70-10	2	1	4	61.9	35.3	0.556	0.220	0.042	0.263
		2	5	59.2	35.9	0.687	0.218	0.048	0.266
		3	6	59.2	36.5	0.293	0.109	0.048	0.157
I-80/35-70-10	3	1	7	81.0	40.1	1.116	0.262	0.052	0.314
		2	8	82.2	40.7	1.150	0.265	0.049	0.314
		3	9	81.3	41.3	0.588	0.206	0.046	0.252
II-65/40-40-20	4	1	10	56.2	9.0	0.481	0.156	0.023	0.179
		2	11	60.4	9.5	0.368	0.127	0.024	0.151
		3	12	70.8	10.1	0.371	0.089	0.012	0.102
II-50/30-40-10	5	1	13	76.3	9.8	0.754	0.111	0.009	0.120
		2	14	57.7	10.4	0.309	0.086	0.032	0.118
		3	15	54.4	11.0	0.263	0.068	0.015	0.083

* obtenidos mediante regresiones.

Tabla 6.49. Resultados de abertura de fisura en etapa de descarga y recuperación, Serie 2.

Hormigón	Bastidor	Posición	Id elem	IF_a (%)	F_a (kN)	W_{ct}^{ff} (mm)	W_{cui} (mm)	W_{cud} (mm)	W_{cut} (mm)
II-50/30-40-10	1	1	-	-	-	-	-	-	-
		2	20	72.9	14.9	1.652	0.114	0.034	0.148
		3	18	72.4	15.4	0.694	0.147	0.052	0.200
I-80/35-40-10	2	1	21	97.0	30.6	1.573	0.272	0.049	0.321
		2	22	81.9	31.2	1.052	0.240	0.049	0.289
		3	23	70.5	31.8	0.358	0.155	0.044	0.199
I-80/35-40-10	3	1	24	82.9	34.1	1.723	0.309	0.045	0.353
		2	25	81.0	34.6	1.704	0.326	0.060	0.386
		3	26	77.4	35.2	1.055	0.293	0.056	0.349
I-80/35-70-10	4	1	30	93.7	47.4	2.016	0.362	0.063	0.425
		2	31	92.1	48.0	1.780	0.332	0.066	0.398
		3	29	80.9	48.6	0.677	0.318	0.063	0.380
II-45/50-40-20	5	1	32	97.2	16.5	0.967	0.148	0.029	0.177
		2	33	80.2	17.1	1.021	0.177	0.037	0.214
		3	34	78.3	17.7	0.527	0.120	0.043	0.163

Tabla 6.50. Resultados de abertura de fisura en etapa de descarga y recuperación, Serie 3.

Hormigón	Bastidor	Posición	Id elem	IF_a (%)	F_a (kN)	W_{ct}^{ff} (mm)	W_{cui} (mm)	W_{cud} (mm)	W_{cut} (mm)
II-45/50-40-20	1	1	35	90.9	18.7	1.471	0.182	0.001	0.183
		2	36	84.4	19.2	1.284	0.127	0.004	0.131
		3	37	75.1	19.8	0.884	0.146	0.009	0.155
II-80/50-40-20	2	1	38	88.1	20.5	1.152	0.236	0.022	0.258
		2	39	82.5	21.1	0.963	0.136	0.008	0.144
		3	40	82.2	21.7	0.664	0.105	0.011	0.116
I-80/50-40-10	3	1	-	-	-	-	-	-	-
		2	41	79.6	28.5	0.834	0.293	0.016	0.309
		3	42	78.8	29.1	0.675	0.191	0.006	0.197
II-2 ϕ 6-20	4	1	43	79.8	33.1	0.667	0.310	0.023	0.333
		2	44	80.0	33.7	0.703	0.324	0.020	0.344
		3	45	82.2	34.3	0.774	0.310	0.021	0.331
I-2 ϕ 8-10	5	1	46	87.6	54.3	1.284	0.707	0.051	0.758
		2	47	81.6	54.9	0.964	0.518	0.032	0.550
		3	48	75.1	55.5	0.452	0.259	0.016	0.275

La Figura 6.71 muestra la evolución de las deformaciones en compresión del hormigón ε_c en las etapas de carga, descarga y recuperación. En ella se indican:

ε_{ct}^{ff} : deformación en compresión total en el instante previo a la descarga (tiempo final t_f) (‰).

ε_{cr}^{ff} : deformación en compresión residual al final del ensayo de fluencia (tiempo t_f), después de la etapa de recuperación (‰).

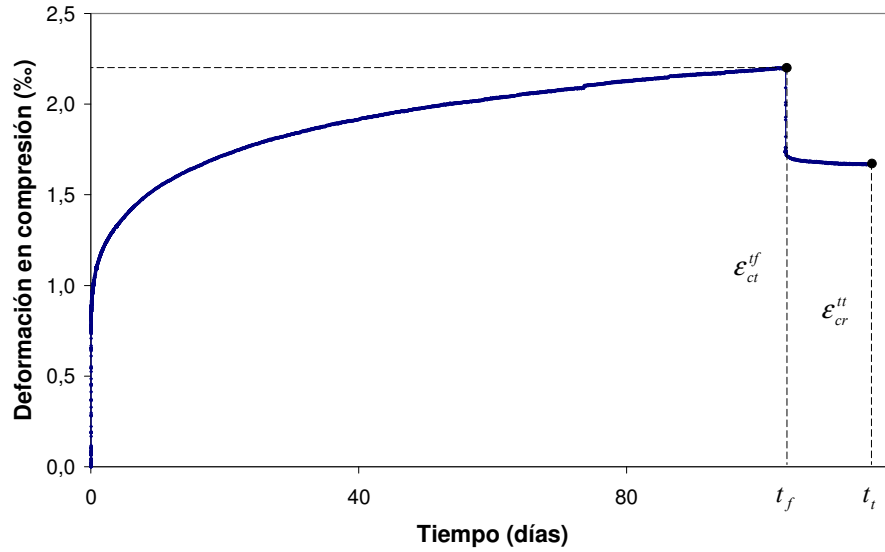


Figura 6.71. Evolución de la deformación en compresión con el tiempo en etapas de carga, descarga y recuperación en Tipo I-80/35-40-10 (Serie 2, Bastidor 3, Probeta 3).

En la Figura 6.72 se muestra la evolución de la deformación en compresión del hormigón ε_c en las etapas de descarga y recuperación. En ella se indican los siguientes parámetros:

- ε_{cui} : deformación en compresión inicial recuperada al descargar (tras estabilizar la descarga durante 1 minuto) (‰).
- ε_{cud} : deformación en compresión diferida recuperada durante la etapa de recuperación (‰).
- ε_{cut} : deformación en compresión total recuperada (‰), que se puede expresar como:

$$\varepsilon_{cut} = \varepsilon_{cui} + \varepsilon_{cud}$$

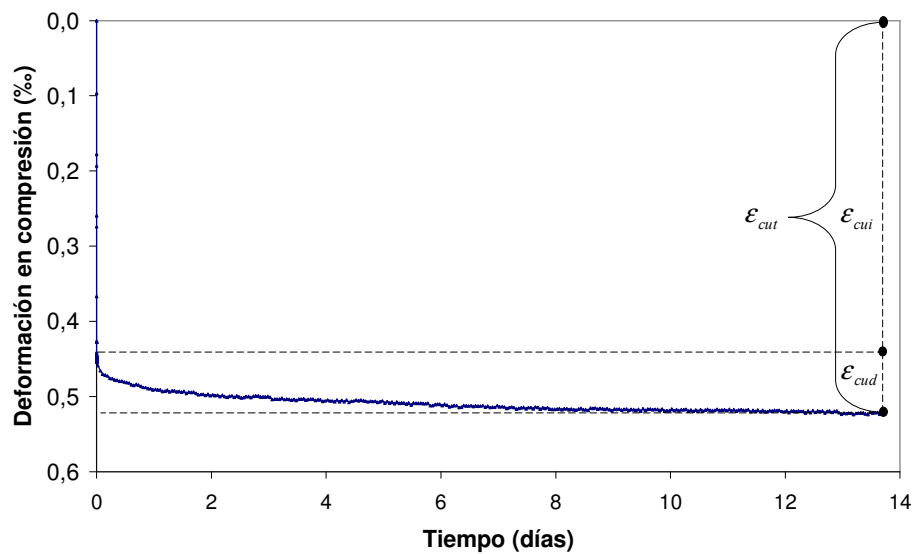


Figura 6.72. Evolución de la deformación en compresión con el tiempo en etapa de descarga y recuperación en Tipo I-80/35-40-10 (Serie 2, Bastidor 3, Probeta 3).

Se presenta un resumen de los resultados de las deformaciones en compresión la Tabla 6.51, en la que se indica: el hormigón, el bastidor, la posición del elemento, y los términos ϵ_{ct}^{ff} , ϵ_{cui} , ϵ_{cud} y ϵ_{cut} .

Tabla 6.51. Resultados de descarga y recuperación, para deformaciones en compresión.

Serie	Hormigón	Bastidor	Posición	Deformaciones en compresión (‰)			
				ϵ_{ct}^{ff}	ϵ_{cui}	ϵ_{cud}	ϵ_{cut}
2	I-80/35-40-10	2	3	1.402	0.325	0.073	0.398
	I-80/35-40-10 (1.5 mm)	3		2.199	0.458	0.102	0.561
	I-80/35-70-10	4		1.530	0.585	0.127	0.712
3	I-80/50-40-10	3	2	1.648	0.386	0.052	0.438
	I-2fi8-10	5		2.113	0.879	0.081	0.960
2	II-45/50-40-20	5	3	1.473	0.224	0.057	0.282
3	II-45/50-40-20	1		1.753	0.240	0.039	0.279
	II-80/50-40-20	2		2.003	0.282	0.042	0.324
	II-2fi6-20	4		1.989	0.504	0.053	0.557

6.6. ROTURA POST-FLUENCIA

6.6.1. RESULTADOS DE ENSAYOS DE ROTURA (POST-FLUENCIA) A FLEXOTRACCIÓN

Con posterioridad a la realización de los ensayos de fluencia, se han realizado ensayos a rotura de los elementos que se retiran de los bastidores.

La Figura 6.73 presenta una muestra representativa de resultados correspondientes a tres comportamientos típicos observados a partir de las curvas carga-abertura de fisura (referida exclusivamente al ensayo de rotura post-fluencia) de los ensayos de rotura.

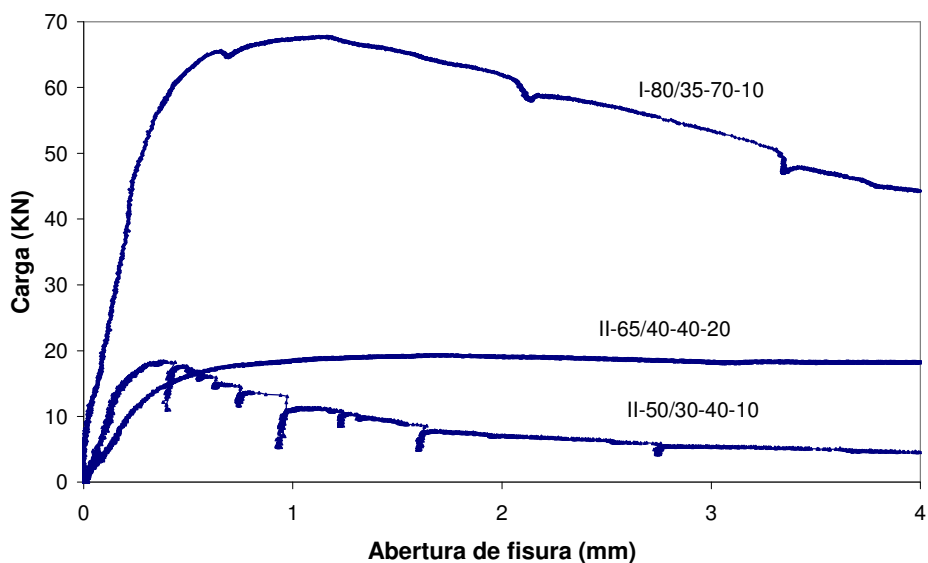


Figura 6.73. Comportamientos típicos para roturas post-fluencia.

El elemento I-80/35-70-10 (Serie 1, Bastidor 2, Probeta 1) presenta una rama ascendente hasta soportar una carga máxima de casi 70 kN, después empieza a reducir lentamente esa capacidad residual de carga, llegando a los 4 mm con una capacidad resistente mayor del 50% de la carga máxima (de alrededor de 45 kN).

El elemento II-65/40-40-20 (Serie 1, Bastidor 4, Probeta 1) registra una rama ascendente hasta alcanzar un valor de carga que mantiene prácticamente constante a lo largo del ensayo (hasta una abertura de fisura de 4 mm).

El elemento II-50/30-40-10 (Serie 1, Bastidor 5, Probeta 3) presenta una rama ascendente hasta llegar a un valor de carga máxima (20 kN aproximadamente), seguida de una rama de descenso perdiendo considerablemente su capacidad resistente, llegando a los 4 mm con el 25% de la carga máxima.

En las Tablas 6.52, 6.53 y 6.54 se presenta para cada una de las series los valores de las resistencias residuales definidas por la UNE-EN 14651:2007 + A1:2008, donde:

- $f_{R,1}$: resistencia residual a flexión en tracción para $w=0.5$ mm.
- $f_{R,2}$: resistencia residual a flexión en tracción para $w=1.5$ mm.
- $f_{R,3}$: resistencia residual a flexión en tracción para $w=2.5$ mm.
- $f_{R,4}$: resistencia residual a flexión en tracción para $w=3.5$ mm.
- $f_{R,max}$: resistencia residual a flexión en tracción para carga máxima.
- $w_{f,max}$: abertura de fisura a la que se presentan la carga máxima.

Las aberturas de fisura están referenciadas al inicio del ensayo de rotura post-fluencia.

Tabla 6.52. Resultados de ensayos de rotura post-fluencia, Serie 1.

Hormigón	Bastidor	Id elem	Resistencias residuales (MPa)					$w_{f,max}$ (mm)
			$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$	$f_{R,max}$	
I-80/35-40-10	1	1	5.13	5.63	5.38	4.81	5.67	1.486
		2	6.65	7.37	6.94	5.98	7.58	1.261
		3	7.06	7.26	6.51	5.41	7.66	1.032
I-80/35-70-10	2	4	12.04	12.60	11.00	9.11	13.01	1.171
		5	11.48	12.13	10.94	9.62	12.45	1.246
		6	11.86	11.61	10.45	8.56	12.76	0.770
I-80/35-70-10	3	7	9.21	10.03	9.60	8.49	10.16	0.876
		8	9.68	10.66	9.80	8.91	10.95	1.220
		9	10.43	11.65	9.96	8.89	11.85	1.241
II-65/40-40-20	4	10	3.09	3.66	3.60	3.52	3.72	1.721
		11	3.30	3.98	4.04	3.89	4.09	2.060
		12	3.10	3.70	3.83	3.77	3.86	2.211
II-50/30-40-10	5	13	1.67	-	-	-	1.87	0.308
		14	-	-	-	-	3.00	0.276
		15	3.25	1.75	1.23	0.97	3.53	0.382

Tabla 6.53. Resultados de ensayos de rotura post-fluencia, Serie 2.

Hormigón	Bastidor	Id elem	Resistencias residuales (MPa)					$w_{f \max}$ (mm)
			$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$	$f_{R,\max}$	
II-50/30-40-10	1	-	-	-	-	-	-	-
		20	-	-	-	-	1.76	0.404
		18	3.05	-	-	-	3.17	0.381
I-80/35-40-10	2	21	5.56	-	-	-	6.39	0.903
		22	7.21	7.89	-	-	8.21	0.812
		23	9.09	9.56	8.20	7.81	9.86	0.783
I-80/35-40-10	3	24	5.84	5.90	5.32	5.35	6.19	1.231
		25	5.77	6.22	6.32	6.00	6.73	1.152
		26	5.97	7.32	7.03	6.61	7.45	1.796
I-80/35-70-10	4	30	9.21	10.06	9.04	8.35	10.22	1.088
		31	9.69	10.33	9.59	8.91	10.64	1.190
		29	10.23	11.55	11.10	10.27	11.75	1.721
II-45/50-40-20	5	32	3.31	3.73	3.67	3.51	3.82	1.554
		33	3.93	4.92	4.91	4.67	5.00	2.114
		34	4.58	6.06	5.21	5.12	6.06	1.396

Tabla 6.54. Resultados de ensayos de rotura post-fluencia, Serie 3.

Hormigón	Bastidor	Id elem	Resistencias residuales (MPa)					$w_{f \max}$ (mm)
			$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$	$f_{R,\max}$	
II-45/50-40-20	1	35	3.26	4.15	4.08	4.08	4.20	1.333
		36	4.13	4.96	5.40	4.72	5.43	1.221
		37	4.42	5.04	5.19	5.24	5.56	1.221
II-80/50-40-20	2	38	4.55	6.34	6.28	5.06	6.54	1.433
		39	4.78	6.42	6.63	5.95	6.79	1.915
		40	5.14	6.26	6.30	4.85	7.36	2.170
I-80/50-40-10	3	-	-	-	-	-	-	-
		41	6.30	8.83	7.95	7.02	9.04	1.254
		42	5.79	8.05	-	-	8.14	1.360
II-2fi6-20	4	43	8.59	11.13	11.41	12.08	12.21	4.000
		44	9.15	11.21	11.80	12.11	12.22	4.000
		45	7.54	11.58	12.36	12.86	12.96	3.780
I-2fi8-10	5	46	7.12	15.75	16.77	16.81	17.14	4.000
		47	10.39	16.66	17.84	18.61	18.85	4.000
		48	16.38	18.41	19.58	20.39	20.72	4.000

Tabla 6.55. Valores de deformaciones en compresión, equivalentes a los valores de abertura de fisura para los que se evalúan las resistencias residuales.

Serie	Hormigón	Bastidor	Id elem	ϵ_c (%) para w (mm)				
				0.5	1.5	2.5	3.5	$w_{f \max}$
2	I-80/35-40-10	2	23	0.772	1.261	1.784	2.169	1.005
	I-80/35-40-10	3	26	0.607	1.268	1.718	2.069	1.423
	I-80/35-70-10	4	29	0.803	1.569	2.140	2.602	1.725
	II-45/50-40-20	5	34	0.685	1.363	1.773	2.149	1.323
3	II-45/50-40-20	1	37	0.544	0.702	1.080	1.320	1.009
	II-80/50-40-20	2	40	0.704	1.428	2.018	2.482	1.920
	I-80/50-40-10	3	41	0.627	1.162	1.922	2.259	1.271
	II-2fi6-20	4	45	0.707	1.250	1.661	1.952	2.208
	I-2fi8-10	5	47	0.822	1.157	1.650	2.007	2.239

Los resultados de los ensayos de rotura sobre la curva completa (incluyendo proceso de prefisuración, etapas de carga, descarga y recuperación, y rotura post-fluencia), con inclusión de la carga máxima de rotura $F_{p\max}$ y los valores de resistencias residuales $f_{R,j}$, se presentan en los gráficos y fichas de ensayo para cada probeta en el Anejo 5.

6.7. ANÁLISIS PARAMÉTRICO

6.7.1. PROCESO DE PREFISURACIÓN

6.7.1.1. Influencia del tipo de hormigón

La Tabla 6.56 presenta los valores medios de los resultados obtenidos del proceso de prefisuración para los elementos I-80/50-40-10 y II-80/50-40-20.

Tabla 6.56. Valores medios de parámetros resultantes de proceso de prefisuración para los elementos I-80/50-40-10 y II-80/50-40-20.

Hormigón	F_L	F_w	$\frac{F_w}{F_L}$	w_p	w_{pr}	$\frac{w_p - w_{pr}}{w_p}$	ε_p	ε_{pr}	$\frac{\varepsilon_p - \varepsilon_{pr}}{\varepsilon_p}$
	(kN)		F_L	(mm)		w_p	(‰)		ε_p
I-80/50-40-10	27.6	37.2	1.34	0.513	0.254	0.50	0.769	0.260	0.66
II-80/50-40-20	21.1	23.3	1.10	0.511	0.282	0.45	0.741	0.301	0.59

En los ensayos de prefisuración (para w_n de 0.5 mm) los elementos I-80/50-40-10 han presentado, para mayores valores de F_w , menores valores de abertura de fisura residual y deformación residual, y mayor capacidad de recuperación de abertura de fisura y deformación en compresión, en comparación con los elementos II-80/50-40-20.

El mejor comportamiento por parte de los elementos I-80/50-40-10 respecto de los elementos II-80/50-40-20 se puede atribuir al hecho de que el primero posee un módulo de deformación sensiblemente mayor (ver Tabla 6.3) y a una mayor resistencia adherente para las fibras de los elementos I-80/50-40-10 (debida a una mayor resistencia en compresión, como se presenta en Tabla 6.3), que permite que las fibras soporten mayores niveles tensionales sin deslizamiento y mantengan una menor altura de fisura.

6.7.1.2. Influencia del tipo de fibras

La Tabla 6.57 presenta los valores medios de los resultados obtenidos del proceso de prefisuración para los elementos I-80/35-40-10 y I-80/50-40-10.

Para fibras de esbeltez 80 y longitudes de 35 mm y 50 mm se tiene aproximadamente 24500 y 8500 fibras por kilo adicionado al hormigón, respectivamente. La mayor capacidad resistente al nivel de prefisura F_w y

mayor capacidad de recuperación de la abertura de fisura para I-80/50-40-10, indica que la longitud de las fibras es más influyente que la cantidad de fibras por kilo adicionado. La mayor longitud de las fibras de 50 mm demanda mayores niveles tensionales para llegar a la pérdida de adherencia y llevar al deslizamiento la fibra, lo que ha dotado a los elementos de una mayor capacidad de carga y recuperación.

Tabla 6.57. Valores medios de parámetros resultantes del proceso de prefisuración para los elementos I-80/35-40-10 y I-80/50-40-10.

Hormigón	F_L (kN)	F_w (kN)	$\frac{F_w}{F_L}$	w_p (mm)	w_{pr} (mm)	$\frac{w_p - w_{pr}}{w_p}$
I-80/35-40-10	29.2	34.7	1.18	0.509	0.287	0.44
I-80/50-40-10	27.6	37.2	1.34	0.513	0.254	0.50

La Tabla 6.58 presenta los valores medios de los resultados obtenidos del proceso de prefisuración para los hormigones Tipo II con fibras.

Tabla 6.58. Valores medios de parámetros resultantes del proceso de prefisuración para los elementos Tipo II con fibras.

Hormigón	F_L (kN)	F_w (kN)	$\frac{F_w}{F_L}$	w_p (mm)	w_{pr} (mm)	$\frac{w_p - w_{pr}}{w_p}$
II-80/50-40-20	21.1	23.3	1.10	0.513	0.254	0.50
II-65/40-40-20	19.0	15.0	0.79	0.553	0.380	0.32
II-45/50-40-20	22.6	20.3	0.90	0.510	0.351	0.31
II-50/30-40-10	23.3	18.5	0.79	0.512	0.371	0.28

El mayor valor de F_w y la mayor capacidad de recuperación la han presentado los elementos con las fibras más esbeltas y largas (II-80/50-40-20). Esta combinación hace que se presente el mejor comportamiento en la respuesta post-fisura (mayores resistencias residuales, ver Figura 5.6).

Los elementos II-45/50-40-20 se han comportado mejor que los II-65/40-40-20 según los parámetros de análisis presentados en la Tabla 6.58, excepto en lo relativo a la capacidad de recuperación (en la cual tienen valores muy similares). En este caso han intervenido varios efectos combinados. El efecto favorable de la mayor longitud podría haber sido compensado por el desfavorable de la menor esbeltez. A todo esto se ha añadido el efecto de la menor resistencia a primera fisura y a compresión para el II-65/40-40-20.

El comportamiento menos bueno para todos los criterios de análisis lo presentan los elementos II-50/30-40-10, que incorporan fibras de esbeltez 50, la segunda más baja, y longitud de 30 mm, siendo la única fibra de corte de lámina (fibra que adicionada al hormigón ha presentado la peor respuesta mecánica a flexotracción de las fibras empleadas, véanse Figuras 5.5 y 5.6) y no posee extremos conformados, dos factores que hacen que su adherencia al hormigón sea menos eficiente.

La Tabla 6.59 presenta los valores medios de los resultados de las deformaciones en compresión obtenidos del proceso de prefisuración para los elementos II-80/50-40-20 y II-45/50-40-20.

Tabla 6.59. Valores medios de deformaciones en compresión en el proceso de prefisuración para los elementos II-80/50-40-20 y II-45/50-40-20.

Hormigón	F_L (kN)	F_w (kN)	$\frac{F_w}{F_L}$	ε_p (‰)	ε_{pr} (‰)	$\frac{\varepsilon_p - \varepsilon_{pr}}{\varepsilon_p}$
II-80/50-40-20	20.5	22.1	1.08	0.769	0.260	0.66
II-45/50-40-20	23.8	31.0	1.30	0.802	0.388	0.52

Respecto de los resultados de las deformaciones en compresión obtenidos del proceso de prefisuración para los elementos II-80/50-40-20 y II-45/50-40-20, la capacidad de recuperación es mayor debido esencialmente a la mayor cantidad de fibras presentes por kilo adicionado y las características geométricas superiores (esbeltez 80).

6.7.1.3. Influencia del contenido de fibras

La Tabla 6.60 presenta los valores medios de los resultados obtenidos del proceso de prefisuración para los elementos I-80/35-40-10 y I-80/35-70-10.

Tabla 6.60. Valores medios de parámetros resultantes del proceso de prefisuración para los elementos I-80/35-40-10 y I-80/35-70-10.

Hormigón	F_L (kN)	F_w (kN)	$\frac{F_w}{F_L}$	w_p (mm)	w_{pr} (mm)	$\frac{w_p - w_{pr}}{w_p}$
I-80/35-40-10	29.2	34.7	1.19	0.509	0.287	0.44
I-80/35-70-10	33.5	53.8	1.61	0.511	0.242	0.53

Como era de esperar para una dosificación de 70 kg/m³ se han presentado mayores valores de carga de primera fisura F_L , mayores valores de carga soportada a nivel de abertura de prefisura F_w y mayor capacidad de recuperación. La mayor presencia de fibras cosiendo la fisura genera este comportamiento.

6.7.1.4. Influencia de la abertura de fisura

La Tabla 6.61 presenta los valores medios de los resultados obtenidos del proceso de prefisuración para los elementos con diferentes valores de abertura de prefisuración w_p .

Para los tres hormigones analizados, se observa claramente que un incremento de la abertura de fisura conlleva una pérdida de tensión de adherencia y una menor capacidad de recuperación.

Tabla 6.61. Valores medios de parámetros resultantes del proceso de prefisuración para los elementos I-80/35-40-10, I-80/50-40-10 y II-65/40-40-20.

Hormigón	Valores medios						Nº elementos ensayados
	F_L (kN)	F_w (kN)	$\frac{F_w}{F_L}$	w_p (mm)	w_{pr} (mm)	$\frac{w_p - w_{pr}}{w_p}$	
I-80/35-40-10	29.2	34.7	1.19	0.509	0.287	0.44	6
	30.9	43.1	1.39	1.505	1.092	0.27	3
I-80/50-40-10	27.6	37.2	1.35	0.513	0.254	0.50	2
	30.2	32.8	1.09	1.110	0.738	0.34	1
II-65/40-40-20	19.0	15.0	0.79	0.553	0.380	0.32	2
	20.7	15.9	0.77	0.992	0.801	0.19	1

6.7.2. FLUENCIA EN ETAPA DE CARGA

6.7.2.1. Influencia del tipo hormigón

La Tabla 6.62 presenta los resultados de las aberturas de fisura y deformaciones en compresión del hormigón obtenidos en la etapa de carga del ensayo de fluencia para los elementos I-80/50-40-10 y II-80/50-40-20.

Tabla 6.62. Aberturas de fisura y deformaciones en compresión para los elementos I-80/50-40-10 y II-80/50-40-20.

Hormigón	Posición	IF_a (%)	F_a (kN)	w_{ci}	w_{cd}^{90}	w_{ct}^{90}	ϵ_{ci}	ϵ_{cd}^{90}	ϵ_{ct}^{90}
				(mm)			(‰)		
I-80/50-40-10	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	79.6	28.5	0.457	0.334	0.791	0.637	0.845	1.482
	3	78.8	29.1	0.306	0.332	0.637	-	-	-
	Media	79.2	28.8	0.381	0.333	0.714	-	-	-
II-80/50-40-20	1	88.1	20.5	0.506	0.585	1.091	-	-	-
	2	82.5	21.1	0.401	0.497	0.898	-	-	-
	3	82.2	21.7	0.220	0.406	0.625	0.506	1.268	1.773
	Media	84.3	21.1	0.375	0.496	0.871	-	-	-

El hormigón Tipo II ha presentado menores valores de abertura de fisura inicial y deformación en compresión inicial y mayores valores de abertura de fisura diferida y deformación en compresión diferida. En ambos casos para valores de IF_a alrededor del 80%, pero con valores de F_a mayores para el I-80/50-40-10. La menor resistencia de adherencia de los elementos II-80/50-40-20 (debido a la menor calidad del hormigón), se refleja en mayores valores de abertura de fisura diferida, generan un mayor incremento en la altura de fisura y una menor altura de la zona de compresión, llevando a mayores niveles tensionales y por ende mayores deformaciones diferidas inducidas, y todo ello a pesar de una menor carga aplicada.

6.7.2.2. Influencia del tipo de fibras

La Tabla 6.63 presenta los resultados de las aberturas de fisura y deformaciones en compresión obtenidos en la etapa de carga del ensayo de fluencia para los elementos I-80/35-40-10 y I-80/50-40-10.

Tabla 6.63. Aberturas de fisura y deformaciones en compresión para los elementos I-80/35-40-10 y I-80/50-40-10.

Hormigón	Id elemento	IF_a (%)	F_a (kN)	w_{ci}	w_{cd}^{90}	w_{ct}^{90}	ϵ_{ci}	ϵ_{cd}^{90}	ϵ_{ct}^{90}
				(mm)			(‰)		
I-80/35-40-10	23	70.5	31.8	0.207	0.146	0.353	0.447	0.926	1.373
	22	81.9	31.2	0.544	0.496	1.041	-	-	-
I-80/50-40-10	42	78.8	29.1	0.306	0.332	0.637	-	-	-
	41	79.6	28.5	0.457	0.334	0.791	0.637	0.845	1.482

Comparando el elemento 22 con el 41 y 42 (que tienen niveles de carga IF_a similares), los elementos con fibras Dramix RC 80/50 BN presentan menores valores de w_{ci} , w_{cd}^{90} y w_{ct}^{90} . La mayor longitud de la fibra aporta una mayor resistencia a la pérdida de adherencia y al deslizamiento, que se muestra más efectiva que el efecto producido por un mayor número de fibras por kilogramo adicionado al hormigón para el caso de las fibras Dramix RC 80/35 BN.

Para los dos elementos a los que se les ha medido deformaciones en compresión, las deformaciones instantáneas parecen haber sido influenciadas por el valor del IF_a , mientras que el ϵ_{cd}^{90} por el valor de F_a .

En las Figuras 6.74 a 6.79 se muestran los resultados de las aberturas de fisura en función del índice de carga aplicado IF_a y de la carga aplicada F_a , obtenidos en la etapa de carga del ensayo de fluencia para los elementos Tipo II reforzados con fibras.

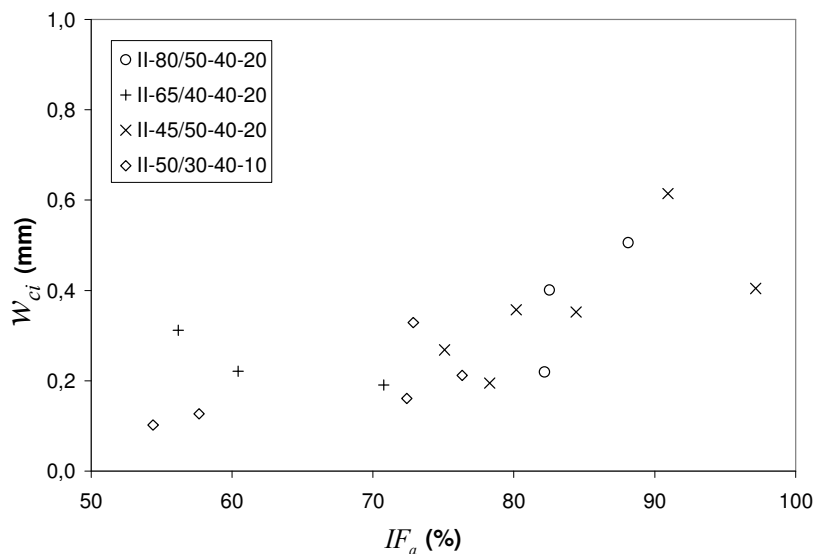


Figura 6.74. w_{ci} vs. IF_a para SFRC Tipo II.

Todos los hormigones presentados en la Figura 6.74, excepto el II-65/40-40-20, muestran una tendencia a experimentar mayores valores de abertura de fisura inicial w_{ci} para mayores valores de índice de carga aplicado IF_a .

En la Figura 6.75 se aprecia una tendencia general (para cada tipo de fibra) a presentar mayores valores de abertura de fisura inicial w_{ci} para mayores valores de carga aplicada F_a , aunque esta tendencia es menos clara que en la influencia de IF_a debido a la dispersión en las propiedades del SFRC a flexión.

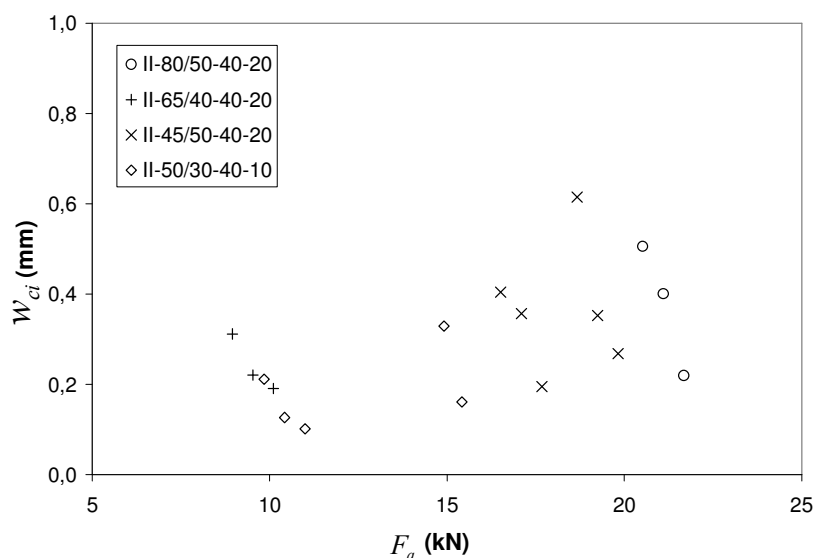


Figura 6.75. w_{ci} vs. F_a para SFRC Tipo II.

En las Figuras 6.76 a 6.79 se puede observar que los elementos II-80/50-40-20 y II-65/40-40-20 presentan valores de abertura de fisura diferida w_{cd}^{90} menos dispersos que los otros hormigones analizados. Además, los elementos II-80/50-40-20 presentan menores valores de abertura de fisura diferida w_{cd}^{90} respecto de la gran mayoría de los elementos con índices de carga IF_a y valores de carga aplicada F_a del mismo nivel o menores.

Por el contrario, las fibras 45/50, y sobre todo las 50/30, dan claros síntomas de tendencias a importantes deformaciones de fluencia.

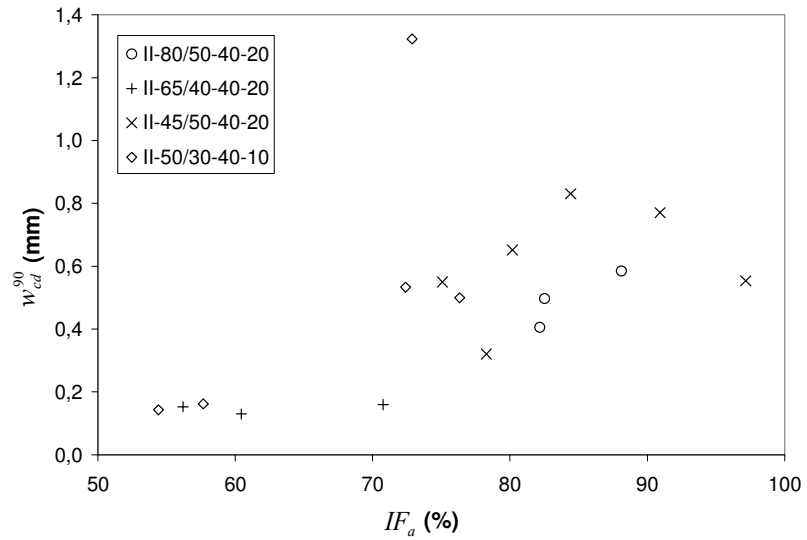


Figura 6.76. w_{cd}^{90} vs. IF_a para SFRC Tipo II.

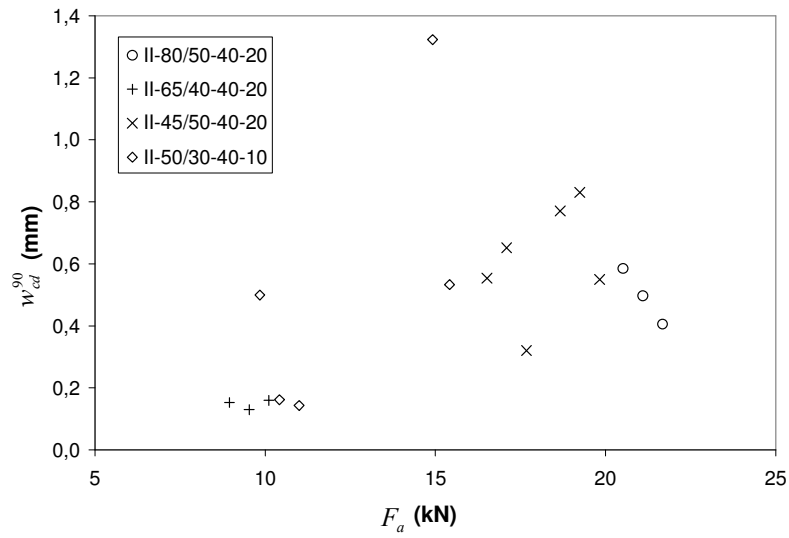


Figura 6.77. w_{cd}^{90} vs. F_a para SFRC Tipo II.

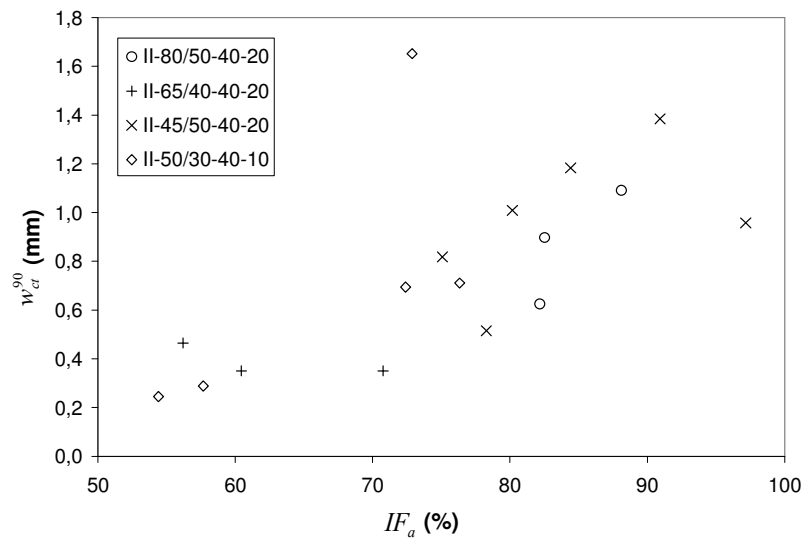


Figura 6.78. w_{ct}^{90} vs. IF_a para SFRC Tipo II.

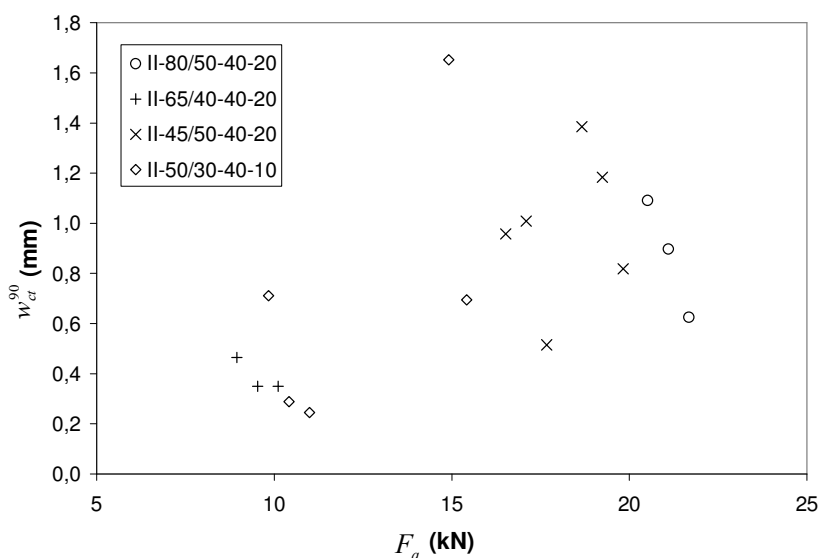


Figura 6.79. w_{ct}^{90} vs. F_a para SFRC Tipo II.

Finalmente, se presenta la Tabla 6.64 en la que figuran, además de los resultados relativos a las aberturas de fisura w_{ci} , w_{cd}^{90} y w_{ct}^{90} , los resultados correspondientes a las deformaciones en compresión ϵ_{ci} , ϵ_{cd}^{90} y ϵ_{ct}^{90} .

Tabla 6.64. Aberturas de fisura y deformaciones de compresión para los elementos con fibras y hormigón Tipo II.

Hormigón	Id elemento	IF_a (%)	F_a (kN)	w_{ci}	w_{cd}^{90}	w_{ct}^{90}	ϵ_{ci}	ϵ_{cd}^{90}	ϵ_{ct}^{90}
				(mm)			(‰)		
II-80/50-40-20	40	82.2	21.7	0.220	0.406	0.625	0.506	1.268	1.773
	39	82.5	21.1	0.401	0.497	0.898	-	-	-
	38	88.1	20.5	0.506	0.585	1.091	-	-	-
II-65/40-40-20	10*	56.2	9.0	0.312	0.153	0.465	-	-	-
	11	60.4	9.5	0.221	0.129	0.350	-	-	-
	12	70.8	10.1	0.191	0.160	0.351	-	-	-
II-45/50-40-20	37*	75.1	19.8	0.268	0.550	0.818	0.436	1.107	1.543
	34*	78.3	17.7	0.195	0.320	0.515	0.363	1.082	1.445
	33*	80.2	17.1	0.357	0.652	1.009	-	-	-
	36*	84.4	19.2	0.353	0.830	1.183	-	-	-
	35	90.9	18.7	0.615	0.770	1.385	-	-	-
	32*	97.2	16.5	0.404	0.553	0.958	-	-	-
II-50/30-40-10	15	54.4	11.0	0.102	0.143	0.245	-	-	-
	14	57.7	10.4	0.127	0.162	0.289	-	-	-
	18*	72.4	15.4	0.161	0.533	0.694	-	-	-
	20*	72.9	14.9	0.329	1.323	1.652	-	-	-
	13*	76.3	9.8	0.212	0.499	0.711	-	-	-

* elementos con aumentos súbitos de abertura de fisura.

En términos generales los elementos II-80/50-40-20 son los que mejor comportamiento presentan si se comparan las aberturas de fisura inicial w_{ci} , diferida w_{cd}^{90} y total w_{ct}^{90} con el índice de carga aplicada IF_a y la carga aplicada F_a , mostrando las otras fibras las tendencias ya comentadas anteriormente.

Respecto de las deformaciones en compresión de II-80/50-40-20 (elemento 40) y II-45/50-40-20 (elementos 34 y 37), el elemento 40 ha presentado menores valores de abertura de fisura inicial w_{ci} , diferida w_{cd}^{90} y total w_{ct}^{90} que el elemento 37, mientras que las deformaciones en compresión inicial ϵ_{ci} , diferida ϵ_{cd}^{90} y total ϵ_{ct}^{90} son mayores para el elemento 40. En estos casos parece evidente que las deformaciones de compresión y su evolución están más relacionadas con la carga aplicada (F_a) que con el tipo de fibras, siempre que se garantice la estabilidad del elemento.

6.7.2.3. Influencia del contenido de fibras

En las Figuras 6.80 a 6.85 y la Tabla 6.65 se muestran los resultados de las aberturas de fisura en función del índice de carga aplicado IF_a y de la carga aplicada F_a , obtenidos en la etapa de carga del ensayo de fluencia en carga para los elementos I-80/35-40-10 y I-80/35-70-10 (para $w_n = 0.5$).

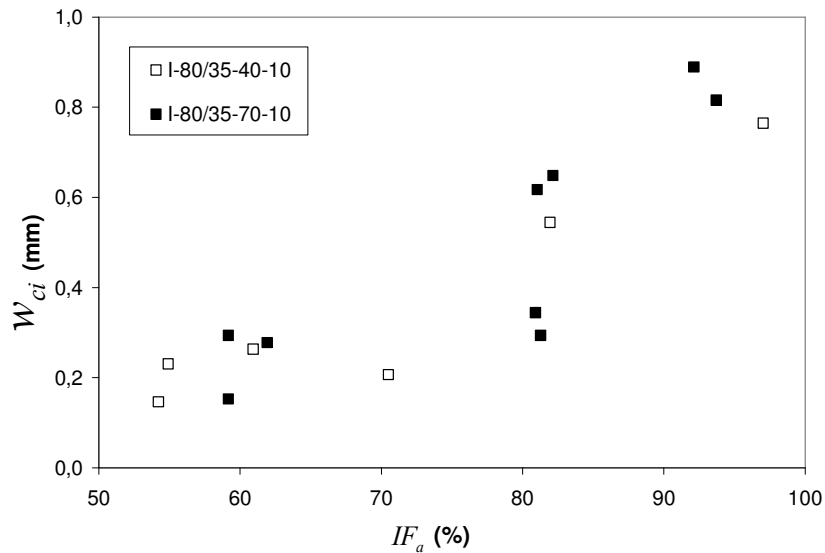


Figura 6.80. w_{ci} vs. IF_a para I-80/35-40-10 y I-80/35-70-10.

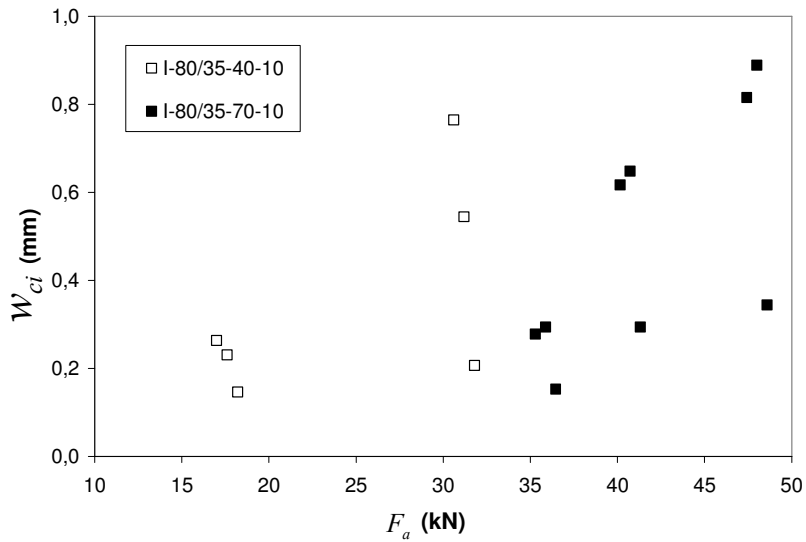


Figura 6.81. w_{ci} vs. F_a para I-80/35-40-10 y I-80/35-70-10.

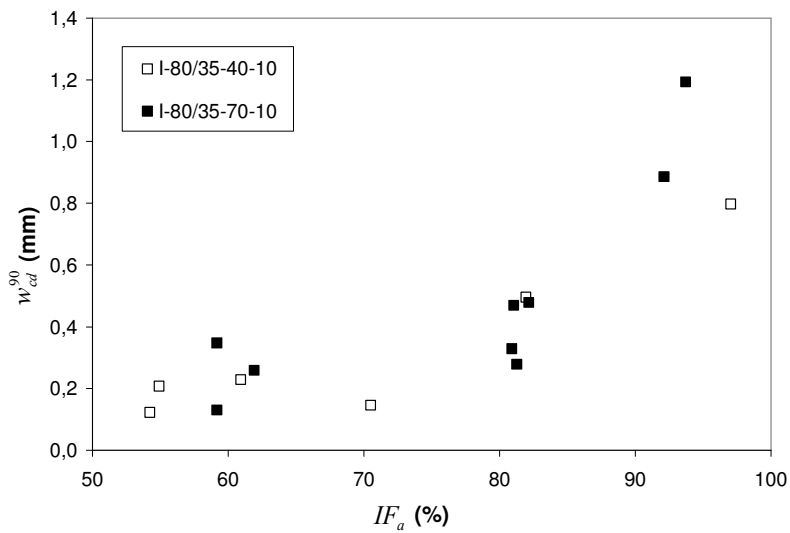


Figura 6.82. w_{cd}^{90} vs. IF_a para I-80/35-40-10 y I-80/35-70-10.

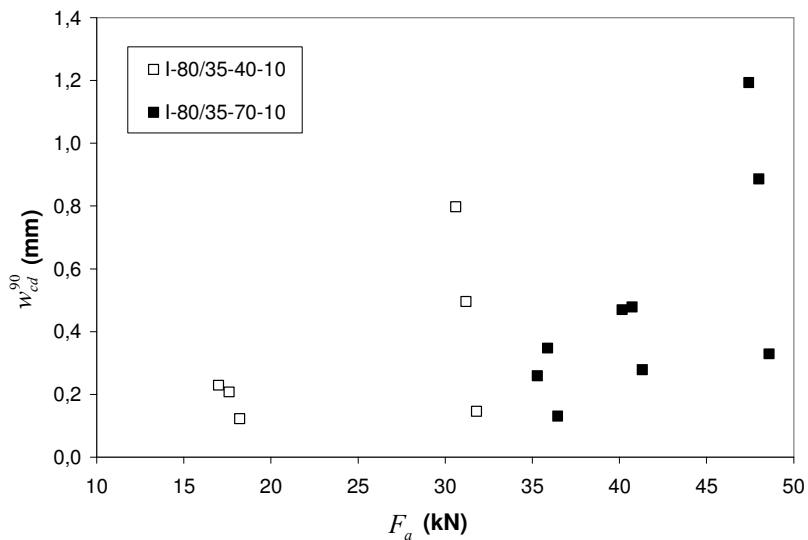


Figura 6.83. w_{cd}^{90} vs. F_a para I-80/35-40-10 y I-80/35-70-10.

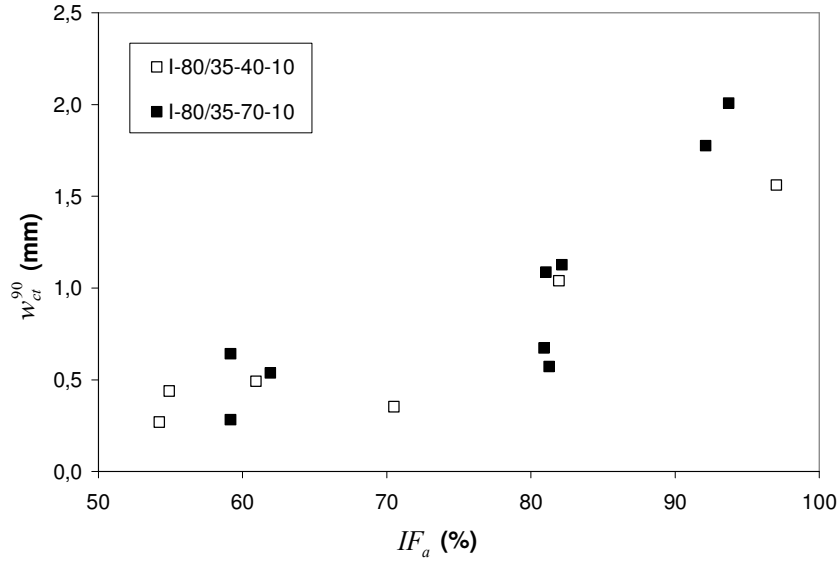


Figura 6.84. w_{ct}^{90} vs. IF_a para I-80/35-40-10 y I-80/35-70-10.

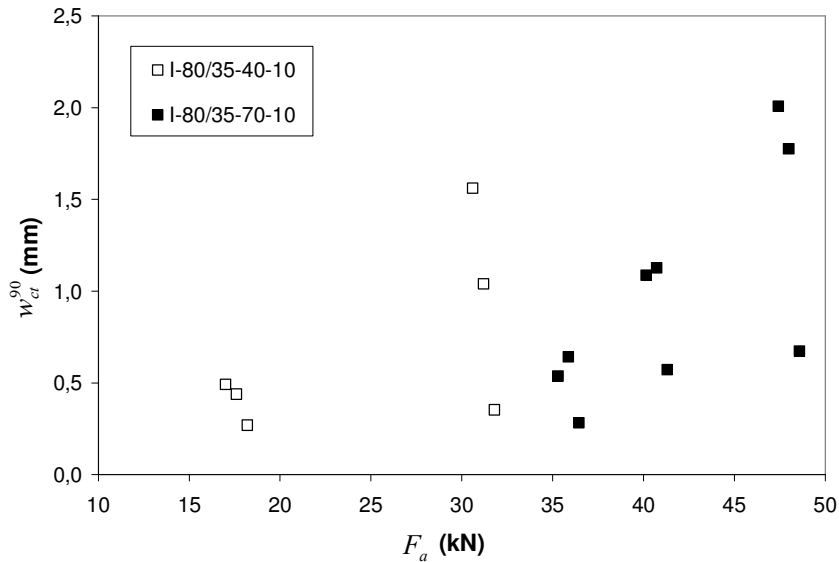


Figura 6.85. w_{ct}^{90} vs. F_a para I-80/35-40-10 y I-80/35-70-10.

Se observa para los dos contenidos de fibras, valores de abertura de fisura inicial w_{ci} similares (sensiblemente mayores para I-80/35-70-10) para índices de carga aplicada IF_a similares.

Los elementos con 70 kg/m^3 de fibras, presentan valores de w_{ci} , w_{cd}^{90} y w_{ct}^{90} similares a los de los elementos con 40 kg/m^3 de fibras con valores de carga aplicada F_a de casi el doble.

Respecto de las deformaciones en compresión (Tabla 6.65), el elemento 29 (I-80/35-70-10) ha presentado valores de ε_{ci} y ε_{ct}^{90} mayores, pero ε_{cd}^{90} menor

que el elemento 23 (I-80/35-40-10), siendo el índice de carga aplicada un 10% mayor y la carga aplicada un 30% mayor en el caso del elemento 29.

Tabla 6.65. Aberturas de fisura y deformaciones en compresión para los elementos I-80/35-40-10 y I-80/35-70-10.

Hormigón	Id elemento	IF_a (%)	F_a (kN)	w_{ci}	w_{cd}^{90}	w_{ct}^{90}	ϵ_{ci}	ϵ_{cd}^{90}	ϵ_{ct}^{90}
				(mm)			(‰)		
I-80/35-40-10	3	54.2	18.2	0.147	0.123	0.270	-	-	-
	2	54.9	17.6	0.231	0.208	0.439	-	-	-
	1	60.9	17.0	0.263	0.229	0.492	-	-	-
	23	70.5	31.8	0.207	0.146	0.353	0.447	0.926	1.373
	22	81.9	31.2	0.544	0.496	1.041	-	-	-
	21*	97.0	30.6	0.764	0.798	1.562	-	-	-
I-80/35-70-10	6	59.2	36.5	0.153	0.131	0.283	-	-	-
	5	59.2	35.9	0.294	0.348	0.642	-	-	-
	4	61.9	35.3	0.278	0.259	0.537	-	-	-
	29	80.9	48.6	0.344	0.329	0.674	0.672	0.851	1.523
	7*	81.0	40.1	0.617	0.470	1.087	-	-	-
	9	81.3	41.3	0.294	0.278	0.572	-	-	-
	8	82.2	40.7	0.649	0.479	1.127	-	-	-
	31*	92.1	48.0	0.889	0.887	1.776	-	-	-
30	93.7	47.4	0.816	1.193	2.009	-	-	-	

6.7.2.4. Influencia de la abertura de fisura

En las Figuras 6.86 a 6.91 y la Tabla 6.65 se presentan los resultados de los elementos I-80/35-40-10, obtenidos en la etapa de carga del ensayo de fluencia.

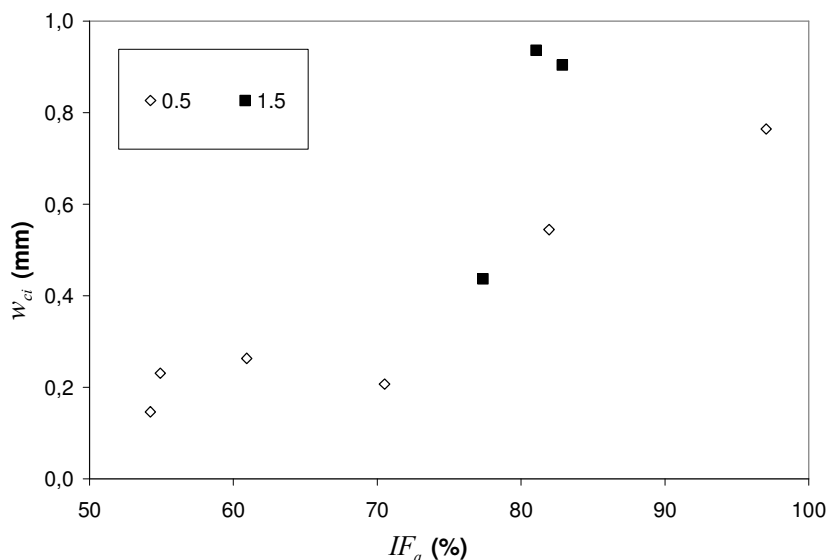


Figura 6.86. w_{ci} vs. IF_a para I-80/35-40-10 (influencia abertura de fisura).

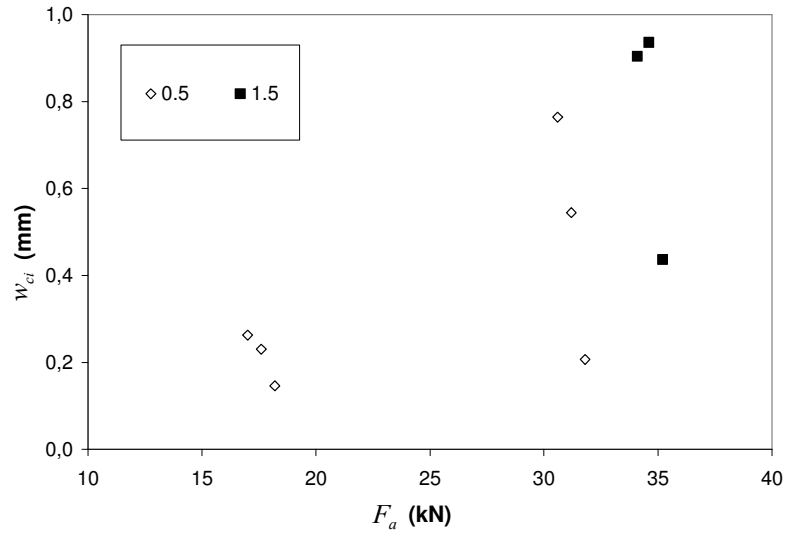


Figura 6.87. w_{ci} vs F_a para I-80/35-40-10 (influencia abertura de fisura).

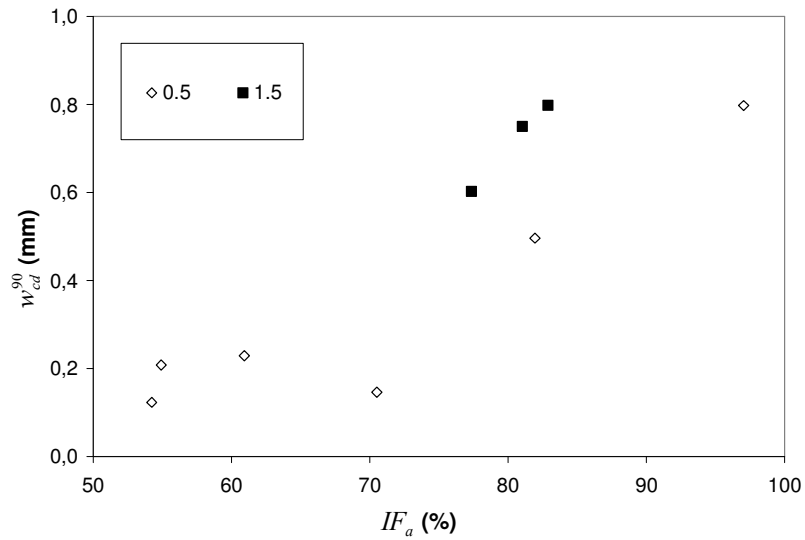


Figura 6.88. w_{cd}^{90} vs. IF_a para I-80/35-40-10 (influencia abertura de fisura).

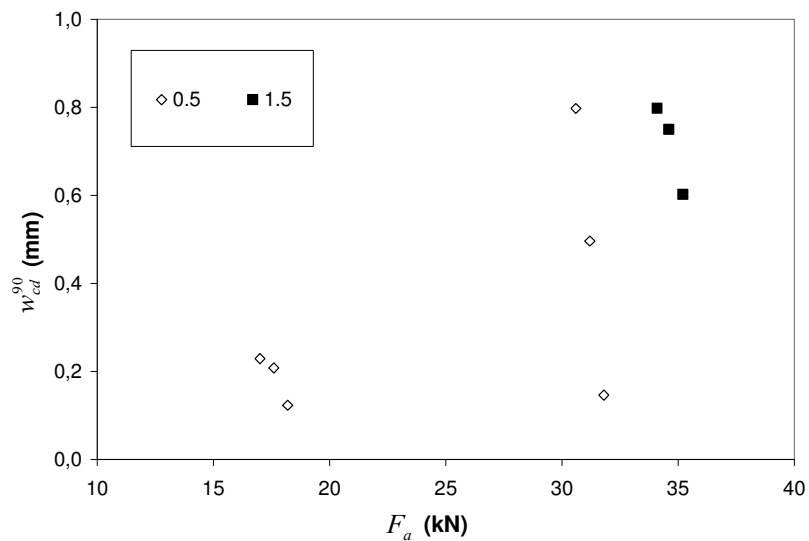


Figura 6.89. w_{cd}^{90} vs. F_a para I-80/35-40-10 (influencia abertura de fisura).

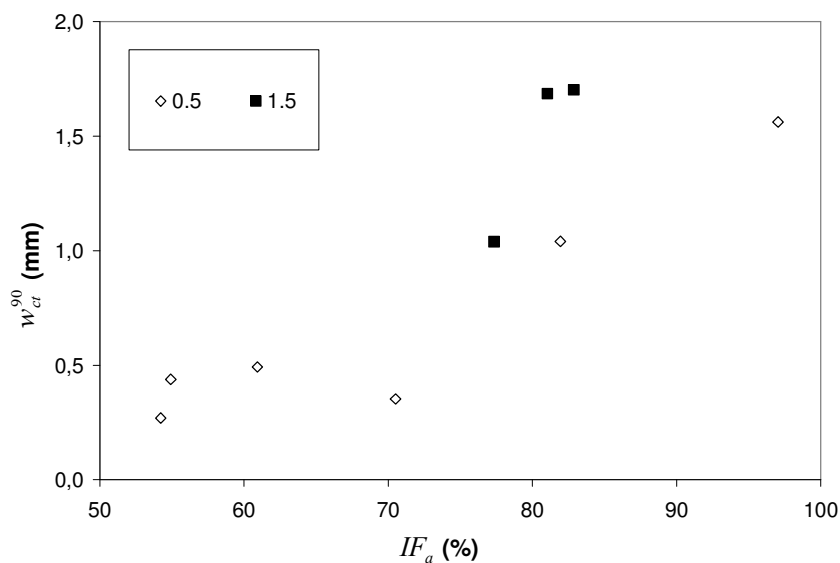


Figura 6.90. w_{ct}^{90} vs. IF_a para I-80/35-40-10 (influencia abertura de fisura).

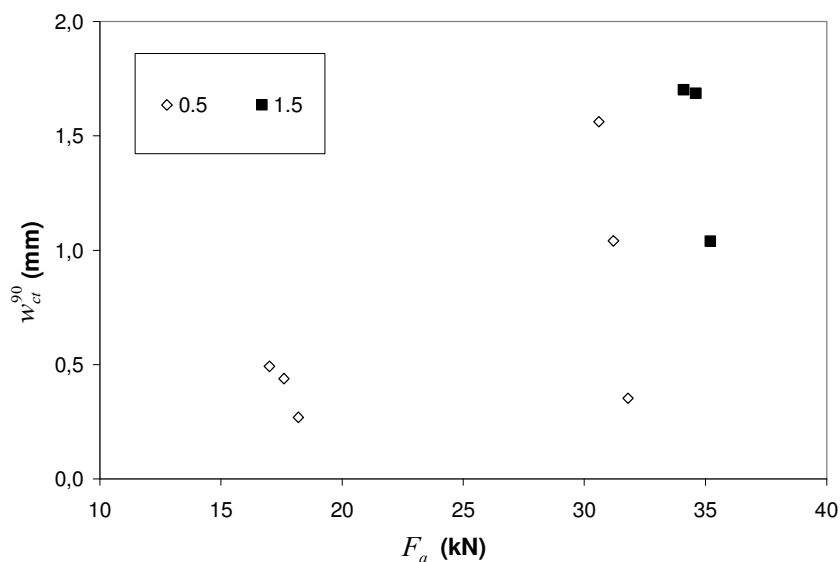


Figura 6.91. w_{ct}^{90} vs. F_a para I-80/35-40-10 (influencia abertura de fisura).

Los elementos I-80/35-40-10 con w_p de 1.5 mm, tienden a presentar mayores valores de aberturas de fisura inicial, diferida y total respecto de los elementos con w_n de 0.5 mm y valores de índice de carga aplicado IF_a similares (estos corresponden a valores de F_a mayores para los elementos con w_n de 1.5 mm). Respecto de F_a , se aprecia una tendencia uniforme entre todos los elementos (w_n de 0.5 mm y 1.5 mm).

Para el conjunto de los hormigones, un mayor valor de prefisura tiene una influencia más clara en la abertura de fisura inicial w_{ct} , presentando

mayores valores, mientras que para la abertura diferida w_{cd}^{90} presentan valores similares a los obtenidos con abertura de prefisura w_n de 0.5 mm.

6.7.2.5. Influencia del índice de carga

En las Figuras 6.92, 6.93 y 6.94 se presentan los valores de aberturas de fisura inicial w_{ci} , diferida w_{cd}^{90} y total w_{ct}^{90} , respectivamente, en función del índice de carga aplicada IF_a para los elementos I-80/35-40-10.

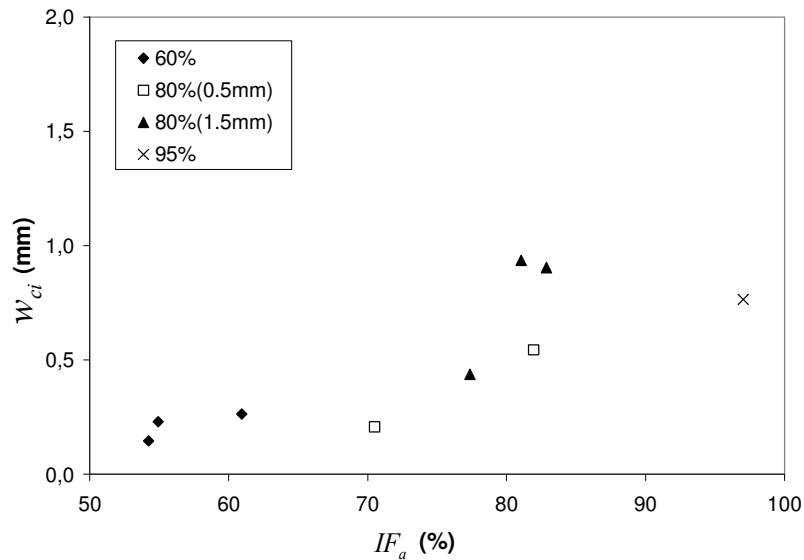


Figura 6.92. w_{ci} vs. IF_a para I-80/35-40-10 (influencia IF_a).

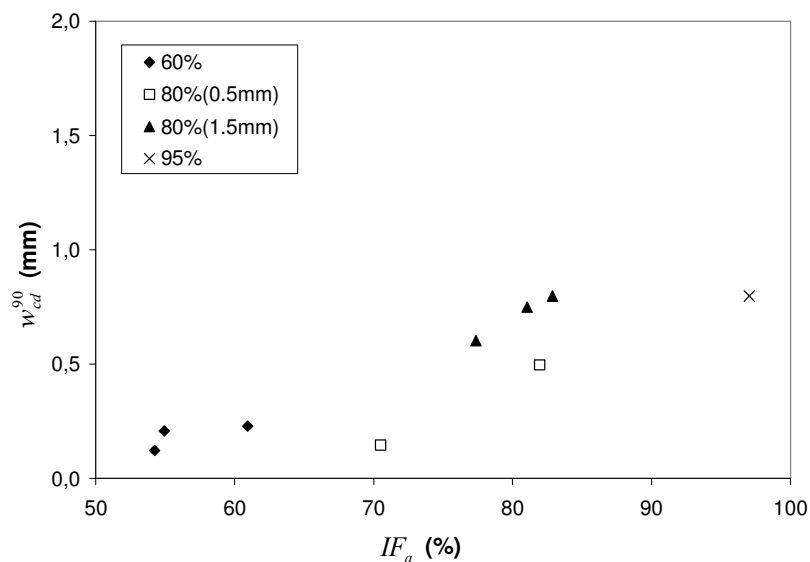


Figura 6.93. w_{cd}^{90} vs. IF_a para I-80/35-40-10 (influencia IF_a).

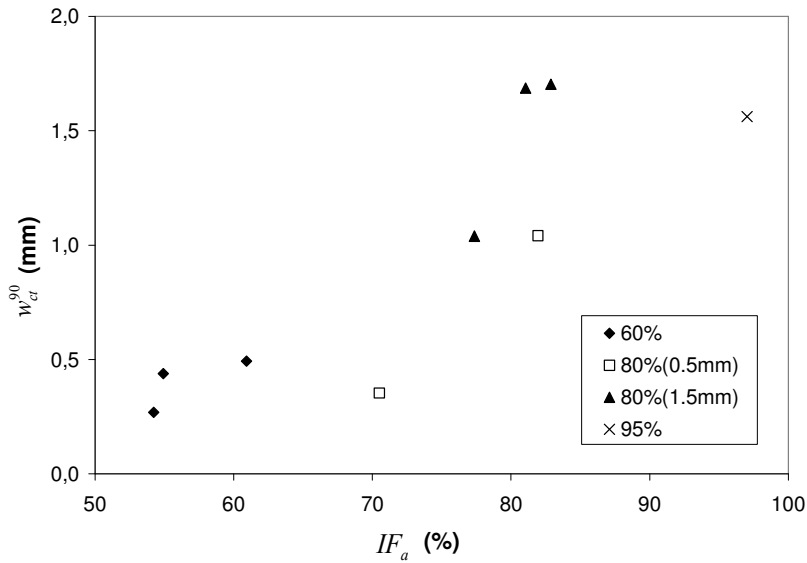


Figura 6.94. w_{ct}^{90} vs. IF_a para I-80/35-40-10 (influencia IF_a).

En las Figuras 6.92, 6.93 y 6.94 se puede observar una tendencia a tener mayores valores de aberturas de fisura inicial w_{ci} , diferida w_{cd}^{90} y total w_{ct}^{90} , respectivamente, para mayores valores del índice de carga aplicada IF_a (para los elementos con w_p de 0.5 mm); mientras que para los elementos con w_p de 1.5 mm los valores de abertura de fisura son mayores en comparación con los elementos con IF_a similares (80%) y w_p de 0.5 mm. Para mayores valores de IF_a se aprecian mayores variaciones en los valores de las aberturas de fisura.

En las Figuras 6.95, 6.96 y 6.97 se presentan valores de aberturas de fisura inicial w_{ci} , diferida w_{cd}^{90} y total w_{ct}^{90} , respectivamente, en función del índice de carga aplicada IF_a para los elementos I-80/35-70-10. Se observa una tendencia similar a la de los elementos I-80/35-40-10, con mayores valores de aberturas de fisura inicial w_{ci} , diferida w_{cd}^{90} y total w_{ct}^{90} para mayores valores del índice de carga aplicada IF_a . El paso del nivel de carga del 80% al 95% muestra una mayor tendencia a la desestabilización, lo que se aprecia por un importante incremento de las deformaciones diferidas.

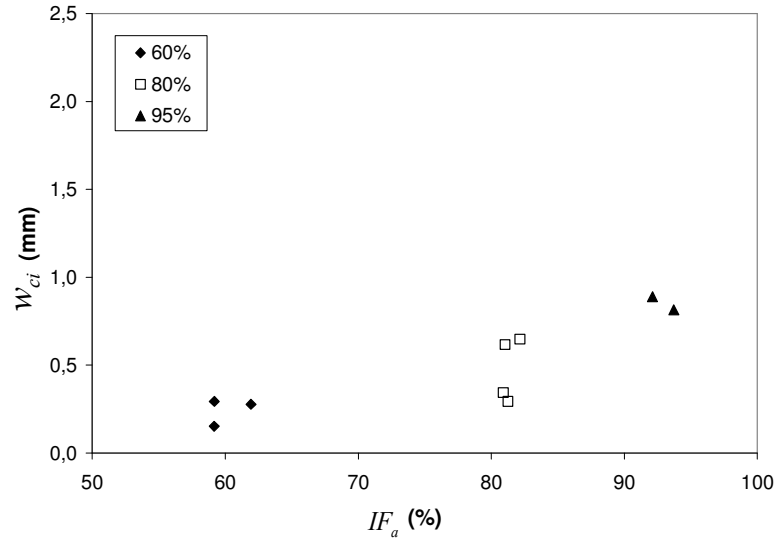


Figura 6.95. w_{ci} vs. IF_a para I-80/35-70-10 (influencia IF_a).

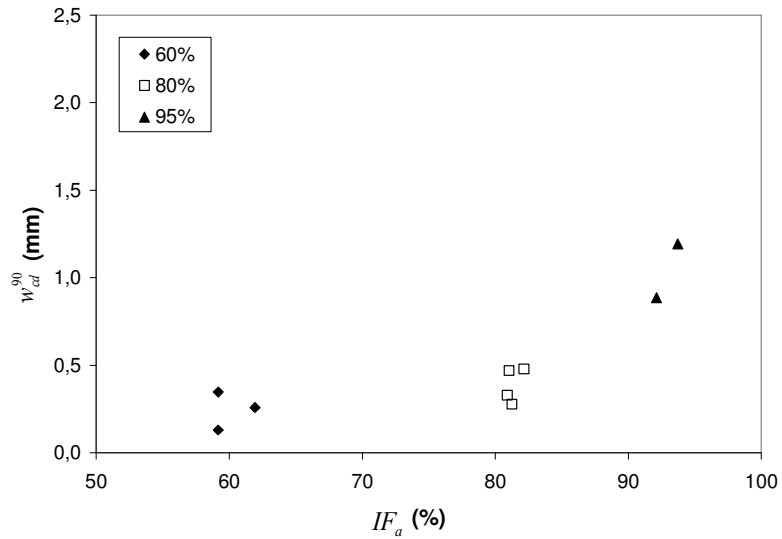


Figura 6.96. w_{cd}^{90} vs. IF_a para I-80/35-70-10 (influencia IF_a).

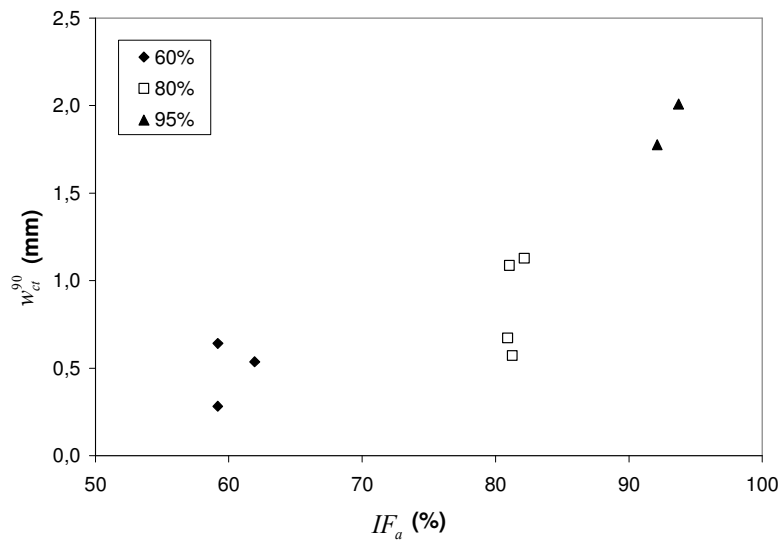


Figura 6.97. w_{ct}^{90} vs. IF_a para I-80/35-70-10 (influencia IF_a).

En la Figura 6.98 se presentan los valores de las aberturas de fisura inicial w_{ci} , diferida w_{cd}^{90} y total w_{ct}^{90} en función del índice de carga aplicada IF_a para los elementos II-45/50-40-20. Se observa una tendencia similar a la de los elementos I-80/35-40-10 y I-80/35-70-10, con mayores valores de aberturas de fisura inicial w_{ci} , diferida w_{cd}^{90} y total w_{ct}^{90} para mayores valores del índice de carga aplicada IF_a .

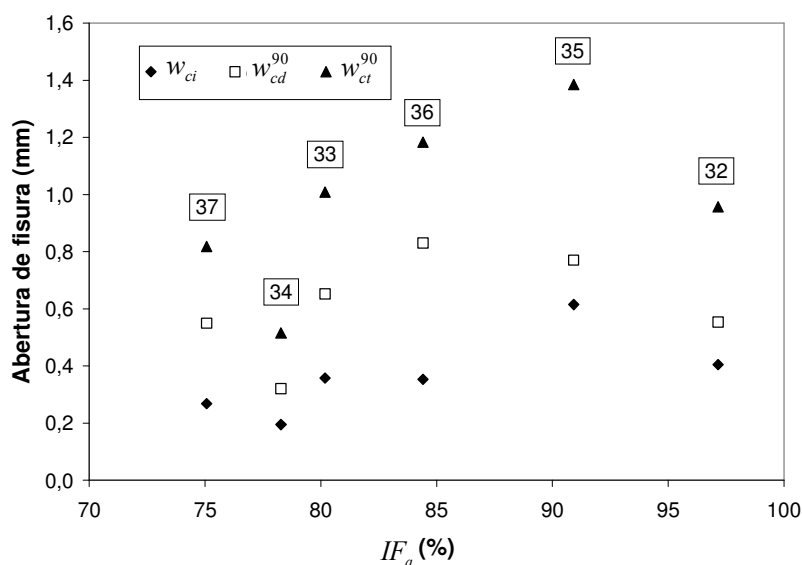


Figura 6.98. w_{ci} , w_{cd}^{90} y w_{ct}^{90} vs. IF_a para II-45/50-40-20.

En la Figura 6.99 se presentan los valores de las aberturas de fisura inicial w_{ci} , diferida w_{cd}^{90} y total w_{ct}^{90} en función del índice de carga aplicada IF_a para los elementos II-50/30-40-10. Se observa una tendencia (similar a la de los elementos anteriormente analizados) a tener mayores valores de aberturas de fisura inicial w_{ci} , diferida w_{cd}^{90} y total w_{ct}^{90} para mayores valores de índice de carga aplicada IF_a , con la diferencia de que para valores de IF_a superiores al 70% se han presentado comportamientos inestables, con roturas instantáneas de elementos y grandes valores de abertura de fisura diferida w_{cd}^{90} debidos a aumentos súbitos de ésta.

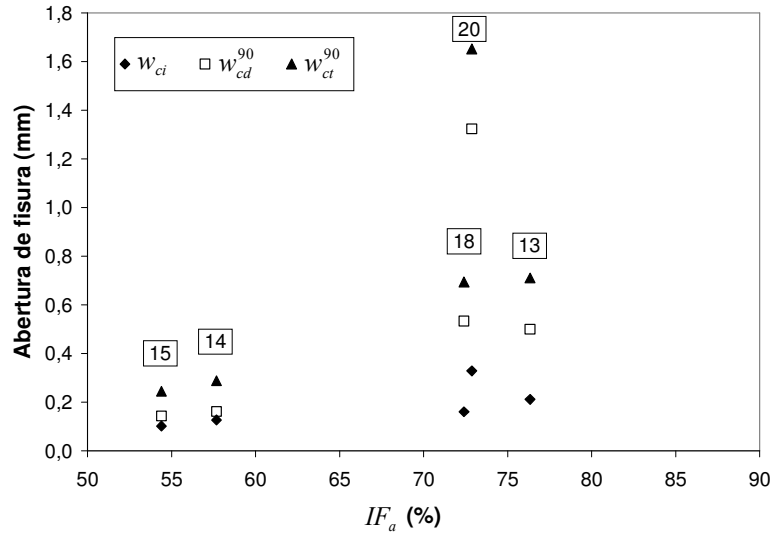


Figura 6.99. w_{ci} , w_{cd}^{90} y w_{ct}^{90} vs. IF_a para II-50/30-40-10.

6.7.2.6. Influencia del valor de carga aplicada

En las Figuras 6.100, 6.101 y 6.102 se presentan valores de aberturas de fisura inicial w_{ci} , diferida w_{cd}^{90} y total w_{ct}^{90} , respectivamente, en función del valor de carga aplicada F_a para los elementos I-80/35-40-10. Se observan tendencias a presentar mayores valores de aberturas de fisura inicial w_{ci} , diferida w_{cd}^{90} y total w_{ct}^{90} , para mayores valores de carga aplicada F_a , similar a lo experimentado al analizar el nivel de carga aplicada IF_a para estos mismos elementos. En función de la carga aplicada F_a , los elementos con abertura de prefisura w_p de 1.5 mm entran dentro de la tendencia definida por los otros elementos. A medida que aumenta el valor de la carga aplicada F_a se aprecian mayores variaciones en los valores de las aberturas de fisura.

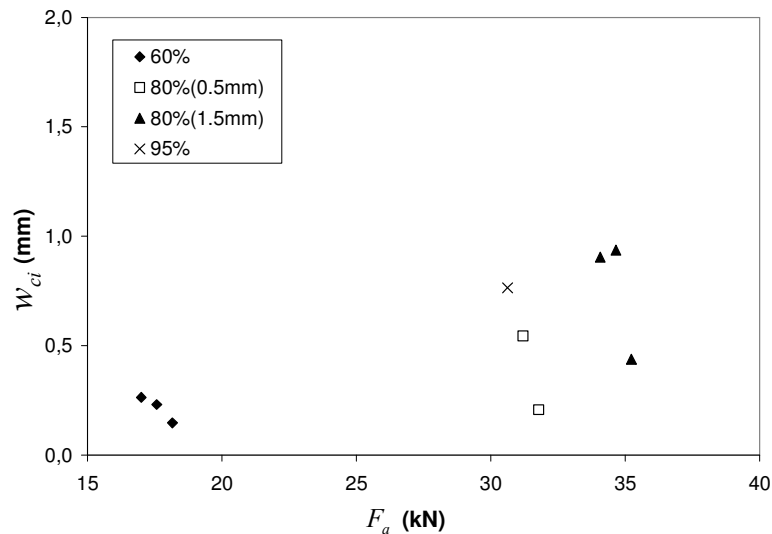


Figura 6.100. w_{ci} vs. F_a para I-80/35-40-10.

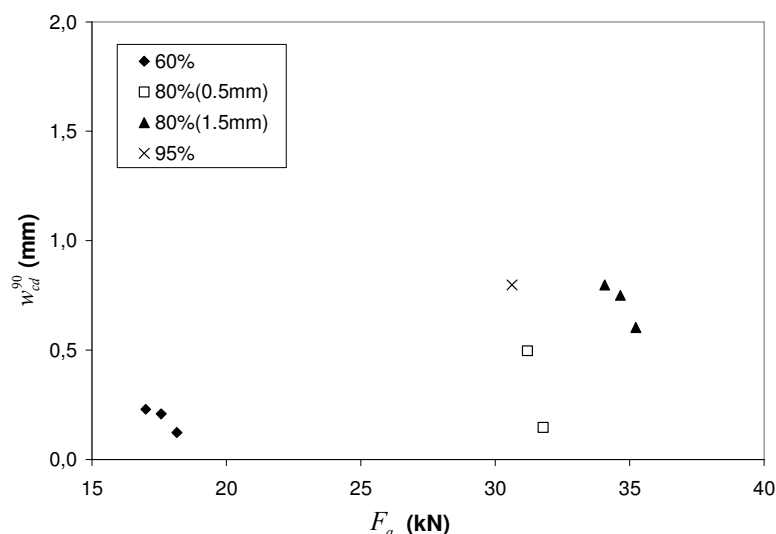


Figura 6.101. w_{cd}^{90} vs. F_a para I-80/35-40-10.

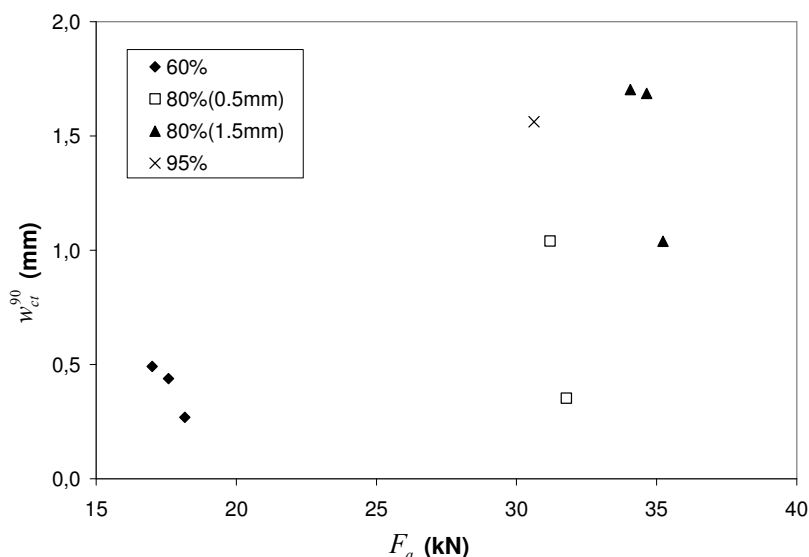


Figura 6.102. w_{ct}^{90} vs. F_a para I-80/35-40-10.

En las Figuras 6.103, 6.104 y 6.105 se presentan valores de aberturas de fisura inicial w_{ci} , diferida w_{cd}^{90} y total w_{ct}^{90} , respectivamente, en función del valor de carga aplicada F_a para los elementos I-80/35-70-10. Se observa una tendencia similar a la de los elementos I-80/35-40-10, con mayores valores de aberturas de fisura inicial w_{ci} , diferida w_{cd}^{90} y total w_{ct}^{90} para mayores valores de carga aplicada F_a , presentándose también mayores variaciones de los valores de aberturas de fisura para mayores valores de F_a .

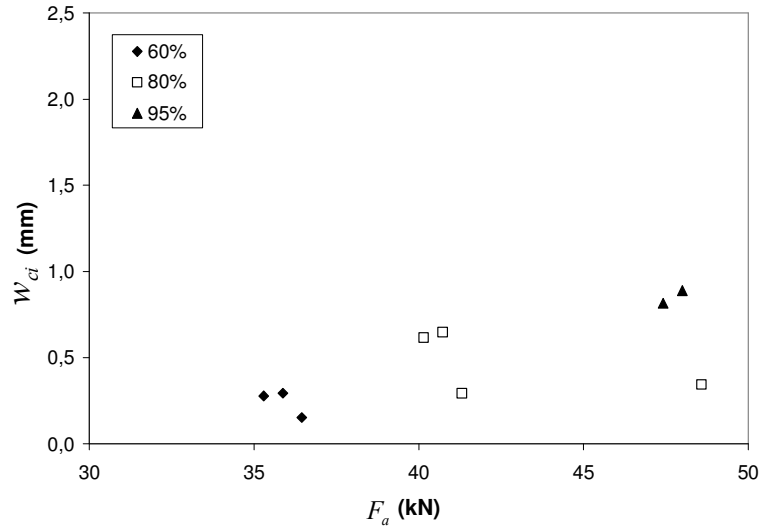


Figura 6.103. w_{ci} vs. F_a para I-80/35-70-10.

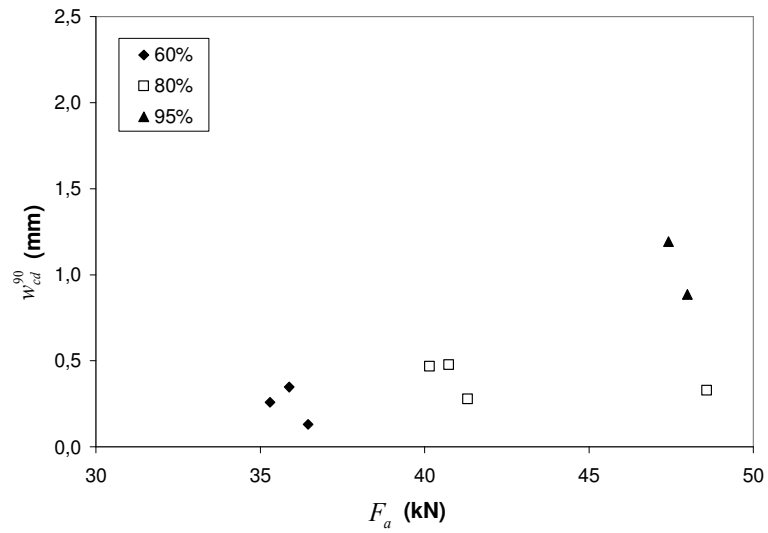


Figura 6.104. w_{cd}^{90} vs. F_a para I-80/35-70-10.

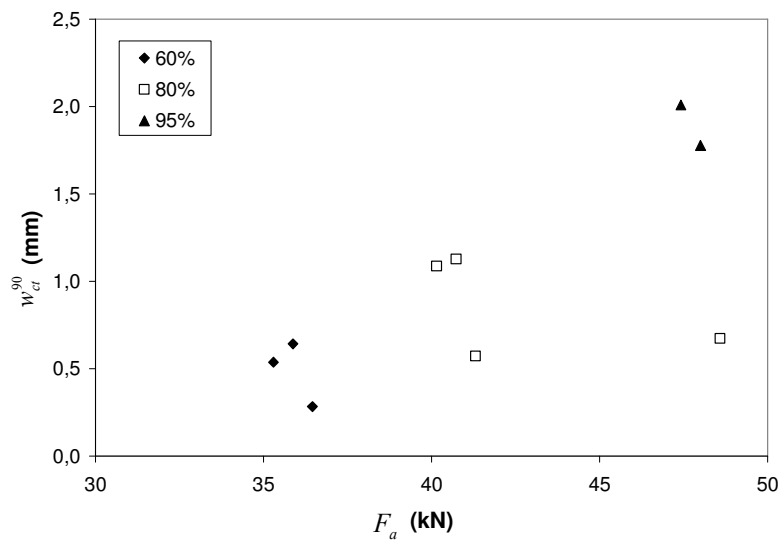


Figura 6.105. w_{ct}^{90} vs. F_a para I-80/35-70-10.

En la Figura 6.106 se presentan los valores de las aberturas de fisura inicial w_{ci} , diferida w_{cd}^{90} y total w_{ct}^{90} en función del valor de carga aplicada F_a para los elementos II-45/50-40-20. Se observa una considerable dispersión de resultados para un hormigón que se ha mostrado poco estable sometido a este tipo de ensayos.

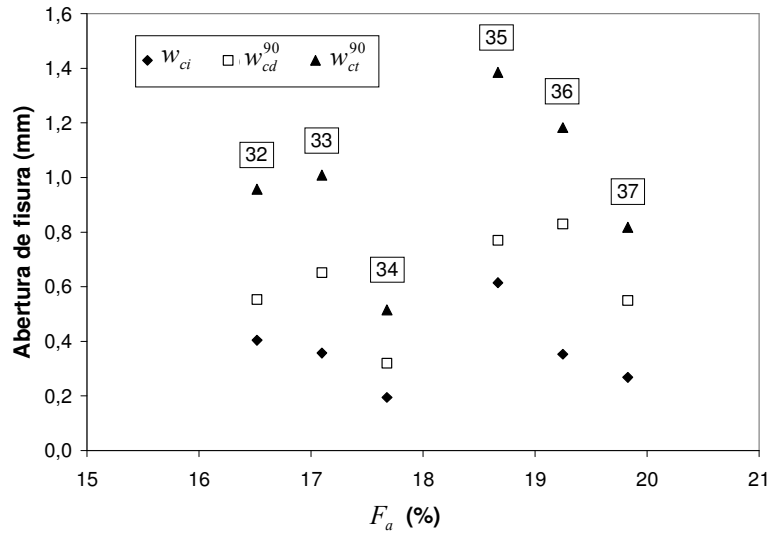


Figura 6.106. w_{ci} , w_{cd}^{90} y w_{ct}^{90} vs. F_a para II-45/50-40-20.

En la Figura 6.107 se presentan los valores de las aberturas de fisura inicial w_{ci} , diferida w_{cd}^{90} y total w_{ct}^{90} en función del valor de carga aplicada F_a para los elementos II-50/30-40-10. Se observa una clara diferencia entre los dos grupos de resultados, correspondientes a 10 kN (IF_a de 60%) y 15 kN (IF_a de 80%). Los valores de abertura de fisura w_{ci} , w_{cd}^{90} y w_{ct}^{90} resultantes son mayores y muestran mayor dispersión para el caso de mayor nivel de carga.

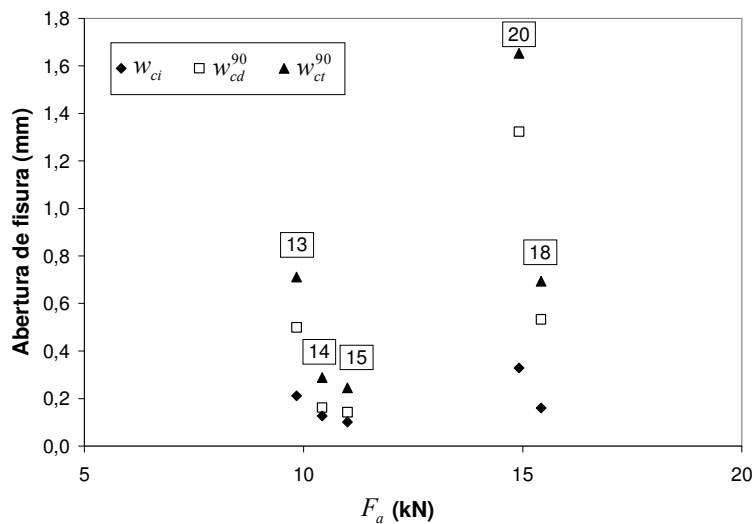


Figura 6.107. w_{ci} , w_{cd}^{90} y w_{ct}^{90} vs. F_a para II-50/30-40-10.

6.8. CONSIDERACIONES SOBRE EL MÉTODO DE ENSAYO DE FLUENCIA

Partiendo de los estudios realizados, se ha definido un ensayo para analizar la fluencia a flexión del SFRC en estado fisurado, integrando las ventajas presentadas por otros autores y realizando aportes propios para mejorarlo.

El bastidor de ensayo diseñado recoge, la capacidad de optimizar y garantizar la aplicación de carga constante a lo largo del tiempo mediante la utilización de una palanca, el ensayar más de un elemento simultáneamente (en columna), el empleo de dispositivos de transmisión de carga y apoyo de elementos evitando la transmisión de momentos transversales. El aporte propio, además de integrar las ventajas de los diferentes estudios en un ensayo, ha consistido en:

- Hacer flexible la capacidad de ensayo en columna (otros autores limitan a tres el número máximo), con la libertad de ensayar desde un elemento hasta el número que la estabilidad de la columna permita, disponiendo de barras roscadas de longitud suficiente.
- El diseño de dispositivos de transmisión de carga y apoyo de elementos que, además de evitar la transmisión de momentos transversales inducidos, aporta rigidez a la columna de elementos y garantiza la integridad de los instrumentos de medida en caso de roturas.
- Con el diseño de los dispositivos de transmisión de carga y apoyo se pretendía además de lo anteriormente comentado, la posibilidad de continuar con el ensayo al producirse la rotura de alguno de los elementos de la columna, sin la necesidad de parar el ensayo y retirar el elemento; así, las pestañas intermedias de apoyo que se han diseñado son adecuadas para garantizar la integridad de los instrumentos de medida, pero no son lo suficientemente altas para retener el elemento que llega a rotura, por lo que se requiere de unas pestañas intermedias de mayor altura para resolver el problema.

El procedimiento operativo de ensayo definido, tanto para los ensayos complementarios como para el ensayo de fluencia, ha garantizado el adecuado desarrollo de los ensayos.

El software desarrollado para el ensayo por parte del personal de ICITECH y el sistema de adquisición de datos empleado, han respondido con suficiencia a las exigencias del ensayo. Las dos velocidades de toma de datos definidas son más que suficiente (lenta de 3600 segundos y rápida de 5 segundos), pudiéndose considerar incluso que la velocidad lenta es excesiva y pasar a una lectura diaria.

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se exponen las principales conclusiones de esta Tesis Doctoral y se recomiendan futuras líneas de investigación.

7.1. CONCLUSIONES

7.1.1. CONCLUSIONES GENERALES

Se ha verificado la viabilidad de la aplicación de la metodología de ensayo de fluencia que se ha establecido, mediante el planteamiento y desarrollo de un programa experimental para evaluar el comportamiento diferido de elementos de SFRC en estado fisurado cargados a flexión.

Se ha definido una terminología específica para establecer parámetros de análisis que resulten operativos en las distintas fases y procesos de ensayo: prefisuración, etapa de carga en ensayo de fluencia, etapa de descarga y recuperación en ensayo de fluencia y ensayo de rotura post-fluencia a flexotracción.

Se han obtenido resultados experimentales que han permitido analizar el fenómeno de fluencia a flexión de elementos de SFRC en estado fisurado a partir de la medición de las aberturas de fisura y de la deformación en compresión del hormigón.

Se ha analizado el comportamiento de los distintos SFRC incluidos en el programa experimental, relacionando los principales parámetros (tipo de fibra, contenido de fibra, nivel de prefisuración, carga aplicada) con la evolución de la abertura de fisura a lo largo del tiempo.

Se han analizado y comparado los resultados entre los distintos hormigones, y con el modelo EHE para la estimación de flecha diferida.

7.1.2. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA METODOLOGÍA DEL ENSAYO DE FLUENCIA

Se ha definido una metodología de ensayo para estudiar la fluencia a flexión del SFRC en estado fisurado, integrando las ventajas de metodologías presentadas por otros autores y realizando mejoras mediante aportes.

El bastidor de ensayo diseñado tiene la capacidad de optimizar y garantizar la aplicación de carga constante a lo largo del tiempo y de ensayar más de un elemento simultáneamente (en columna); además, se ha complementado con dispositivos de transmisión de carga y apoyo, que evitan la transmisión de momentos transversales y permitan continuar con el ensayo al producirse la rotura de alguno de los elementos de la columna, sin la necesidad de parar el ensayo y retirar el elemento.

El procedimiento operativo de ensayo definido, tanto para los ensayos complementarios como para el ensayo de fluencia, ha garantizado el adecuado desarrollo de los ensayos.

Cuando se trabaja en columna de elementos en un mismo bastidor de ensayo, se aplica una carga similar a todos los elementos. Esto provoca que, debido a la dispersión de propiedades del SFRC, el índice de carga al que se somete cada elemento puede ser muy variable. Esta posibilidad debe ser tenida en cuenta a la hora de configurar las columnas de elementos para evitar el riesgo de roturas no deseadas.

En estas condiciones se ha verificado el escaso efecto que provoca la rotura de un elemento durante el ensayo sobre los demás elementos de la misma columna. Sin embargo, no deja de ser un incidente en el proceso.

Se ha cubierto sin dificultades una amplia gama de comportamientos post-fisura del SFRC, tanto con elementos estables respecto del desarrollo de deformaciones diferidas como con elementos con resultados de rotura.

La metodología ha permitido estudiar la influencia que ejercen, sobre los elementos de SFRC en estado fisurado a lo largo del tiempo, variables como el tipo de hormigón, el tipo y el contenido de fibras, la carga aplicada y el valor de abertura de prefisura.

La metodología de ensayo del ensayo de fluencia establecida es susceptible de ser normalizada.

El criterio de normalización puede incluir dos vertientes: a) analizar la evolución de la fluencia en condiciones de aplicación (para un tipo de hormigón, dosificación, nivel de carga, etc.) adaptadas a un caso particular; b) estandarizar el comportamiento de una fibra en condiciones de ensayo estándar (materiales y dosificación del hormigón, contenido en fibras, nivel de prefisura y de carga, etc.).

7.1.3. CONCLUSIONES RELATIVAS A LAS DOSIFICACIONES

La dosificación de los SFRC, variando el tipo de hormigón y el tipo y contenido de fibras, ha permitido obtener hormigones que abarcan un amplio espectro del comportamiento post-fisura del SFRC, con diferentes niveles de endurecimiento por deformaciones, con capacidad de mantener valores de resistencias residuales constantes a medida que se incrementa su abertura de fisura, y también con ablandamiento por deformación.

7.1.4. CONCLUSIONES RELATIVAS A PARÁMETROS Y CONDICIONES OPERATIVAS DEL ENSAYO DE FLUENCIA

El control de la humedad y la temperatura a lo largo del tiempo se ha realizado de forma satisfactoria, resultando valores medios ajustados a los definidos y variaciones adecuadas, excepto en un periodo puntual de la serie 3 en el que se averió un equipo de la cámara de ensayos.

La evolución de la carga aplicada a lo largo del tiempo ha presentado una tendencia general de ligeros descensos. La capacidad del ensayo diseñado de aplicar un valor de carga y conservarlo a lo largo del tiempo se puede considerar satisfactoria, considerando los bajos valores de coeficientes de variación obtenidos.

7.1.5. CONCLUSIONES RELATIVAS AL PROCESO DE PREFISURACIÓN

En los ensayos de prefisuración se obtuvieron valores de abertura de fisura real muy próximos a los valores de abertura de fisura nominal definidos, lo que permite aislar este factor y poder realizar el análisis sin considerar una variación de partida.

Se han detectado variaciones importantes en los resultados de abertura de fisura residual, carga de primera fisura y carga al nivel de prefisuración, como es típico del SFRC en este tipo de ensayos.

En los elementos en los que se obtuvieron datos de deformación en la cabeza de compresión además de los de abertura de fisura en el proceso de prefisuración, se pudo observar que la abertura de fisura de 0.5 mm se produce con una deformación en compresión de alrededor de 0.8 ‰. Este nivel puede considerarse alto y, en consecuencia, se debe tener en cuenta el posible efecto de la fluencia en la zona comprimida, especialmente en elementos con resistencia residual elevada o con matriz débil.

La capacidad de recuperación se incrementa para elementos con fibras de mayor esbeltez y longitud, así como para mayor contenido de fibras. La capacidad de recuperación en términos de aberturas de fisura es ligeramente inferior a la mostrada en términos de las deformaciones de compresión.

7.1.6. CONCLUSIONES RELATIVAS A LOS ENSAYOS DE FLUENCIA

Se han presentado aumentos súbitos en los valores de abertura de fisura diferida y deformaciones en compresión, producto del deslizamiento rápido de fibras en la zona de tracción. Estos aumentos se han presentado en 15 de los 45 elementos ensayados, pero en la gran mayoría de casos el peso sobre el valor de las deformaciones diferidas es muy bajo. Este fenómeno se produce en elementos con fibras poco esbeltas (45 ó 50) o con índice de carga aplicada alto. Cuando es importante suele ser presagio de una fluencia elevada.

Se han definido dos coeficientes de fluencia, uno que considera las deformaciones del elemento a origen y otro que considera exclusivamente las deformaciones registradas en la etapa de carga del ensayo de fluencia. Si el coeficiente de fluencia se analiza sobre la deformación a origen los valores son sensiblemente menores, en especial para los elementos poco resistentes. Con este criterio, en la mayoría de ensayos realizados no se ha alcanzado el valor de $\lambda=1$ a los noventa días, valor que estima la proporción de la flecha diferida respecto de la flecha instantánea según el modelo EHE-ACI.

El coeficiente de fluencia ha presentado valores bajos y poco variables en elementos con índice de carga aplicada bajo (alrededor del 60%).

En los ensayos de fluencia se presentaron roturas exclusivamente en 5 elementos. Las roturas se han producido siempre en el proceso de carga o pocos minutos después de finalizar el proceso de aplicación de la carga. Se caracterizan por presentar altos valores de abertura de fisura inicial y una curva típica de fluencia con zona primaria, secundaria y terciaria. La rotura se ha presentado en dos elementos I-80/35-70-10 con índices de carga de 92.1% y 83.5% (en operación de recarga), y para 3 elementos II-50/30-40-10 con índices de carga aplicada desde 76.4%. En el resto de ensayos no se han presentado roturas a largo plazo para ensayos con duración de hasta 300 días.

El valor del coeficiente de fluencia ha mostrado clara dependencia de las variables analizadas, especialmente del tipo de fibras, del índice de carga aplicada y del tipo de hormigón.

Las fibras menos esbeltas y más cortas, ensayadas en un estado de comportamiento en post-fisura de ablandamiento, presentan mayor fluencia y mayor riesgo de fallo en el proceso de fluencia. Los hormigones II-50/30-40-10, con fibras que además no incluyen anclajes en los extremos, han presentado fluencia elevada, incluso con niveles de carga escasamente superiores al 70%.

Las fibras largas y poco esbeltas, ensayadas en un estado de comportamiento en post-fisura de endurecimiento, alcanzan valores de fluencia altos pero con tendencia a estabilizarse incluso a niveles de carga elevados.

El resto de las fibras ensayadas en tramos de comportamiento en post-fisura de endurecimiento, tienden a estabilizarse pronto, y solo cuando se cargan a un nivel alto han presentado algún fallo.

Para valores máximos de índice de carga aplicada (alrededor del 95%), se presentan valores de coeficiente de fluencia que no destacan sobre el resto, pues las grandes deformaciones diferidas son compensadas por las deformaciones instantáneas que presentan también valores altos.

Para una misma abertura de fisura, una mejor calidad del hormigón genera una mayor capacidad de carga instantánea. Así mismo, la calidad del hormigón afecta a los valores de las deformaciones y coeficientes de fluencia. Por esta razón, la importancia de la carga aplicada en las deformaciones diferidas se aprecia en los hormigones de mayores prestaciones (Tipo I), que presentan valores de abertura de fisura diferida del mismo orden para valores de carga aplicada entre 2 y 5 veces la aplicada para los hormigones de menores prestaciones (Tipo II).

Cabe aclarar que un valor de coeficiente de fluencia bajo no garantiza una deformación total baja y viceversa. Los valores altos de coeficiente de fluencia corresponden siempre a deformaciones diferidas importantes. Sin embargo, los valores bajos de coeficiente de fluencia son debidos a deformaciones instantáneas elevadas que compensan deformaciones diferidas que también pueden ser elevadas.

Si bien el programa experimental desarrollado tiene un alcance limitado por el número y tipo de variables analizadas, los resultados obtenidos muestran que la fluencia en los SFRC puede ser comparable a la de un hormigón tradicional.

7.2. RECOMENDACIONES PARA FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A continuación se presentan algunas propuestas para futuras líneas de investigación, en relación con la investigación desarrollada en esta tesis:

1. Habiendo manifestado la posible viabilidad de normalizar el método de ensayo, es importante definir y justificar las condiciones de ensayo más influyentes.
2. El estudio experimental puede ampliarse en función de las variables ya propuestas, implementando diferentes niveles de prefisura, duración de los ensayos hasta 5 años, y a otras variables estudiando la influencia de diferentes aditivos, hormigones autocompactantes, hormigones de altas prestaciones, hormigones reforzados con combinaciones de fibras, diferentes granulometrías, y diferentes edades de prefisuración.
3. Plantear un modelo de comportamiento y realizar un estudio paramétrico que permita calibrar y validar dicho modelo.

4. Estudiar el comportamiento diferido en elementos con redistribución de esfuerzos en condiciones reales de trabajo. Se pueden incluir:
 - Elementos en los que el hormigón trabaje en dos direcciones.
 - Elementos hiperestáticos.
 - Elementos armados.

REFERENCIAS

- Abramowicz, M., Krátký, J., Tirtík, K. y Vodicka, J., "Strains of Steel Fibre Reinforced Concrete under a Long-Term Load", Proceedings of the Fourth International Symposium on Brittle Matrix Composites, BMC4, pp. 408-414, Warsaw, Poland, 1994.
- Abramowicz, M., Krátký, J., Tirtík, K. y Vodicka, J., "Strains of Steel Fibre Reinforced Concrete under a Long-Term Load", Proceedings of the Fourth International Symposium on Brittle Matrix Composites, BMC5, pp. 164-171, Warsaw, Poland, 1997.
- ACHE, "Manual de Tecnología del Hormigón Reforzado con Fibras de Acero", Comisión 2, Grupo de Trabajo 2/2, Hormigones con Fibras, Junio 2000.
- ACI Committee 209R-92, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures", 1992 (Reapproved 2008).
- ACI Committee 209.1R-05, "Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete", 2005.
- ACI Committee 116R-00, "Cement and Concrete Terminology", American Concrete Institute Manual of Concrete Practice 2001, Part 1, 2001.
- ACI Committee 544.1R-96, "Report on Fibre Reinforced Concrete", Ed. American Concrete Institute, 1996 (Reapproved 2009).
- ACI Committee 544.2R-89, "Measurement of Properties of Fibre Reinforced Concrete", Ed. American Concrete Institute, 1989 (Reapproved 2009).
- ACI Committee 544.3R-08, "Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fibre Reinforced Concrete", Ed. American Concrete Institute, 2008.
- ACI Committee 544.4R-88, "Design Considerations for Steel Fibre Reinforced Concrete", Ed. American Concrete Institute, 1988 (Reapproved 2009).
- ACI Committee 544.5R-10, "Report on the Physical Properties and Durability of Fibre Reinforced Concrete", Ed. American Concrete Institute, 2010.
- Almansa, E. M. y Canovas, M. F., "Behaviour of normal and steel fibre-reinforced concrete under impact of small projectiles", Cement and concrete research, Vol: 29 (11), pp 1807-1814, 1999.
- Altoubat, S. A. y Lange, D. A., "Tensile Basic Creep: Measurements and behaviour at Early Age", ACI Materials Journal, Vol. 98 (5), 2001.
- Andresen, P., "Experiments with concrete in torsion", Trans. Am. Soc. of Civil Engineers, pp. 949-983, 1935.

- Anejo 14 de la Instrucción EHE 2008, "Recomendaciones para la utilización de hormigones con fibras", 2008.
- ASTM A820/A820M-06, "Standard Specification for Steel Fibres for Fiber-Reinforced Concrete", American Society for Testing Materials, 2006.
- ASTM C143/C143M-09, "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete", American Society for Testing Materials, 2009.
- ASTM C512-02, "Standard Test for Creep of Concrete in Compression", American Society for Testing Materials, 2002.
- ASTM C1116/C1116M-09, "Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete", American Society for Testing Materials, 2009.
- ASTM C1399/C1399M-10, "Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete", American Society for Testing Materials, 2010.
- ASTM C1550-08, "Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)", American Society for Testing Materials, 2008.
- ASTM C1609/C1609M-07, "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)", American Society for Testing Materials, 2007.
- Balaguru, P. y Ramakrishnan, V., "Properties of Fibre Reinforced Concrete: Workability, Behaviour under Long-Term Loading and Air-Void Characteristics", ACI Materials Journal, Vol. 85, No. 3, pp. 189-196, May 1988.
- Banthia, N. y Trottier, J. F., "Concrete reinforced with steel fibres. Part II: toughness characterization", ACI Materials Journal, 1995.
- Baron, J., y Lesage, R., "La composition du beton hydraulique du laboratoire au chantier", Ministere de l'equipment, Laboratoire central des ponts et chaussees, Paris, 1976.
- Barragán, B. E. y Zerbino, R. L., "Creep Behaviour of Cracked Steel Fibre Reinforced Concrete Beams", Seventh International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications, pp. 577-586, September 2008.
- Barragán, B., "Failure and Toughness of Steel Fibre Reinforced Concrete Under Tension and Shear", Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, March 2002.
- Bast, T., Eder, A., y Kusterle, W., "Kriechversuche an Kunststoffmakrofaserbetonen Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Faserbetonen unter Biegezugbeanspruchung – ein Zwischenbericht", FASERBETON BEITRÄGE ZUM 11. VILSER BAUSTOFFTAG, pp. 32-35, 2007.
- Bazant, Z. P., "Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective modulus method", ACI Journal Proceedings, Vol. 69, N° 4, pp. 212-217, 1972.

- Bazant, Z. P. y Kim, S. S., "Approximate Relaxation Function for Concrete", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 105, No. ST12, pp. 2695-2705, 1979.
- Bernard, E. S., "Creep of Cracked Fibre Reinforced Shotcrete Panels", Shotcrete: More Engineering Developments, Bernard ed., pp. 47-57, 2004.
- Bindinganavile, V. y Banthia, N., "Rebound Reduction in Steel Fibre Reinforced Dry-Mix Shotcrete Through Matrix Modifications", Rilem Proceedings 15, BEFIB 2000.
- CAN/CSA-A23.3-04, "Design of Concrete Structures, Canadian Standards Association, Toronto, 2004.
- Carmona, S., Gettu, R., y Aguado, A., "Study of the Post-Peak Behaviour of Concrete in the Splitting-Tension Test", Fracture Mechanics of Concrete Structures, Eds. H.Mihashi and K.Rokugo, AEDIFICATIO Publishers, Freiburg, Germany, Vol. 1, pp. 3-25, 1998.
- Chanvillard, G. y Roque, O., "Behaviour of Fibre Reinforced Concrete Cracked Section under Sustained Load", Proceedings of 3rd International Workshop on High Performance Fibre Reinforced Composites, Mainz (Germany), RILEM Publications, pp. 239-250, 1999.
- Chern, J. C. y Young, C. H., "Compressive Creep and Shrinkage of Steel Fibre Reinforced Concrete", The International Journal of Cement and Lightweight Concrete, Vol. 11, No. 4, pp. 205-214, November 1989.
- Cho, B. S., El-Shakra, Z. M. y Gopalratnam, V. S., "Failure of FRC in Direct and Indirect Tensile Test Configurations", Proc. Intl. Symp. on Fatigue and Fracture in Steel and Concrete Structures (Madras, India, 1991), Vol. 1, pp. 587-601, 1992.
- Cochrane, J. T., "Flexural Creep Behaviour of Fibre Reinforced Concrete under High Temperatures." Master of Applied Science Dalhousie University, Canada, 2003.
- Dehouse, N. M., "Méthodes d'essais et caractéristiques des bétons armés des fibres métalliques", Rilem Symposium: Fibre Reinforced Cement and Concrete, Ed. Construction Press, 1975.
- Ding, Y. y Kusterle, W., "Compressive Stress-Strain Relationship of Steel Fibre Reinforced Concrete at Early Age", Cement and Concrete Research, 2000.
- Dupont, D. y Vandewalle, L., "Comparison Between the Round Plate Test and the Rilem 3-Point Bending Test", 6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), BEFIB 2004.
- EFNARC, "Guidelines to the Sprayed Concrete Specification", 1999.
- Fernández Canovas, M. "Hormigón", Rugarte S.L., Madrid, 2002.
- Gettu, R. y Barr, B., "Test Methods for the Characterization of Steel Fiber Reinforced Concrete", Report of Sub-task 1.1, Brite Euram Project BRPR-CT98-0813, January 2000.

- Gettu, R., Barragán, B., Dupont, D., Erdem, E., Olesen, J., Rosenbusch, J., Schnütgen, B., Steffen, S. y Vandewalle, L., "Study of the Parameters Influencing the Test Results: Bending and Uniaxial Tension Tests", Final Report of Sub-task 2.3, Brite Euram Project BRPR-CT98-813, June 2001.
- Gettu, R., "Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete-Creep in the Post-Cracked Region", Sub-task 5.2., Brite Euram project BRPR-CT98-813, 2002.
- Giaccio, G., Giovambattista, A. y Zerbino, R., "Concrete Reinforced with Collated Steel Fibres", ACI Journal, March-April 1986.
- Giménez, E. J., "Propiedades mecánicas y adherencia de hormigones con fibras de acero contaminados con cloruros", Tesis Doctoral para la E.T.S. de Arquitectura de Valencia, 1993.
- Glanville, W. H. y Thomas, F. G., "Studies in reinforced concrete IV. Further investigations on creep or flow of concrete under load", Building Research Technical Paper N° 21, London, 1939.
- Granju, J. y Ullah, S., "Corrosion of Steel Fibre Reinforced Concrete from the Cracks", Cement and Concrete Research, (35) 2005.
- Granju, J. L., Rossi, P., Chanvillard, G. et al, "Delayed Behaviour of Cracked SFRC Beams", Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium (BEFIB 2000), Lyon (France), pp. 511-520, 2000.
- Hannant, D. J., "Fibre Cements and Fibre Contents", Ed. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, 1978.
- Ishai, O., "Elastic and inelastic behaviour of cement mortar in torsion", Symposium on Creep of Concrete, American Concrete Institute Special Publication N°9, pp. 65-94, 1964.
- JCI-SF4, "Method of test for flexural strength and flexural toughness of SFRS", Japanese Society of Civil Engineers (JSCE), 1984.
- JSCE SFRC Research Subcommittee, "Recommendation for Design and Construction of SFRC", Concrete Library of J.S.C.E. n° 3, June 1984.
- Johnston, C. D., "Steel Fibre Reinforced Mortar and Concrete-A Review of Mechanical Properties", Fibre Reinforced Concrete, SP-44, ACI, Detroit, 1974.
- Klinkert, H., Rosenbusch, J. y Teutsch, M., "Long Time Behaviour and Influence of the Height of Steel Fibre Reinforced Concrete Members", Anejo 2, Sub task 5.2, Brite/Euram project 97-4163, February 2002.
- Kobayashi, K. y Cho, R., "Flexural Characteristics of Steel Fibre and Polipropylene Fibre Hybrid Reinforced Concrete", Composites, Vol. 13, 1982.
- Krátký, J., Trtík, K., Vodicka, J. y Spura, D., "Creep and Shrinkage of Steel Fibre Reinforced Concrete". Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium (BEFIB 2000), Lyon (France), pp. 541-544, 2000.

- Kurtz, S. y Balaguru, P., "Postcrack Creep of Polymeric Fibre-Reinforced Concrete in Flexure", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 183-190, 2000.
- Laurence, B., Bissonnette, B. y Pigeon, M., "Effect of Steel Macro-fibres on Cracking of Thin Concrete Repairs", *Rilem Proceedings 15, BEFIB 2000*.
- Lim, T. Y., Paramasivam, P., y Lee, S. L., "Bending behaviour of steel fiber concrete beams", *ACI Structural Journal*, 86 (6), pp. 524-536, 1987.
- López, M., "Creep and shrinkage of high performance lightweight concrete: a multi-scale investigation", *Doctoral Thesis, Georgia Institute of Technology, 2005*.
- Mackay, J. y Trottier, J. F., "Post-Crack Creep Behaviour of Steel and Synthetic FRC under Flexural Loading", *Shotcrete: More Engineering Developments*, Bernard ed., pp. 183-192, 2004.
- Mackay, J., "Behaviour of Steel and Synthetic Fibre Reinforced Concrete under Flexural Creep Loading", *Master of Applied Science Dalhousie University, Canada, 2002*.
- Mangat, P. S. y Azari, M. M., "Theory for the Creep of Steel Fibre Reinforced Cement Matrices under Compression," *Journal of Material Science*, Vol. 20, pp. 1119-1133, 1985.
- Mangat, P. S. y Azari, M. M., "Compression Creep Behaviour of Steel Fibre Reinforced Cement Composites," *Materials and Structures*, Vol. 19, No. 113, pp. 361-370, September 1986.
- Martí, J. R., Caro, L. A., Arango, S. y Serna, P., "Experimental study on bond of prestressing strand in SCC and FRS", *Seventh International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications*, pp. 699-709, September 2008.
- Massicotte, B., "Fibre Reinforce Concrete: an Structural Perspective", *Rilem Proceedings 15, BEFIB 2000*¹.
- Massicotte, B., "Mix Design for SFRC Bridge Deck Construction", *Rilem Proceedings 15, BEFIB 2000*².
- McHenry, D., "A new aspect of creep in concrete and its application to design", *ASTM Proceedings*, Vol. 43, pp. 1069-1086, 1943.
- Meda, A., Minelli, F., Plizzari, G. A., et al., "Shear behaviour of steel fibre reinforced concrete beams", *Materials and Structures*, Vol. 38 (277), pp. 343-351, 2005.
- Minelli, F. y Plizzari, G. A., "Shear design of FRC members with little or no conventional shear reinforcement", *Conference Information: International FIB Symposium: Tailor made concrete structures: new solutions for our society*, pp. 139, 2008.
- Mohammadi, Y., Carkon-Azad, R., Singh, S. P., et al., "Impact resistance of steel fibrous concrete containing fibres of mixed aspect ratio", *Construction and Building Materials*, Vol. 23 (1), pp. 183-189, 2009.
- Naaman, Antoine E., "Fibre Reinforcements for Concrete: looking back, looking ahead", *Rilem Proceedings 15, BEFIB 2000*.

- NBN B 15-238, "Test on fibre reinforced concrete - Bending test on prismatic samples", Norme Belge, Institut Belge de Normalisation, Brussels, 1992.
- Nemegeer, D., Vanbrabant, J. y Stang, H., "Final report on Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete", Subtask 5.1 Durability of SFRC, Brite Euram Project BRPR-CT98-0813, 2000.
- Neville, A. M., Dilger, W. H. y Brooks, J. J., "Creep of plain and structural concrete", Construction Press, London and New York, 1983.
- NF P18-455:2003, "Concretes. Measuring the flow time of concretes and mortars using a workabilitymeter".
- O'Neil, E. F. y Devlin, J. T., "Durability of Fibre-Reinforced Concrete Under flexural Stress in a Severe Marine Environment", U.S. Army Engineer Research and Development Center, September 1999.
- Purkiss, J. A. y Blagojevic, P., "Comparison Between the Short and Long Term Behaviour of Fibre Reinforced and Unreinforced Concrete Beams", Composite Structures, 25 [1-4], pp. 45-49, 1993.
- Rossi, P., "Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPRFC): A General Vision", Rilem Proceedings 15, BEFIB 2000.
- Rilem TC-162 TDF, "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Bending test", Materials and Structures, Vol. 35, pp. 579-582, 2002.
- Saldivar, H., "Flexural Toughness Characterization of Steel Fibre Reinforced Concrete- Study of Experimental Methodologies and Size Effects", Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 1999.
- Saludes, S. R., "Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado con fibras (ensayo Barcelona)", Tesina, Universitat Politècnica de Catalunya, Marzo 2006.
- Serna, P., "Étude de la contribution des fibres métalliques a l'amélioration du comportement du béton au cisaillement", École Nationale des Ponts et Chaussées, Tesis Doctoral, 1984¹.
- Serna, P., "Método para la formulación de hormigones de fibras metálicas", Materiales de Construcción, Ed. Eduardo Torroja, Vol. 34, pp. 17-23, 1984².
- Serna, P. y Arango C., S. E., "Evolution of the Flexural Behaviour of Pre-Cracked SFRC in Marine Environment", Seventh International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications, pp. 595-605, September 2008.
- Soroushian, P. y Bayasi, Z., "Local Bond Behaviour of Deformed Bars in Steel Fibre Reinforced Concrete Joints", Magazine of Concrete Research, June 1990.
- Stang, H., Gettu, R. y Barr, B., "Test Methods for the Characterisation of Steel Fibre Reinforced Concrete: a State-of-the-Art Report", Brite-Euram Project, Report of Sub-Task 1.1, January 2000.

- Swamy, R. N. y Theodorakopoulos, D. D., "Flexural Creep Behaviour of Fibre Reinforced Cement Composites", *The International Journal of Cement and Lightweight Concrete*, Vol. 1, No. 1, pp. 37-47, 1979.
- Swamy, R. N., "SFRC for Bridge Deck and Building Floor Applications", *Steel Fibre Concretes*, U.S.-Sweden Joint Seminar (NSF-STU), Estocolmo, 3-5 June 1985.
- Swamy, R. N. y Mangat, P. S., "Theory for the Flexural Strength of Steel Fibre Reinforced Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 4, pp. 313-325, 1974.
- Tan, K. H. y Saha, M. K., "Ten-Year Study on Steel Fibre-Reinforced Concrete Beams under Sustained Loads", *ACI Structural Journal*, No. 3, pp. 472-480, May 2005.
- Tan, K. H., Paramasivam, P. y Tan, K. C., "Creep and Shrinkage Deflections of RC Beams with Steel Fibres", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 474-494, November 1994¹.
- Tan, K. H., Paramasivam, P. y Tan, K. C., "Instantaneous and Long-Term Deflections of Steel Fibre Reinforced Concrete Beams", *ACI Structural Journal*, Vol. 91, N° 4, July-August 1994².
- Tan, K. H., Paramasivam, P. y Tan, K. C., "Cracking Characteristics of Reinforced Steel Fibre Reinforced Concrete Beams under Short-term and Long-term Loadings", *Journal of Advanced Cement Based Materials*, Vol. 2, pp. 127-137, 1995. *ACI Structural Journal*, Vol. 91, N° 4, July-August 1995.
- UNE 83.314, "Ensayos del Hormigón. Medida de la Consistencia del Hormigón Fresco. Método VeBe".
- UNE 83.501, "Hormigones con Fibras. Toma de Muestras de Hormigón Fresco".
- UNE 83.502, "Hormigones con Fibras. Fabricación en Laboratorio".
- UNE 83503:2004, "Hormigones con Fibras. Medida de la Docilidad por Medio del Cono Invertido".
- UNE 83.504:2004, "Hormigones con Fibras. Fabricación y Conservación de Probetas para los Ensayos de Laboratorio".
- UNE 83.505, "Hormigones con Fibras. Extracción y Conservación de Probetas Testigo".
- UNE 83.506, "Hormigones con Fibras. Refrentado de Probetas con Mortero de Azufre".
- UNE 83.507:2004, "Hormigones con Fibras. Rotura por Compresión".
- UNE 83.508, "Hormigones con Fibras. Determinación del Índice de Tenacidad a Compresión".
- UNE 83509:2004, "Hormigones con Fibras. Rotura por Flexotracción".
- UNE 83510:2004, "Hormigones con Fibras. Determinación del Índice de Tenacidad y Resistencia a Primera Fisura".

- UNE 83.511, "Hormigones con Fibras. Determinación de la Resistencia a Cortante".
- UNE 83.512-1, "Hormigones con Fibras. Determinación del Contenido de Fibras de Acero".
- UNE 83.513, "Hormigones con Fibras. Determinación de la Absorción de Energía. Ensayo de Punzonamiento".
- UNE 83.514, "Hormigones con Fibras. Determinación de la Resistencia a Impacto".
- UNE-EN 1097-6:2001, "Ensayos para Determinar las Propiedades Geométricas de los Áridos. Parte 6: Determinación de la Densidad de Partículas y la Absorción de Agua".
- UNE-EN 1352:1997, "Determinación del módulo de elasticidad estática bajo compresión del hormigón curado en autoclave o de áridos ligeros con estructura abierta".
- UNE-EN 1355:1997, "Determinación de las deformaciones de fluencia bajo compresión del hormigón curado en autoclave o de áridos ligeros con estructura abierta".
- UNE-EN 12350-1:2009, "Ensayos de hormigón fresco. Parte 1: Toma de muestras".
- UNE-EN 12350-2:2006, "Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento".
- UNE-EN 12350-3:2009, "Ensayos de hormigón fresco. Parte 3: Ensayo Vebe".
- UNE-EN 14651:2007 + A1:2008; "Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)".
- UNE-EN 14889-1:2008, "Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad".
- UNE-EN 14889-2:2008, "Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad".
- UNE-EN 15711:2006, "Pinturas y barnices. Determinación de la resistencia al desprendimiento catódico de recubrimientos expuestos al agua de mar".
- UNE-EN 933-1, "Ensayos para Determinar las Propiedades Geométricas de los Áridos. Parte 1: Determinación de la Granulometría de las Partículas, Tamices de Ensayo, Tamaño Nominal de las Aberturas".
- UNE-EN 933-2, "Ensayos para Determinar las Propiedades Geométricas de los Áridos. Parte 2: Determinación de la Granulometría de las Partículas, Método del Tamizado".
- UNI 11037, "Fibre di Acciaio da Impiegare nel Confezionamento di Conglomerato Cementizio Rinforzato".
- UNI 11039-2, "Metodo di prova per la determinazione della resistenza di prima fessurazione e degli indicio di duttilità", 2003.

- Valle, M. y Büyüköztürk, O., "Behaviour of Fibre Reinforced High-Strength Concrete Under Direct Shear". ACI Journal, March-April 1993.
- Wafa, F. F. y Ashour, S.A., "Mechanical Properties of High-Strength Fiber Reinforced Concrete", ACI Mater. J., V. 89, No. 5, pp. 449-455, 1992.
- Wang, Z. L., Liu, Y. S., Shen, R. F., "Stress-strain relationship of steel fibre-reinforced concrete under dynamic compression", Construction and Building Materials, Vol. 22 (5), pp. 811-819, 2008.
- Yazici, S., Inan, G., y Tabak, V., "Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC", Construction and Building Materials, Vol. 21, pp.1250-1253, 2007.
- Yaoa, W., Lib, J. y Wu, K., "Mechanical Properties of Hybrid Fibre-Reinforced Concrete at Low Fibre Volume Fraction", Cement and Concrete Research, (33), 2003.

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

ANEJOS

ANEJO 1. CÁLCULO DEL ARMADO EQUIVALENTE

ANEJO 2. RESULTADOS DE ENSAYOS DE ROTURA A FLEXOTRACCIÓN

ANEJO 3. RESULTADOS DE ENSAYOS DE PREFISURACIÓN

ANEJO 4. CURVAS DE FLUENCIA

ANEJO 5. GRÁFICOS COMPLETOS Y FICHAS DE ENSAYO

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

ANEJO 1

CÁLCULO DEL ARMADO EQUIVALENTE

En el apartado 4.5 se ha presentado la definición de los elementos armados. En este Anejo se presentan los cálculos realizados para determinar el armado de dichos elementos.

El cálculo del armado equivalente se ha realizado teniendo en cuenta los valores máximos de las resistencias residuales ($f_{R,max}$) de los ensayos de rotura a flexotracción de caracterización de I-80/35-70-10 y II-45/50-40-20.

Hormigón		
	I-80/35-70-10	II-45/50-40-20
$f_{R,max}$	11 MPa	5 MPa

Asumiendo una distribución lineal de tensiones, el momento de rotura se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$M = \frac{f_{R,max} \cdot h_{sp}^2 \cdot b}{6}$$

Donde:

$f_{R,max}$: resistencia residual máxima.

h_{sp} : canto de la probeta (descontando la altura de la entalla).

b : anchura de la sección transversal de la probeta.

Hormigón		
	I-80/35-70-10	II-45/50-40-20
M	4.296.875 N.mm	1.953.125 N.mm

Considerando la posición de la armadura a 100 mm de la cara superior del elemento (fibra extrema a compresión), la resultante de tracción equivalente de la armadura (T_s) es:

Hormigón		
	I-80/35-70-10	II-45/50-40-20
T_s	42968 N	19531 N

Por lo tanto, para los elementos con hormigón Tipo I resultan dos redondos de 8 mm (50000 N), y para el hormigón Tipo II resultan dos redondos de 6 mm (28270 N) (diámetro mínimo según serie normalizada EHE art. 32.2).

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

ANEJO 2

RESULTADOS DE ENSAYOS DE ROTURA A FLEXOTRACCIÓN

En este anejo se presentan los resultados de los ensayos de rotura a flexotracción.

Para cada hormigón se incluye una tabla con los datos identificativos de las probetas, un gráfico con las curvas carga-abertura de fisura del ensayo de flexotracción y una tabla con los valores de la resistencia de primera fisura y de las resistencias residuales definidas por la UNE-EN 14651:2007 + A1:2008

Elementos I-80/35-40-10

Tabla A2.1a. Elementos I-80/35-40-10 ensayados a rotura en flexotracción.

Elemento	Serie	Amasada	Nº elementos
1	1	1	2
2			
3		2	3
4			
5			
6	2	4	1
7		5	1

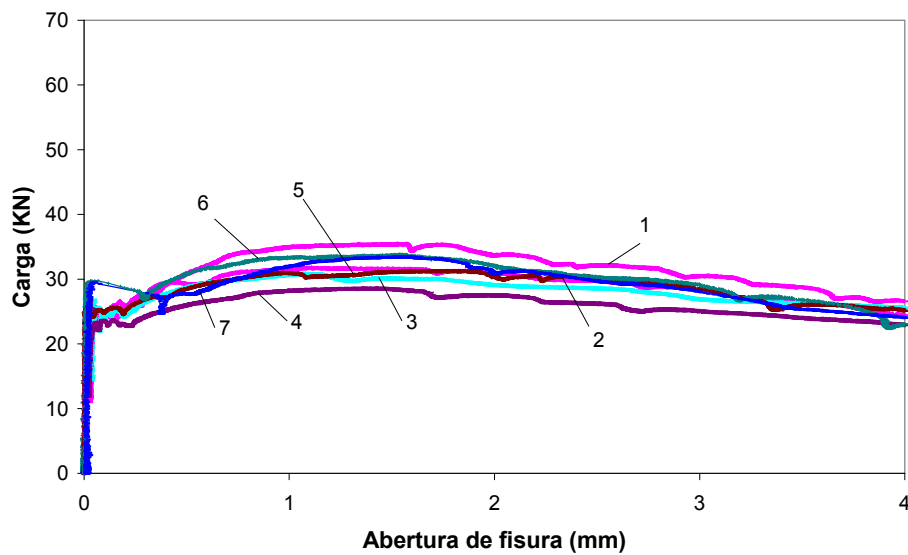


Figura A2.1. Curvas de flexotracción para elementos I-80/35-40-10.

Tabla A2.1b. Elementos I-80/35-40-10 ensayados a rotura en flexotracción.

Elementos	Valores de resistencia residual de tracción a flexión (Mpa)				
	f_{cl}^f	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	4.99	5.92	6.79	6.16	5.51
2	4.91	5.61	6.07	5.71	5.07
3	5.02	5.52	5.78	5.49	5.04
4	5.09	4.98	5.46	5.03	4.61
5	5.05	5.47	5.97	5.74	5.00
6	5.71	5.92	6.46	5.81	5.14
7	5.68	5.31	6.42	5.72	4.86
Media	5.21	5.53	6.13	5.66	5.03
σ (MPa)	0.34	0.33	0.45	0.35	0.28
CV (%)	6.5	6.0	7.4	6.1	5.5

Elementos I-80/35-70-10

Tabla A2.2a. Elementos I-80/35-70-10 ensayados a rotura en flexotracción.

Elemento	Serie	Amasada	Nº elementos
1	1	1	3
2			
3			
4		2	2
5			
6	2	5	1
7		6	1

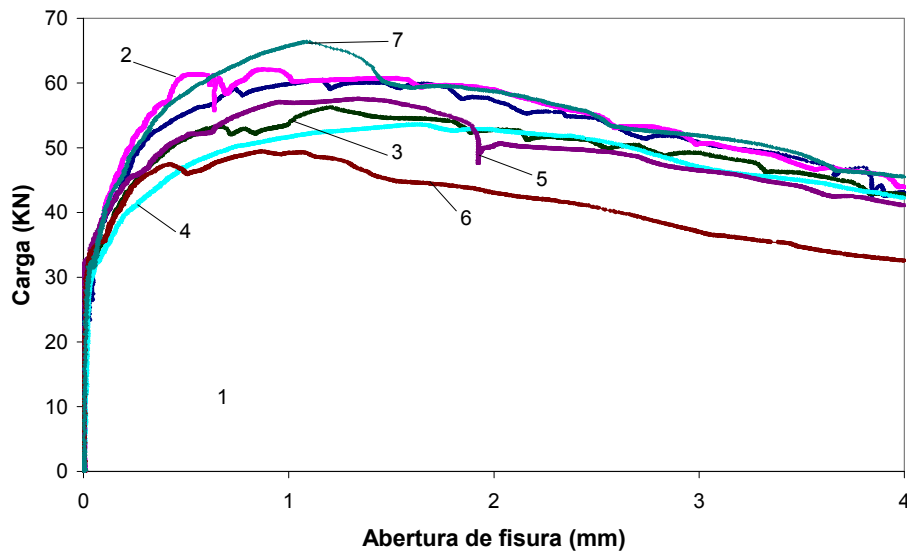


Figura A2.2. Curvas de flexotracción para elementos I-80/35-70-10.

Tabla A2.2b. Elementos I-80/35-70-10 ensayados a rotura en flexotracción.

Elementos	Valores de resistencia residual de tracción a flexión (Mpa)				
	f_{ctL}^f	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	6.48	10.62	11.44	10.47	9.27
2	6.33	11.76	11.67	10.57	9.08
3	6.29	9.90	10.51	9.71	8.84
4	5.91	9.04	10.24	9.82	8.63
5	6.87	9.95	10.96	9.51	8.44
6	6.63	8.85	8.64	7.83	6.66
7	6.18	11.24	11.49	10.52	9.42
Media	6.38	10.19	10.71	9.78	8.62
σ (MPa)	0.31	1.08	1.06	0.96	0.93
CV (%)	4.88	10.60	9.86	9.82	10.81

Elementos I-80/50-40-10

Tabla A2.3a. Elementos I-80/50-40-10 ensayados a rotura en flexotracción.

Elemento	Serie	Amasada	Nº elementos
1	3	1	2
2			
3		2	3
4			
5			

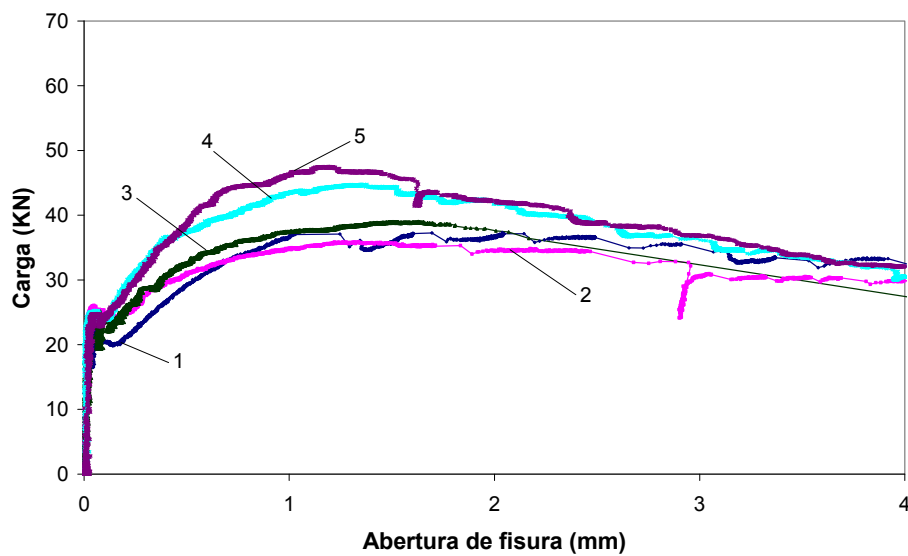


Figura A2.3. Curvas de flexotracción para elementos I-80/50-40-10.

Tabla A2.3b. Elementos I-80/50-40-10 ensayados a rotura en flexotracción.

Elementos	Valores de resistencia residual de tracción a flexión (Mpa)				
	f_{ctL}^f	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	4.19	5.31	6.51	6.67	6.10
2	4.80	5.65	6.57	6.33	5.57
3	4.61	6.00	7.18	-	-
4	4.58	6.83	8.10	7.16	6.12
5	4.47	6.94	8.30	7.01	6.13
Media	4.53	6.14	7.33	6.79	5.98
σ (MPa)	0.22	0.72	0.84	0.37	0.27
CV (%)	4.91	11.65	11.42	5.42	4.55

Elementos I-2φ8-10

Tabla A2.4a. Elementos I-2φ8-10 ensayados a rotura en flexotracción.

Elemento	Serie	Amasada	Nº elementos
1	3	1	2
2			

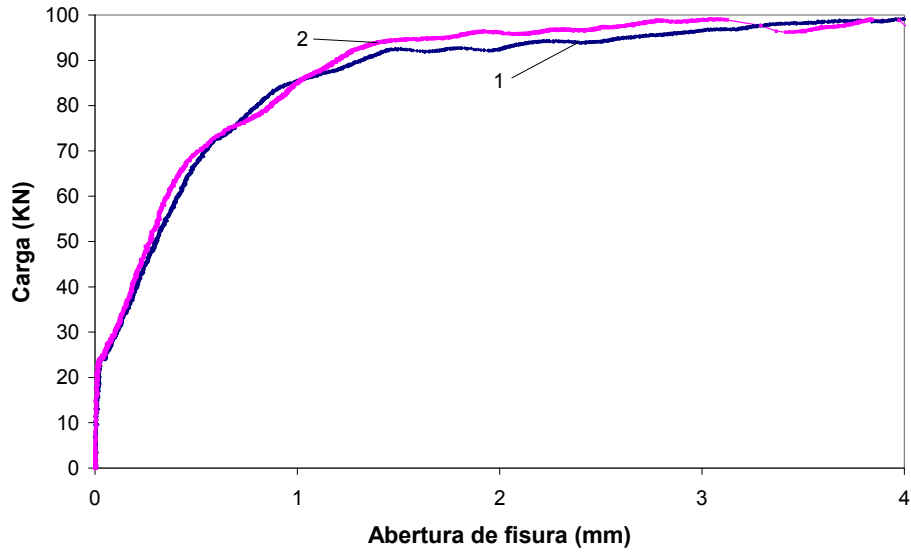


Figura A2.4. Curvas de flexotracción para elementos I-2φ8-10.

Tabla A2.4b. Elementos I-2φ8-10 ensayados a rotura en flexotracción.

Elementos	Valores de resistencia residual de tracción a flexión (Mpa)				
	f_{ctL}^f	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	4.74	12.88	17.76	18.06	18.85
2	4.99	13.33	18.14	18.66	18.54
Media	4.86	13.10	17.95	18.36	18.70

Elementos II-80/50-40-20

Tabla A2.5a. Elementos II-80/50-40-20 ensayados a rotura en flexotracción.

Elemento	Serie	Amasada	Nº elementos
1	3	1	2
2			
3		2	3
4			
5			

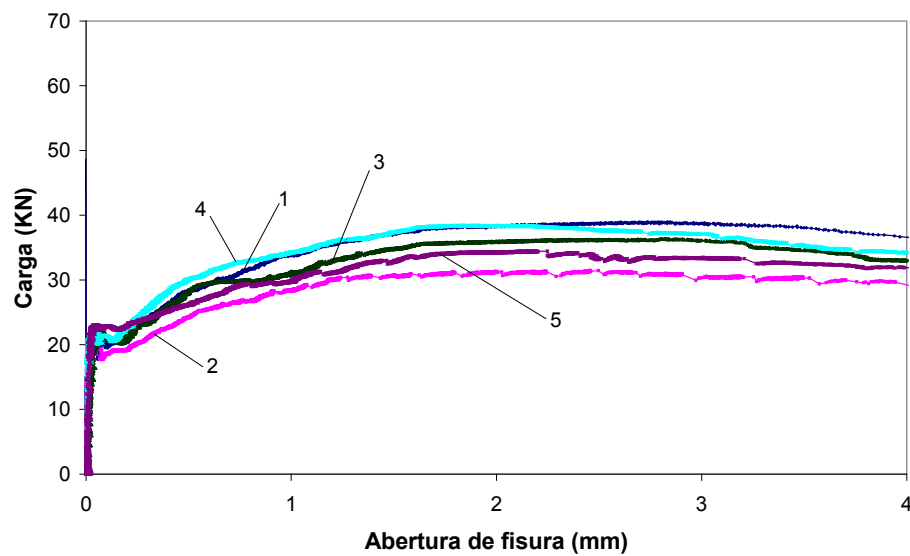


Figura A2.5. Curvas de flexotracción para elementos II-80/50-40-20.

Tabla A2.5b. Elementos II-80/50-40-20 ensayados a rotura en flexotracción.

Elementos	Valores de resistencia residual de tracción a flexión (Mpa)				
	f_{ctL}^f	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	3.95	5.38	7.04	7.31	7.19
2	3.82	4.44	5.64	5.77	5.55
3	3.90	5.15	6.35	6.61	6.32
4	3.89	5.41	6.69	6.74	6.32
5	4.11	4.68	5.89	5.97	5.82
Media	3.93	5.01	6.32	6.48	6.24
σ (MPa)	0.11	0.43	0.57	0.62	0.63
CV (%)	2.75	8.63	9.03	9.60	10.01

Elementos II-65/40-40-20

Tabla A2.6a. Elementos II-65/40-40-20 ensayados a rotura en flexotracción.

Elemento	Serie	Amasada	Nº elementos
1	1	1	3
2			
3			
4	2	2	2
5			

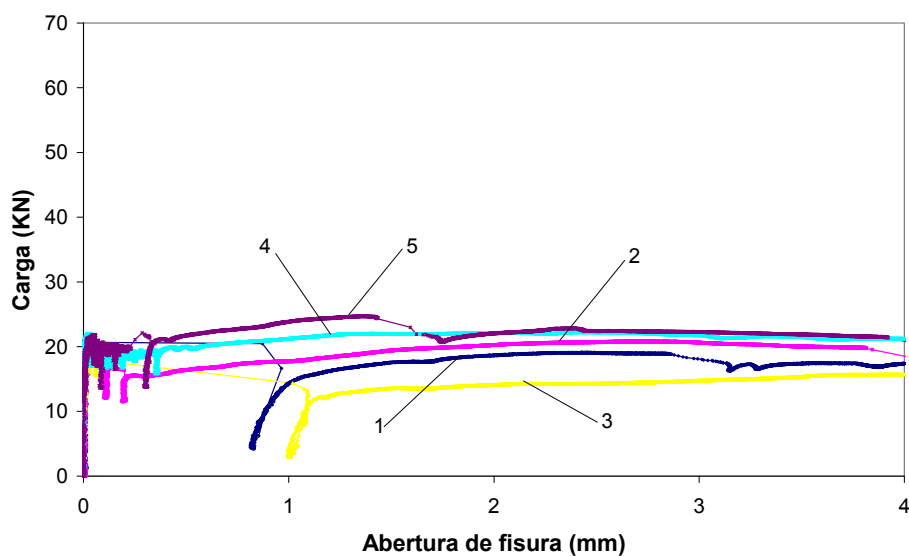


Figura A2.6. Curvas de flexotracción para elementos II-65/40-40-20.

Tabla A2.6b. Elementos II-65/40-40-20 ensayados a rotura en flexotracción.

Elementos	Valores de resistencia residual de tracción a flexión (Mpa)				
	f_{ctL}^f	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	3.99	-	3.37	3.65	3.34
2	4.06	3.15	3.72	3.97	3.84
3	3.86	-	2.61	2.74	2.74
4	4.17	3.84	4.22	4.26	4.12
5	4.08	4.17	4.68	4.30	4.20
Media	4.03	3.72	3.72	3.79	3.65
σ (MPa)	0.11	0.52	0.79	0.64	0.61
CV (%)	2.8	14.0	21.4	17.0	16.7

Elementos II-45/50-40-20

Tabla A.2.7a. Elementos II-45/50-40-20 ensayados a rotura en flexotracción.

Elemento	Serie	Amasada	Nº elementos
1	2	1	2
2			
3	3	2	2
4			

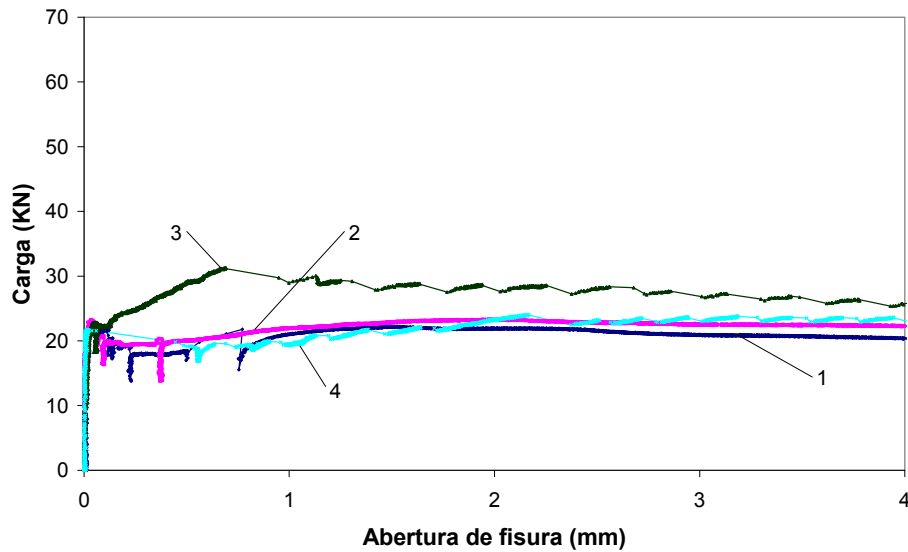


Figura A2.7. Curvas de flexotracción para elementos II-45/50-40-20.

Tabla A2.7b. Elementos II-45/50-40-20 ensayados a rotura en flexotracción.

Elementos	Valores de resistencia residual de tracción a flexión (Mpa)				
	f_{ctL}^f	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	4.33	3.27	4.24	4.14	3.97
2	4.42	3.84	4.39	4.37	4.30
3	4.21	5.33	5.25	5.18	4.95
4	4.01	3.57	3.91	4.27	4.37
Media	4.24	4.00	4.45	4.49	4.40
σ (MPa)	0.18	0.92	0.57	0.47	0.41
CV (%)	4.2	22.9	12.8	10.4	9.2

Elementos II-50/30-40-10

Tabla A2.8a. Elementos II-50/30-40-10 ensayados a rotura en flexotracción.

Elemento	Serie	Amasada	Nº elementos
1	1	1	3
2			
3			
4	2	2	
5			
6	2	4	1

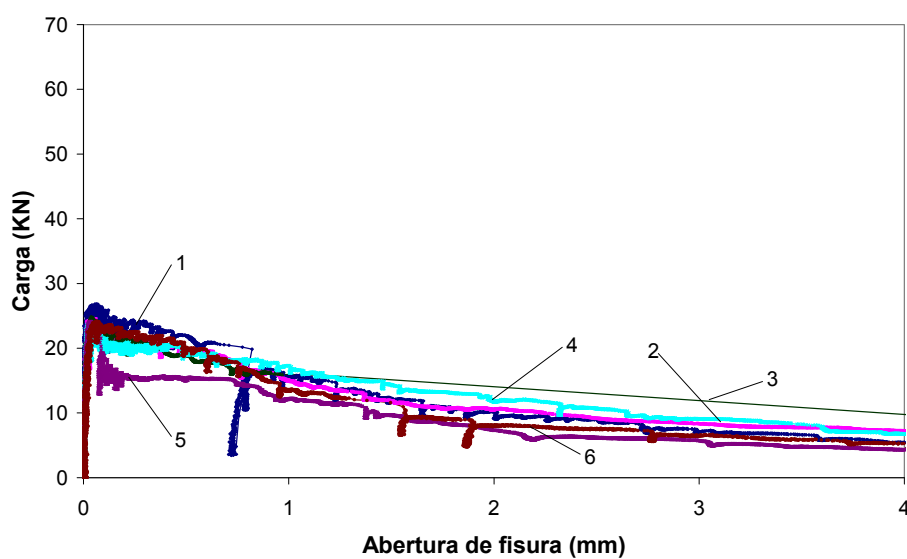


Figura A2.8. Curvas de flexotracción para elementos II-50/30-40-10.

Tabla A2.8b. Elementos II-50/30-40-10 ensayados a rotura en flexotracción.

Elementos	Valores de resistencia residual de tracción a flexión (Mpa)				
	f_{cL}^f	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	4.91	4.22	2.31	1.73	1.28
2	4.71	3.80	2.29	1.76	1.49
3	4.76	3.63	-	-	-
4	4.48	3.78	2.76	2.05	1.59
5	4.61	2.92	1.85	1.18	0.92
6	4.59	3.82	2.23	1.44	1.13
Media	4.68	3.69	2.29	1.63	1.28
σ (MPa)	0.15	0.43	0.32	0.33	0.27
CV (%)	3.3	11.6	14.0	20.3	21.0

Elementos II-2φ6-20

Tabla A2.9a. Elementos II-2φ6-20 ensayados a rotura en flexotracción.

Elemento	Serie	Amasada	N° elementos
1	3	1	2
2			

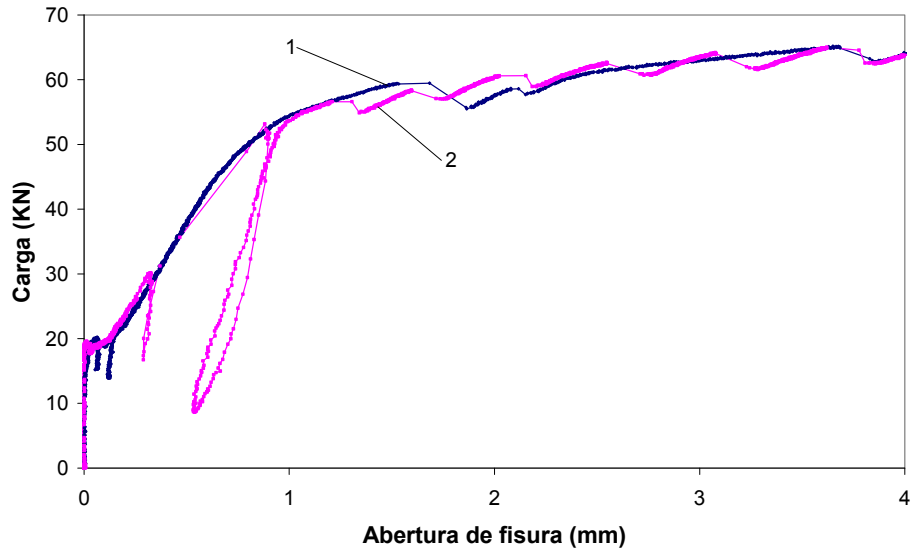


Figura A2.9. Curvas de flexotracción para elementos II-2φ6-20.

Tabla A2.9b. Elementos II-2φ6-20 ensayados a rotura en flexotracción.

Elementos	Valores de resistencia residual de tracción a flexión (Mpa)				
	f_{cl}^f	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	3.75	7.22	11.36	11.75	12.42
2	3.70	6.84	10.96	11.95	12.27
Media	3.72	7.03	11.16	11.85	12.34

ANEJO 3

RESULTADOS DE ENSAYOS DE PREFISURACIÓN

En las Tablas 6.5, 6.6 y 6.7 se presentaron, organizados por series y de forma resumida, los resultados de los ensayos de prefisuración de todos los elementos. En este Anejo se presentan las curvas carga-abertura de fisura de los ensayos para cada hormigón, así como tablas con información sobre la serie y la amasada a la que pertenecen los distintos elementos y con los resultados completos del proceso de prefisuración.

Elementos I-80/35-40-10

Tabla A3.1a. Elementos I-80/35-40-10 prefisurados.

Elemento	Serie	Amasada	Nº elementos
1	1	3	3
2			
3			
4	2	4	4
5			
6			
7		5	4
8			
9			

Tabla A3.1b. Resultados de proceso de prefisuración para elementos I-80/35-40-10.

Serie	Bastidor	Posición	Id elem	w_p (mm)	w_{pr} (mm)	F_L (kN)	F_w (kN)
1	1	1	1	0.501	0.266	25.3	27.9
		2	2	0.508	0.298	26.7	32.0
		3	3	0.501	0.312	26.8	33.5
2	2	1	21	0.507	0.270	30.9	31.6
		2	22	0.514	0.291	32.1	38.1
		3	23	0.520	0.285	33.4	45.1
	3*	1	24	1.505	1.115	31.4	41.1
		2	25	1.505	1.068	30.6	42.8
		3	26	1.504	1.092	30.6	45.5

* $w_n = 1.5$ mm

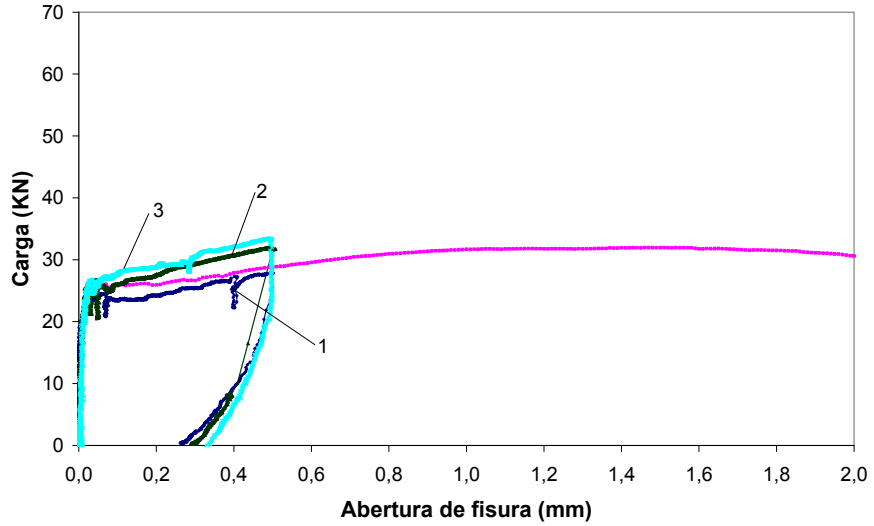


Figura A3.1a. Curvas del proceso de prefisuración para elementos I-80/35-40-10, Amasada 3.

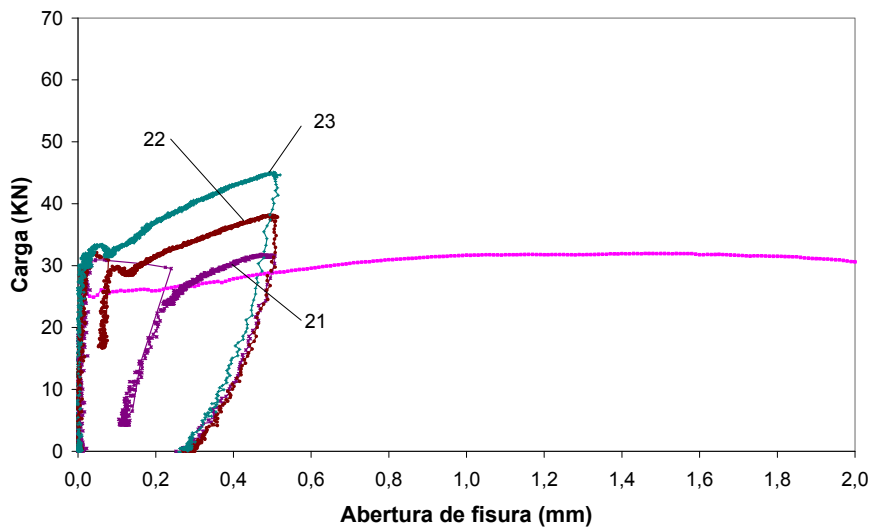


Figura A3.1b. Curvas del proceso de prefisuración para elementos I-80/35-40-10, Amasada 4.

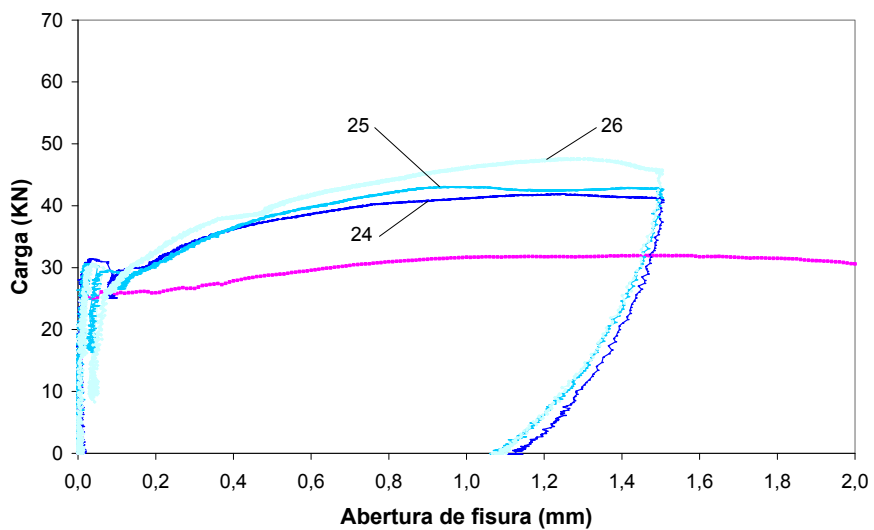


Figura A3.1c. Curvas del proceso de prefisuración para elementos I-80/35-40-10, Amasada 5.

Elementos I-80/35-70-10

Tabla A3.2a. Elementos I-80/35-70-10 prefisurados.

Elemento	Serie	Amasada	Nº elementos
1	1	3	3
2			
3			
4		4	3
5			
6			
7	2	5	4
8			
9			
10		6	4
11			

Tabla A3.2b. Resultados de proceso de prefisuración para elementos I-80/35-70-10.

Serie	Bastidor	Posición	Id elem	w_p (mm)	w_{pr} (mm)	F_L (kN)	F_w (kN)
1	2	1	4	0.511	0.234	30.8	57.0
		2	5	0.505	0.251	35.4	60.6
		3	6	0.513	0.274	36.3	61.6
	3	1	7	0.505	0.253	31.3	49.5
		2	8	0.509	0.253	30.2	49.6
		3	9	0.505	0.246	31.0	50.8
2	4	1*	27	0.511	0.244	34.4	50.1
		2*	28	0.507	0.178	42.0	50.3
		3	29	0.518	0.229	33.8	60.0
		1**	30	0.525	0.256	31.4	50.6
		2**	31	0.516	0.243	31.6	52.1

* elementos que experimentan rotura en proceso de puesta en carga o a pocos minutos de finalizar la puesta en carga en el ensayo de fluencia.

** elementos que reemplazan a los que llegan a la rotura en el ensayo de fluencia.

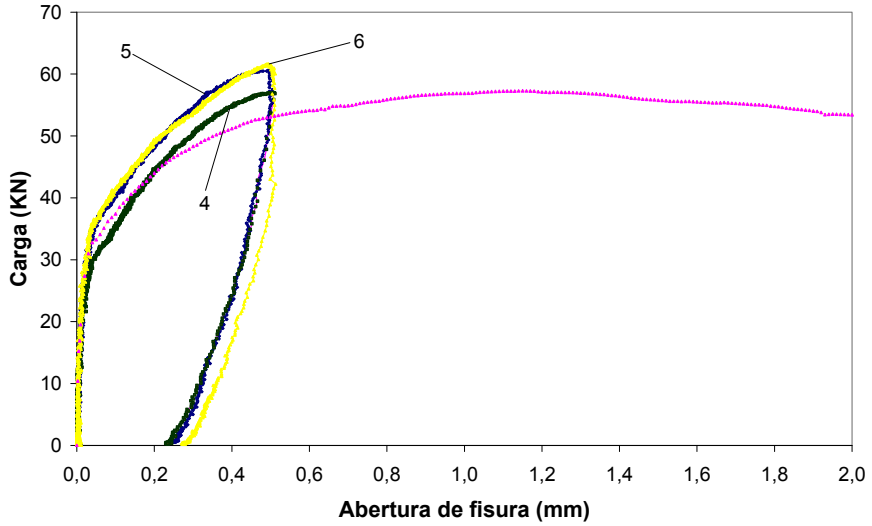


Figura A3.2a. Curvas del proceso de prefisuración para elementos I-80/35-70-10, Amasada 3.

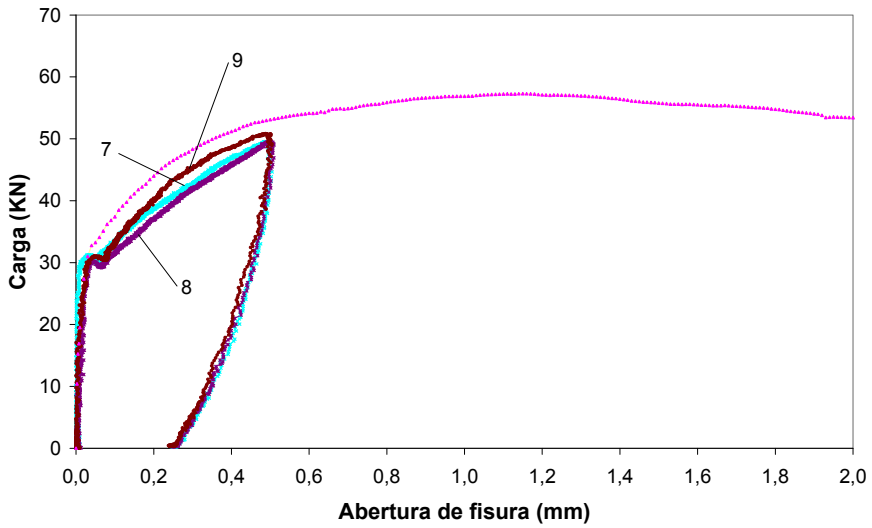


Figura A3.2b. Curvas del proceso de prefisuración para elementos I-80/35-70-10, Amasada 4.

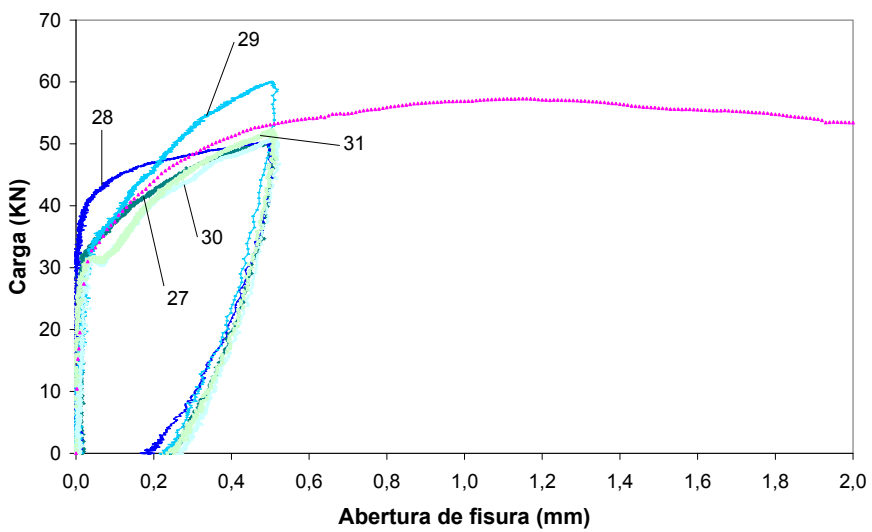


Figura A3.2c. Curvas del proceso de prefisuración para elementos I-80/35-70-10, Amas. 5 y 6.

Elementos I-80/50-40-10

Tabla A3.3a. Elementos I-80/50-40-10 prefisurados.

Elemento	Serie	Amasada	Nº elementos
1	3	1	6
2			
3			

Tabla A3.3b. Resultados de proceso de prefisuración para elementos I-80/50-40-10.

Serie	Bastidor	Posición	Id elem	w_p (mm)	w_{pr} (mm)	F_L (kN)	F_w (kN)
3	3	1	40	1.110	0.738	30.2	32.8
		2	41	0.511	0.250	26.7	35.8
		3	42	0.515	0.278	27.7	36.9

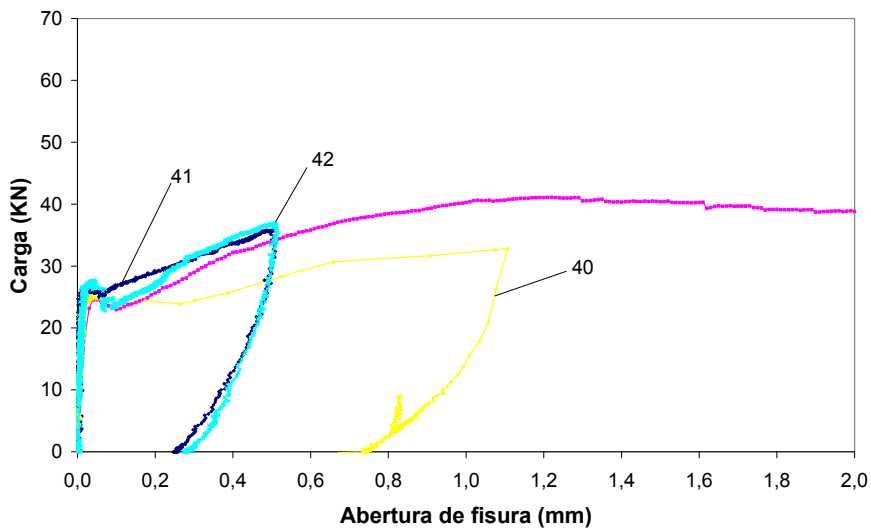


Figura A3.3a. Curvas del proceso de prefisuración para elementos I-80/50-40-10, Amasada 1.

Elementos I-2φ8-10

Tabla A3.4a. Elementos I-2φ8-10 prefisurados.

Elemento	Serie	Amasada	Nº elementos
1	3	1	6
2			
3			

Tabla A3.4b. Resultados de proceso de prefisuración para elementos I-2φ8-10.

Serie	Bastidor	Posición	Id elem	w_p (mm)	w_{pr} (mm)	F_L (kN)	F_w (kN)
3	5	1	46	0.530	0.096	25.7	62.0
		2	47	-	-	-	67.3
		3	48	0.517	0.101	26.9	73.7

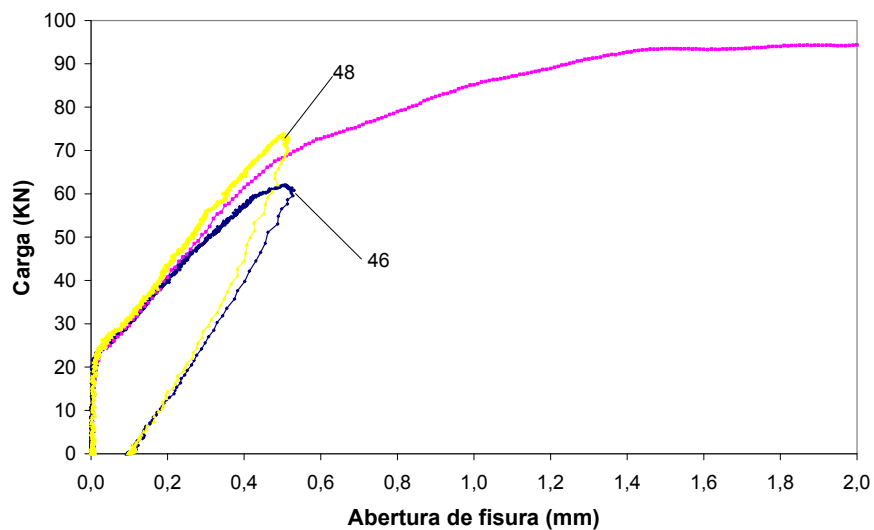


Figura A3.4a. Curvas del proceso de prefisuración para elementos I-2φ8-10, Amasada 1.

Elementos II-80/50-40-20

Tabla A3.5a. Elementos II-80/50-40-20 prefisurados.

Elemento	Serie	Amasada	Nº elementos
1	3	1	6
2			
3			

Tabla A3.5b. Resultados de proceso de prefisuración para elementos II-80/50-40-20.

Serie	Bastidor	Posición	Id elem	w_p (mm)	w_{pr} (mm)	F_L (kN)	F_w (kN)
3	2	1	38	0.505	0.254	21.0	23.3
		2	39	0.515	0.298	22.4	25.6
		3	40	0.515	0.290	21.0	25.6

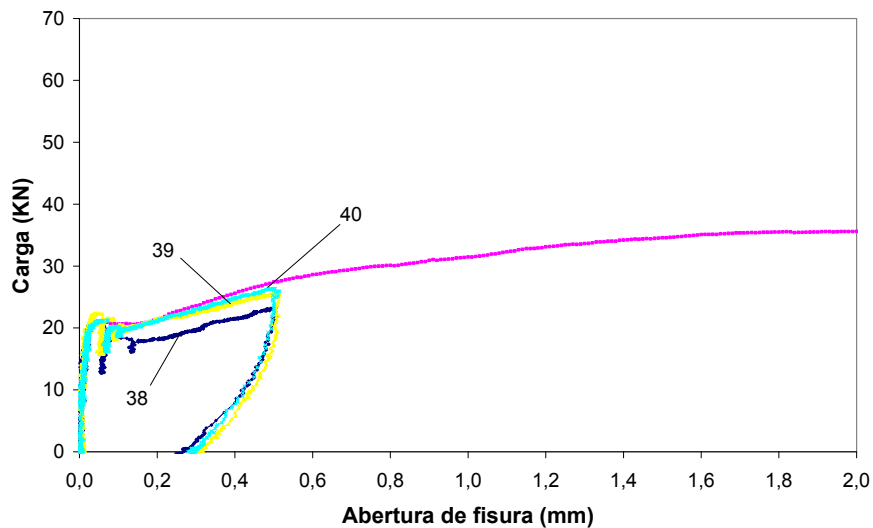


Figura A3.5a. Curvas del proceso de prefisuración para elementos II-80/50-40-20, Amasada 1.

Elementos II-65/40-40-20

Tabla A3.6a. Elementos II-65/40-40-20 prefisurados.

Elemento	Serie	Amasada	Nº elementos
1	1	3	3
2			
3			

Tabla A3.6b. Resultados de proceso de prefisuración para elementos II-65/40-40-20.

Serie	Bastidor	Posición	Id elem	w_p (mm)	w_{pr} (mm)	F_L (kN)	F_w (kN)
1	4	1	10	0.992	0.801	20.7	15.9
		2	11	0.599	0.430	18.4	15.8
		3	12	0.507	0.330	19.5	

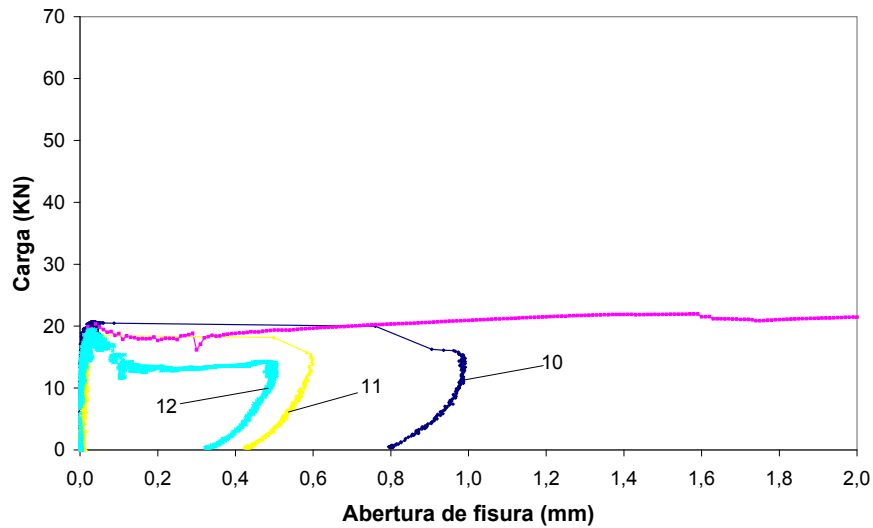


Figura A3.6a. Curvas del proceso de prefisuración para elementos II-65/40-40-20, Amasada 3.

Elementos II-45/50-40-20

Tabla A3.7a. Elementos II-45/50-40-20 prefisurados.

Elemento	Serie	Amasada	N° elementos
1	2	1	6
2			
3			
4	3	2	6
5			
6			

Tabla A3.7b. Resultados de proceso de prefisuración para elementos II-45/50-40-20.

Serie	Bastidor	Posición	Id elem	w_p (mm)	w_{pr} (mm)	F_L (kN)	F_w (kN)
2	5	1	32	0.507	0.356	21.8	17.0
		2	33	0.510	0.356	22.8	21.3
		3	34	0.513	0.332	23.2	22.6
3	1	1	35	0.511	0.357	23.6	20.5
		2	36	0.511	0.361	19.6	22.8
		3	37	0.508	0.342	25.7	26.4

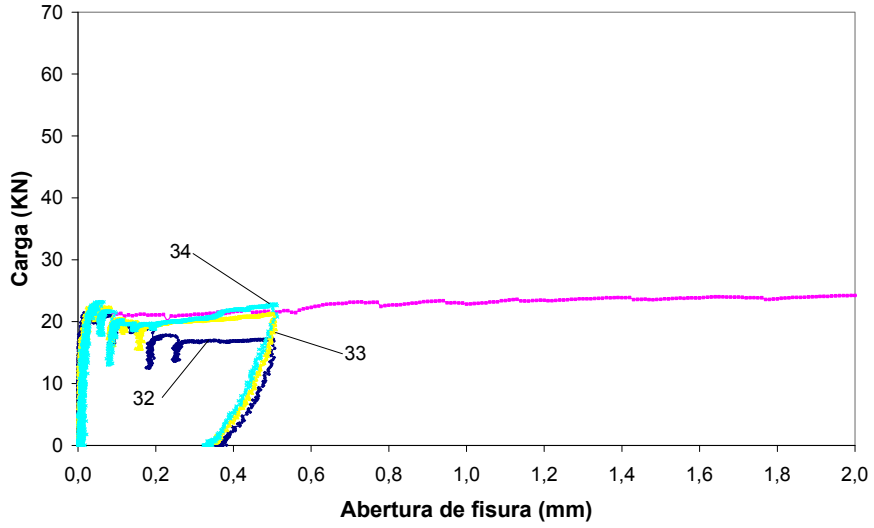


Figura A3.7a. Curvas del proceso de prefisuración para elementos II-45/40-40-20, Amasada 1.

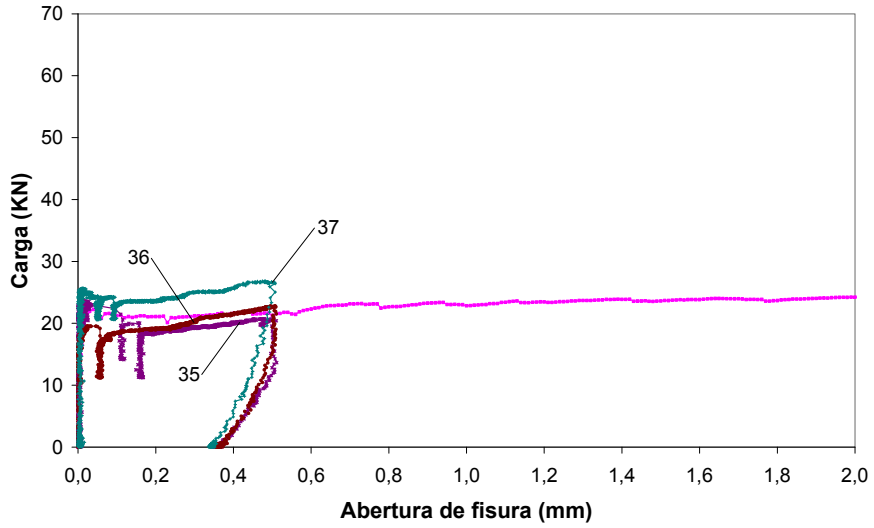


Figura A3.7b. Curvas del proceso de prefisuración para elementos II-45/50-40-20, Amasada 2.

Elementos II-50/30-40-10

Tabla A3.8a. Elementos II-50/30-40-10 prefisurados.

Elemento	Serie	Amasada	Nº elementos
1	1	3	3
2			
3			
4	2	4	6
5			
6			
7			
8			

Tabla A3.8b. Resultados de proceso de prefisuración para elementos II-50/30-40-10.

Serie	Bastidor	Posición	Id elem	w_p (mm)	w_{pr} (mm)	F_L (kN)	F_w (kN)
1	5	1	13	0.510	0.402	20.3	12.9
		2	14	0.510	0.383	22.1	18.1
		3	15	0.518	0.346	23.1	20.2
2	1	1*	16	0.513	0.354	23.8	17.1
		2*	17	0.510	0.364	24.2	19.1
		3	18	0.509	0.364	25.7	21.3
		1**	19	0.507	0.367	23.1	18.6
		2**	20	0.516	0.386	23.6	20.5

* elementos que experimentan rotura en proceso de puesta en carga o a pocos minutos de finalizar la puesta en carga en el ensayo de fluencia.

** elementos que reemplazan a los que llegan a la rotura en el ensayo de fluencia.

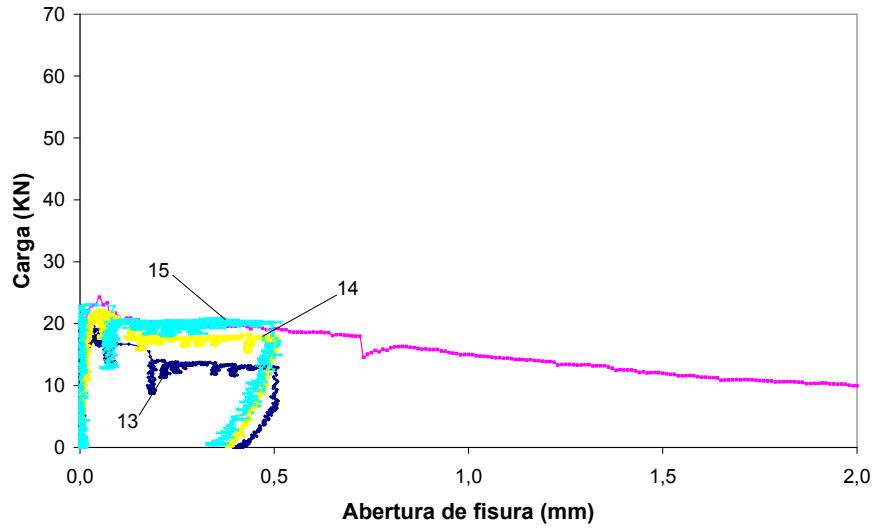


Figura A3.8a. Curvas del proceso de prefisuración para elementos II-50/30-40-10, Amasada 3.

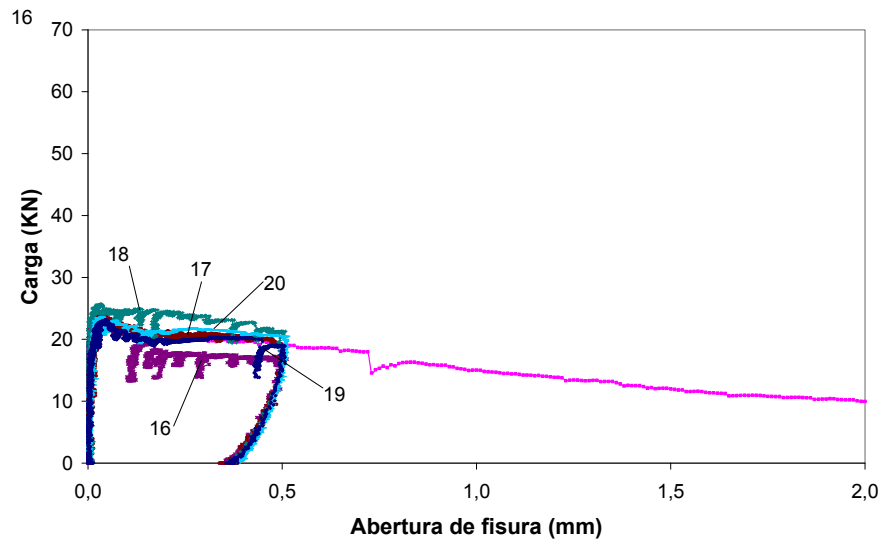


Figura A3.8b. Curvas del proceso de prefisuración para elementos II-50/30-40-10, Amasada 4.

Elementos II-2φ6-20

Tabla A3.9a. Elementos II-45/50-40-20 prefisurados.

Elemento	Serie	Amasada	Nº elementos
1	3	1	6
2			
3			

Tabla A3.9b. Resultados de proceso de prefisuración para elementos II-2φ6-20.

Serie	Bastidor	Posición	Id elem	w_p (mm)	w_{pr} (mm)	F_L (kN)	F_w (kN)
3	4	1	43	0.515	0.134	21.7	41.5
		2	44	0.517	0.157	21.5	42.1
		3	45	0.515	0.170	22.5	41.7

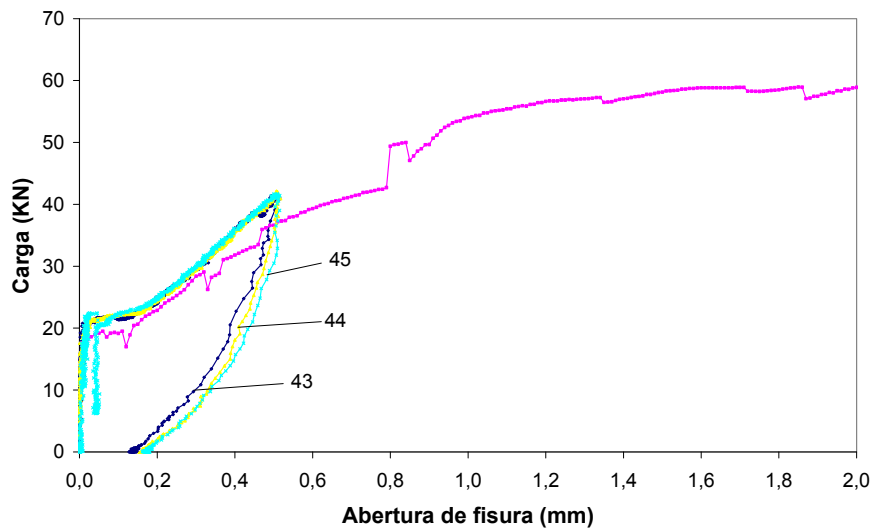


Figura A3.9a. Curvas del proceso de prefisuración para elementos II-2φ6-20, Amasada 1.

ANEJO 4

CURVAS DE FLUENCIA

En las Tablas 6.12, 6.13 y 6.14, y 6.48, 6.49 y 6.50 se presentaron los resultados de la evolución de la abertura de fisura en el ensayo de fluencia en la etapa de carga y en la etapa de descarga y recuperación, respectivamente. En este Anejo se incluyen las curvas abertura de fisura-tiempo de los ensayos de fluencia para cada hormigón y tablas con información sobre la series, el bastidor y la carga aplicada en cada elemento.

Elementos I-80/35-40-10**Tabla A4.1.** Elementos I-80/35-40-10.

Elemento	Serie	Bastidor	IF_a (%)	F_a (kN)
1	1	1	60.9	17.0
2			54.9	17.6
3			54.2	18.2
21	2	2	97.0	30.6
22			81.9	31.2
23			70.5	31.8
24		3*	82.9	34.1
25			81.0	34.6
26			77.4	35.2

* $w_n = 1.5$ mm

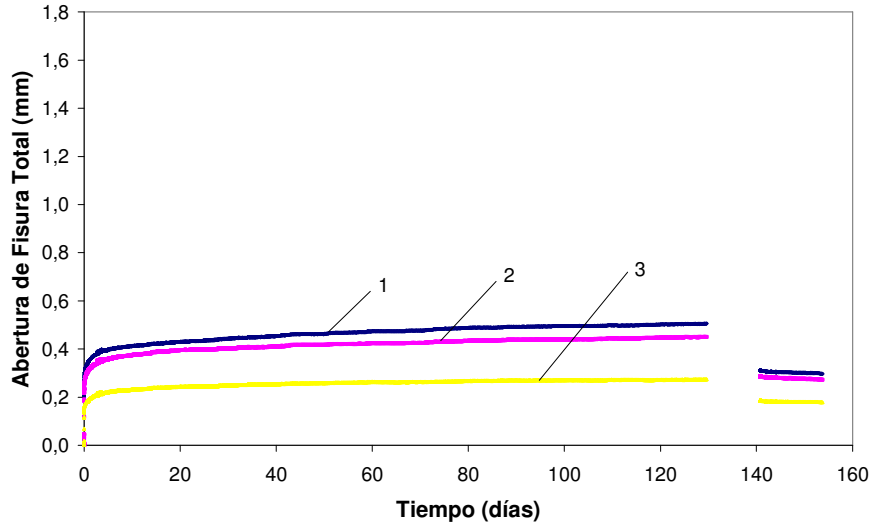


Figura A4.1a. Curvas de fluencia elementos I-80/35-40-10, Serie 1, Bastidor 1.

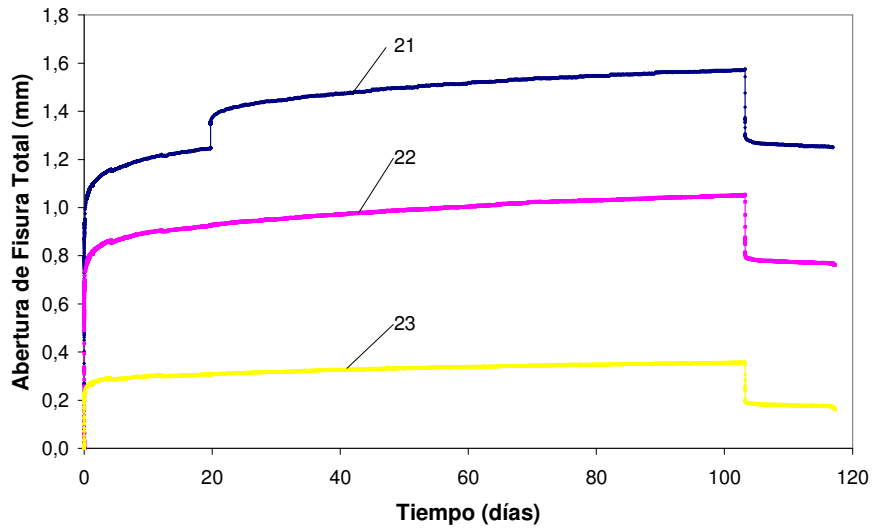


Figura A4.1b. Curvas de fluencia elementos I-80/35-40-10, Serie 2, Bastidor 2.

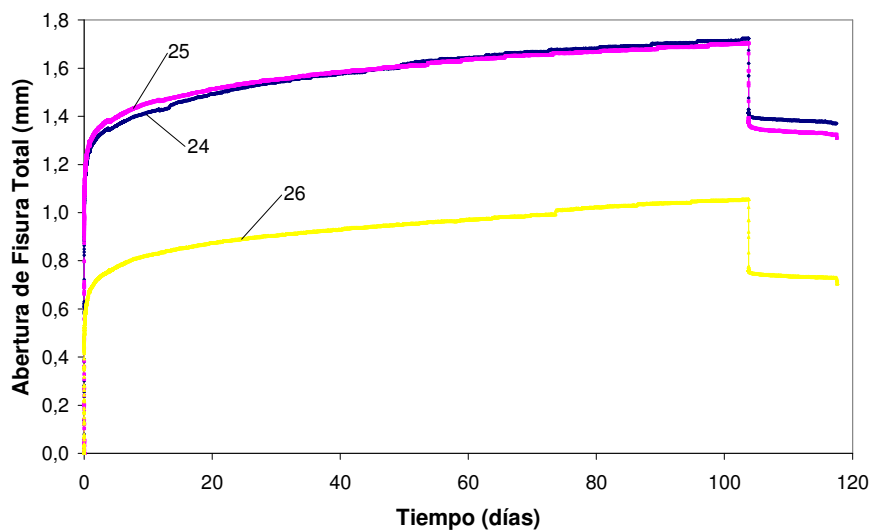


Figura A4.1c. Curvas de fluencia elementos I-80/35-40-10, Serie 2, Bastidor 3.

Elementos I-80/35-70-10**Tabla A4.2.** Elementos I-80/35-70-10.

Elemento	Serie	Bastidor	IF_a (%)	F_a (kN)
4	1	2	61.9	35.3
5			59.2	35.9
6			59.2	36.5
7		3	81.0	40.1
8			82.2	40.7
9			81.3	41.3
30	2	4	93.7	47.4
31			92.1	48.0
29			80.9	48.6

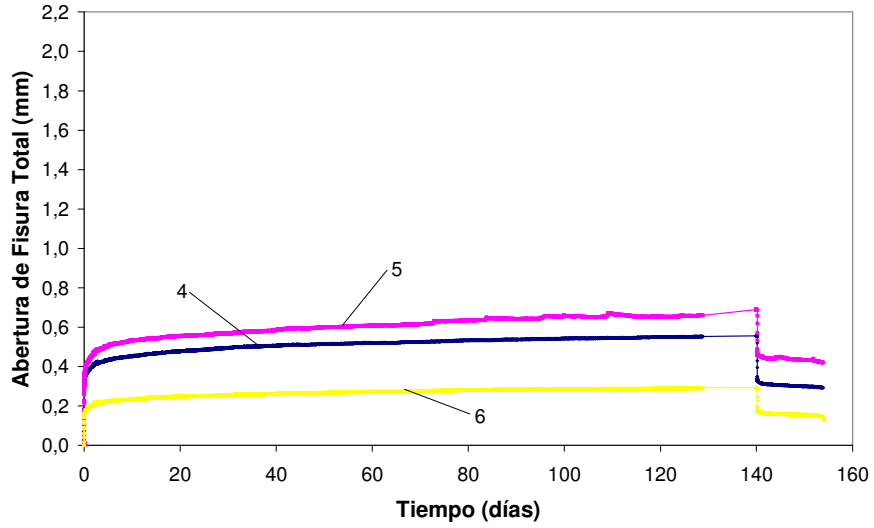


Figura A4.2a. Curvas de fluencia elementos I-80/35-70-10, Serie 1, Bastidor 2.

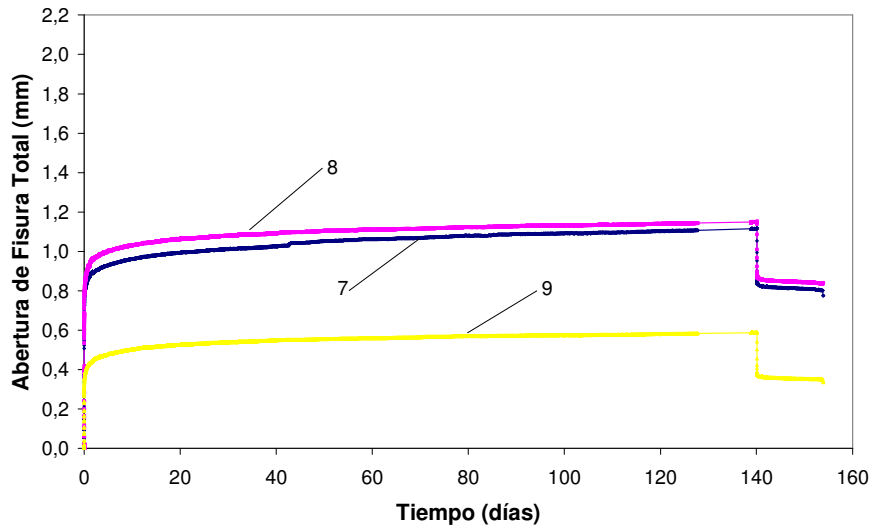


Figura A4.2b. Curvas de fluencia elementos I-80/35-70-10, Serie 1, Bastidor 3.

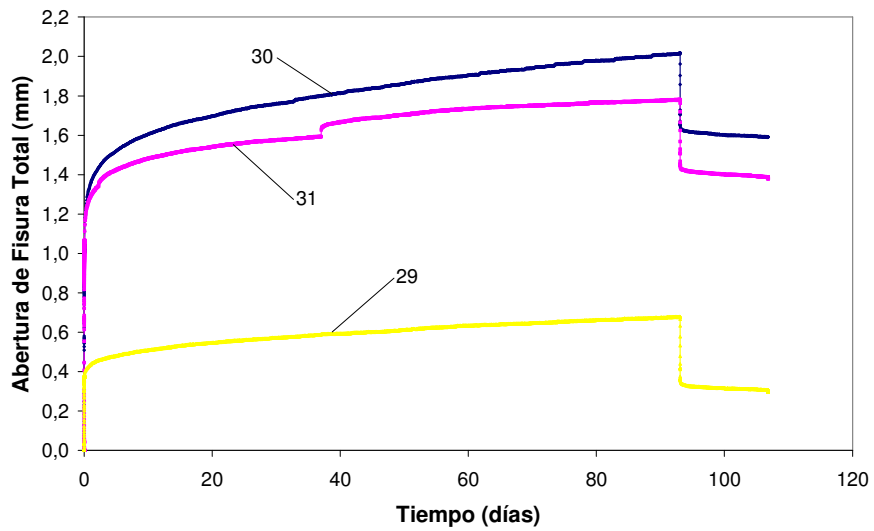
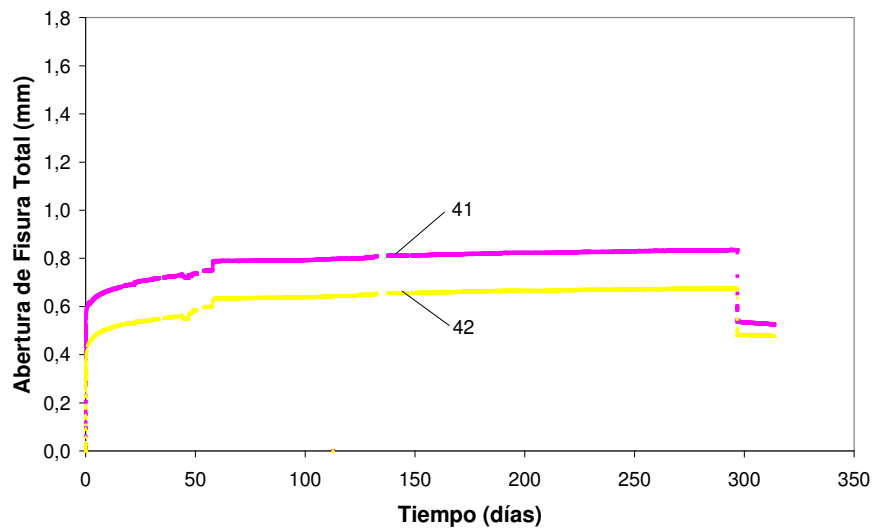


Figura A4.2c. Curvas de fluencia elementos I-80/35-70-10, Serie 2, Bastidor 4.

Elementos I-80/50-40-10**Tabla A4.3.** Elementos I-80/50-40-10.

Elemento	Serie	Bastidor	IF_a (%)	F_a (kN)
41	3	3	79.6	28.5
42			78.8	29.1

**Figura A4.3a.** Curvas de fluencia elementos I-80/50-40-10, Serie 3, Bastidor 3.

Elementos I-2φ8-10

Tabla A4.4. Elementos I-2φ8-10.

Elemento	Serie	Bastidor	IF_a (%)	F_a (kN)
46	3	5	87.6	54.3
47			81.6	54.9
48			75.3	55.5

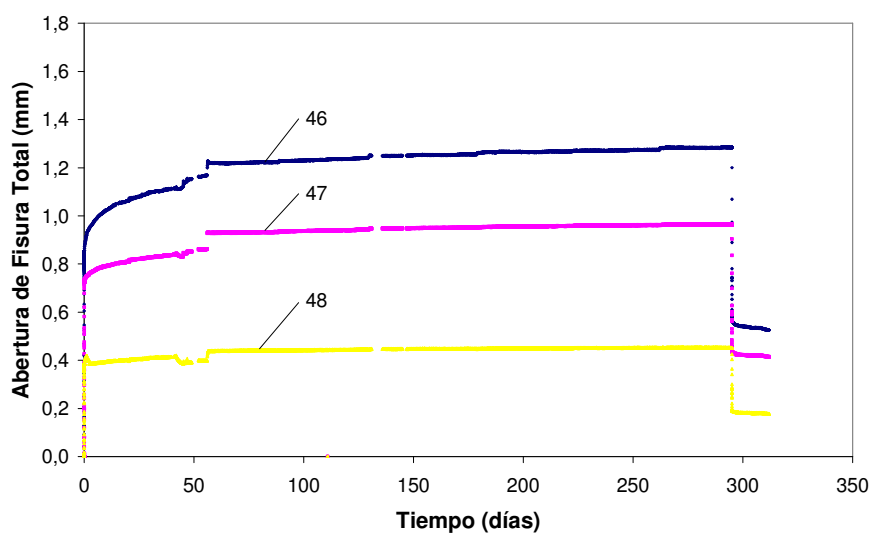


Figura A4.4a. Curvas de fluencia elementos I-2φ8-10, Serie 3, Bastidor 5.

Elementos II-80/50-40-20

Tabla A4.5. Elementos II-80/50-40-20.

Elemento	Serie	Bastidor	IF_a (%)	F_a (kN)
38	3	2	88.1	20.5
39			82.5	21.1
40			82.2	21.7

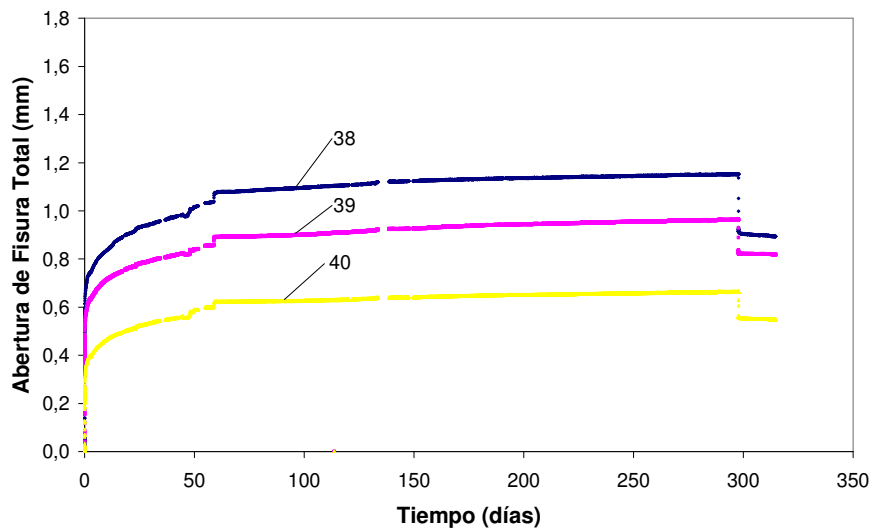


Figura A4.5a. Curvas de fluencia elementos II-80/50-40-20, Serie 3, Bastidor 2.

Elementos II-65/40-40-20

Tabla A4.6. Elementos II-65/40-40-20.

Elemento	Serie	Bastidor	IF_a (%)	F_a (kN)
10	1	4	56.2	9.0
11			60.4	9.5
12			70.8	10.1

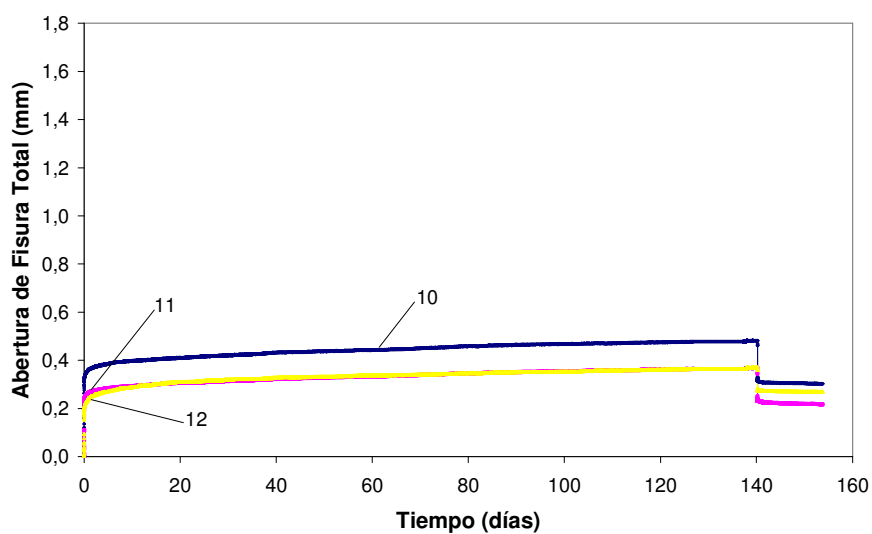


Figura A4.6a. Curvas de fluencia elementos II-65/40-40-20, Serie 1, Bastidor 4.

Elementos II-45/50-40-20

Tabla A4.7. Elementos II-45/50-40-20.

Elemento	Serie	Bastidor	IF_a (%)	F_a (kN)
32	2	5	97.2	16.5
33			80.2	17.1
34			78.3	17.7
35	3	1	90.9	18.7
36			84.4	19.2
37			75.1	19.8

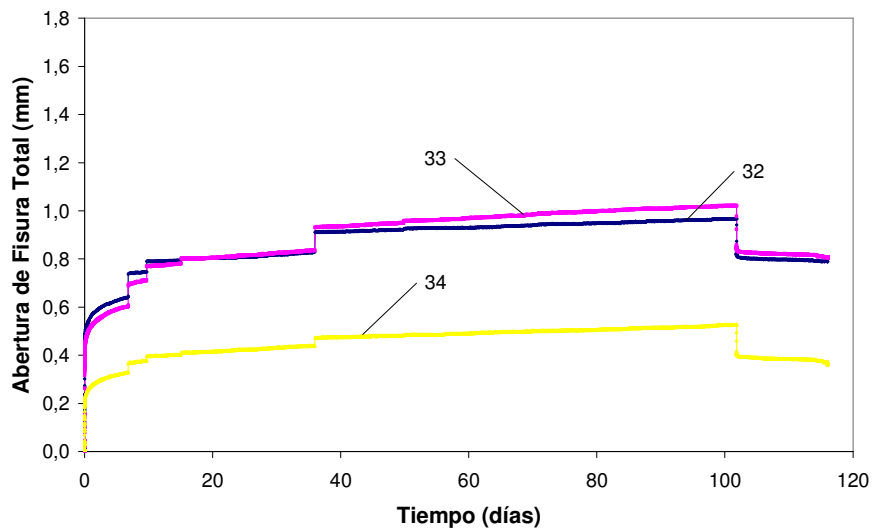


Figura A4.7a. Curvas de fluencia elementos II-45/50-40-20, Serie 2, Bastidor 5.

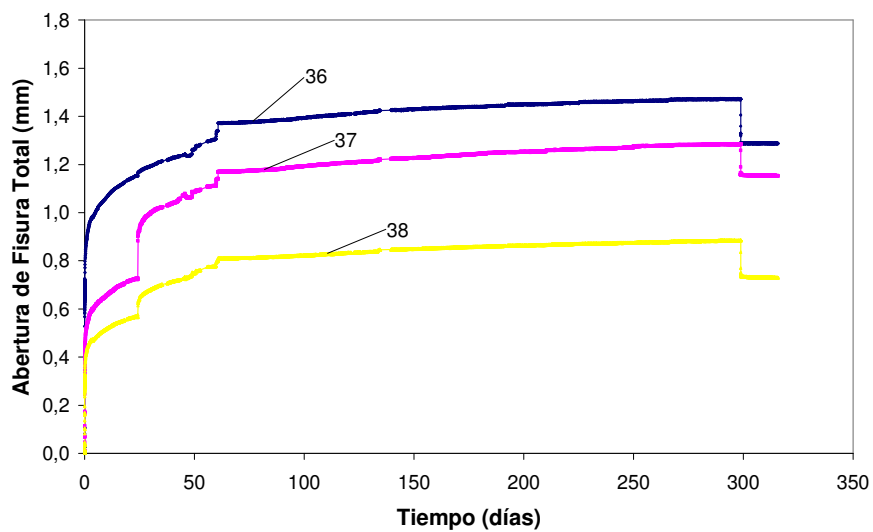


Figura A4.7b. Curvas de fluencia elementos II-45/50-40-20, Serie 3, Bastidor 1.

Elementos II-50/30-40-10

Tabla A4.8. Elementos II-50/30-40-10.

Elemento	Serie	Bastidor	IF_a (%)	F_a (kN)
13	1	5	76.3	9.8
14			57.7	10.4
15			54.4	11.0
20	2	1	72.9	14.9
18			72.4	15.4

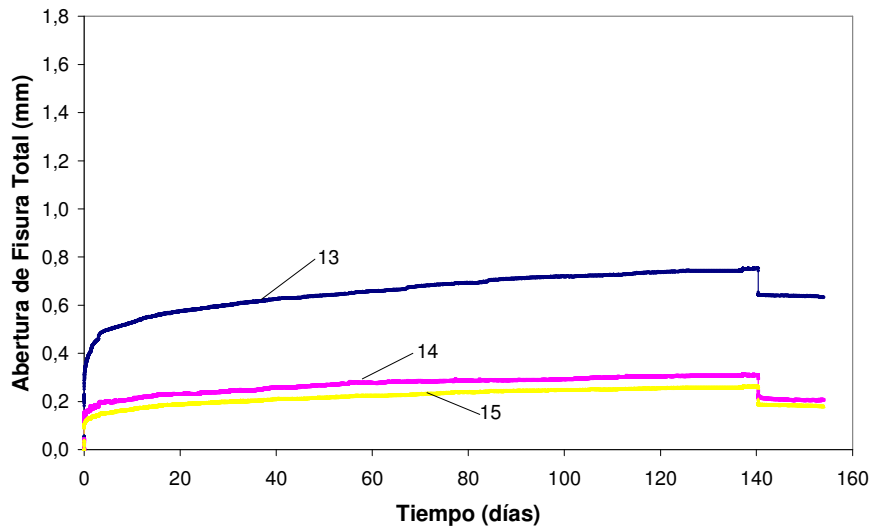


Figura A4.8a. Curvas de fluencia elementos II-50/30-40-10, Serie 1, Bastidor 5.

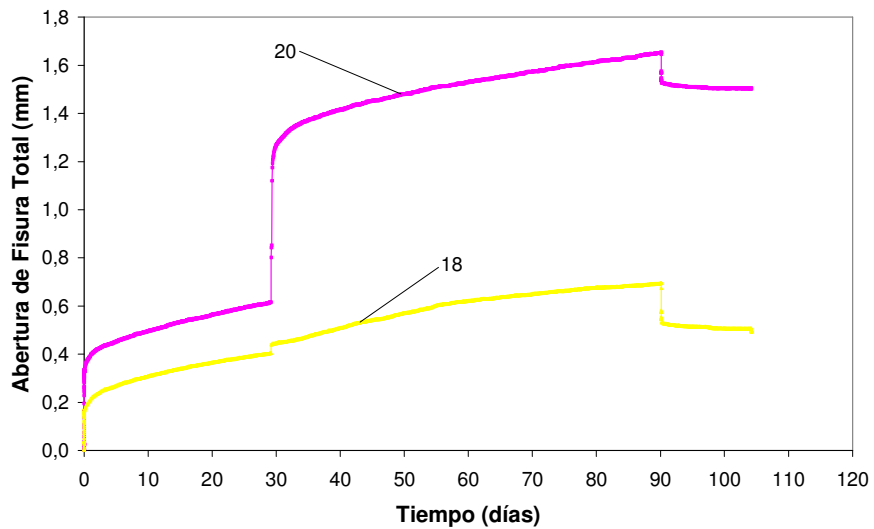


Figura A4.8b. Curvas de fluencia elementos II-50/30-40-10, Serie 2, Bastidor 1.

Elementos I-2φ6-20

Tabla A4.9. Elementos I-2φ6-20.

Elemento	Serie	Bastidor	IF_a (%)	F_a (kN)
43	3	5	79.8	33.1
44			80.0	33.7
45			82.2	34.3

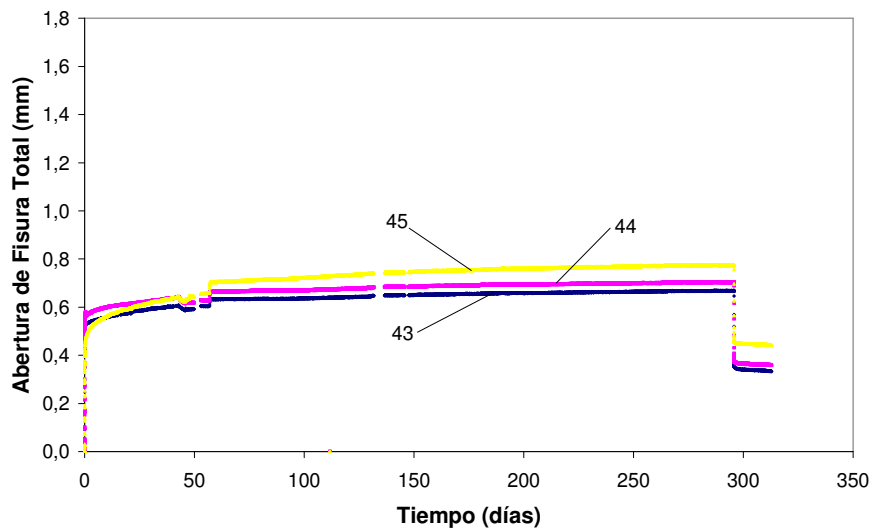


Figura A4.9a. Curvas de fluencia elementos I-2φ6-20, Serie 3, Bastidor 5.

ANEJO 5

GRÁFICOS COMPLETOS Y FICHAS DE ENSAYO

En las Figuras 3.42 y 3.43 se presentaron los modelos de representación gráfica de resultados del ensayo completo y de ficha de ensayo, respectivamente. En este Anejo se incluye, para cada uno de los elementos ensayados a fluencia, el gráfico carga-abertura de fisura completo (ensamblado), la curva abertura de fisura-tiempo, y su respectiva ficha de ensayo.

Para facilitar la ordenación de la información, se presentan en primer lugar sendas tablas (una para cada tipo de hormigón), con la relación de elementos ensayados a fluencia; se indican los datos más relevantes del proceso de carga, los datos identificativos de los elementos y un número de orden para su localización en el presente Anejo.

Tabla A5.0a. Elementos ensayados a fluencia hormigón Tipo I.

Serie	Hormigón	Bastidor	IF_n (%)	IF_a (%)	F_a (kN)	Posición	Id elem	Nº orden
1	I-80/35-40-10	1	60	60.9	17.0	1	1	1
				54.9	17.6	2	2	2
				54.2	18.2	3	3	3
2	I-80/35-40-10	2	80	97.0	30.6	1	21	4
				81.9	31.2	2	22	5
				70.5	31.8	3	23	6
2	I-80/35-40-10 (1.5mm)	3	80	82.9	34.1	1	24	7
				81.0	34.6	2	25	8
				77.4	35.2	3	26	9
1	I-80/35-70-10	2	60	61.9	35.3	1	4	10
				59.2	35.9	2	5	11
				59.2	36.5	3	6	12
1	I-80/35-70-10	3	80	81.0	40.1	1	7	13
				82.2	40.7	2	8	14
				81.3	41.3	3	9	15
2	I-80/35-70-10	4	95	93.7	47.4	1	30	16
				92.1	48.0	2	31	17
				80.9	48.6	3	29	18
3	I-80/50-40-10	3	80	79.6	28.5	2	41	19
				78.8	29.1	3	42	20
3	I-2 ϕ 8-10	5	80	87.6	54.3	1	46	21
				-	54.9	2	47	22
				75.3	55.5	3	48	23

Tabla A5.0b. Elementos ensayados a fluencia hormigón Tipo II.

Serie	Hormigón	Bastidor	IF_n (%)	IF_a (%)	F_a (kN)	Posición	Id elem	Nº orden
3	II-80/50-40-20	2	80	88.1	20.5	1	38	24
				82.5	21.1	2	39	25
				82.2	21.7	3	40	26
1	II-65/40-40-20	4	60	56.2	9,0	1	10	27
				60.4	9,5	2	11	28
				70.8	10,1	3	12	29
2	II-45/50-40-20	5	80	97.2	16.5	1	32	30
				80.2	17.1	2	33	31
				78.3	17.7	3	34	32
3		1	80	90.9	18.7	1	35	33
				84.4	19.2	2	36	34
				75.1	19.8	3	37	35
1	II-50/30-40-10	5	60	76.3	9.8	1	13	36
				57.7	10.4	2	14	37
				54.4	11.0	3	15	38
2		1	80	72.9	14.9	2	20	39
				72.4	15.4	3	18	40
3		II-2 ϕ 6-20	4	80	79.8	33.1	1	43
	80.0				33.7	2	44	42
	82.2				34.3	3	45	43

**GRÁFICOS COMPLETOS Y FICHAS DE ENSAYO
PARA CADA ELEMENTO**

ELEMENTOS I-80/35-40-10

1. Elemento 1, Serie 1, Bastidor 1, Posición 1

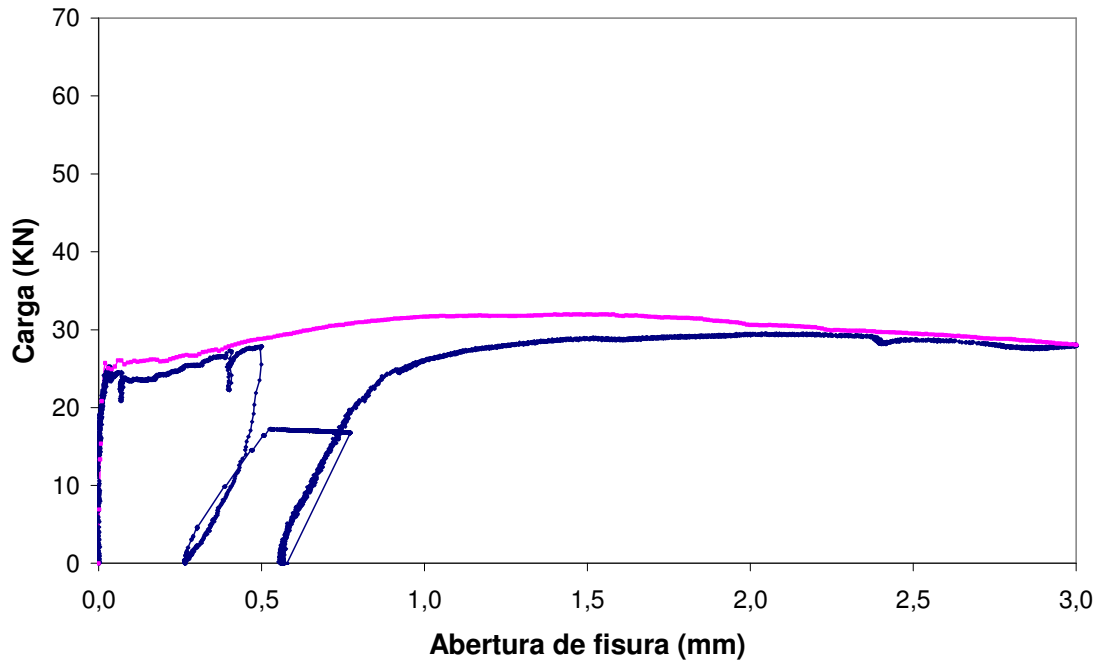


Figura A5.1a. Gráfico de ensayo para elemento 1, I-80/35-40-10.

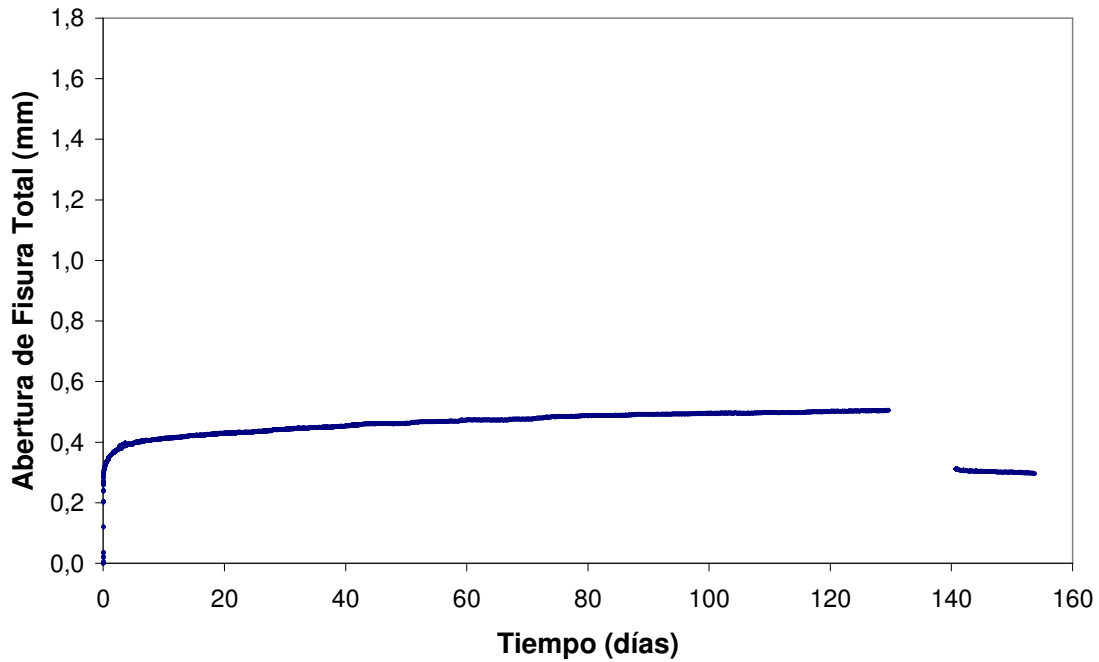


Figura A5.1b. Curva de fluencia para elemento 1, I-80/35-40-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	1
1	BASTIDOR	1

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-40-10
Abertura fisura nominal (w_p)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_w)(% F_w)	60
Posición en bastidor	1

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	15/09/2008
Carga aplicada (F_a)(kN)	17,0
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	60,9
Fecha descarga	02/02/2009
Duración en carga (t_f)(días)	140
Fecha retiro bastidor	16/02/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	154
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	16/02/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	08/09/2008
Fecha de prefisuración	15/09/2008
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	25,3
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,85
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,501
Carga de prefisura (F_w)(kN)	27,9
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,266
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,529
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,777
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,563
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	29,5
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	2,050
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	5,54
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	5,51
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,34

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,263
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,229
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,248
Abertura total final (w_{cd}^{df})(mm)	0,511
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	-
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,297
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	-
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	-
Recuperación total (w_{cui})(mm)	0,214

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 1 - A 3
Fecha de fabricación	18/08/2008
Fecha de desmoldeo	19/08/2008

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	52,4
Módulo deformación (E_{cs})(Mpa)	29750
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	25,7
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,94
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	5,53
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	6,13
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	5,66
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,03
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,460
Carga máxima (F_{max})(kN)	32,0
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	28,8
F_{max} / F_f	1,24
F_w / F_f	1,12
F_{max} / F_w	1,11

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_i)	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cui})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

ANOTACIONES: al inicio del proceso de descarga no se registraron datos, por lo que algunos datos han tenido que ser obtenidos mediante regresiones. Los valores subrayados han sido obtenidos mediante regresiones.

Figura A5.1c. Ficha de ensayo para elemento 1, I-80/35-40-10.

ELEMENTOS I-80/35-40-10

2. Elemento 2, Serie 1, Bastidor 1, Posición 2

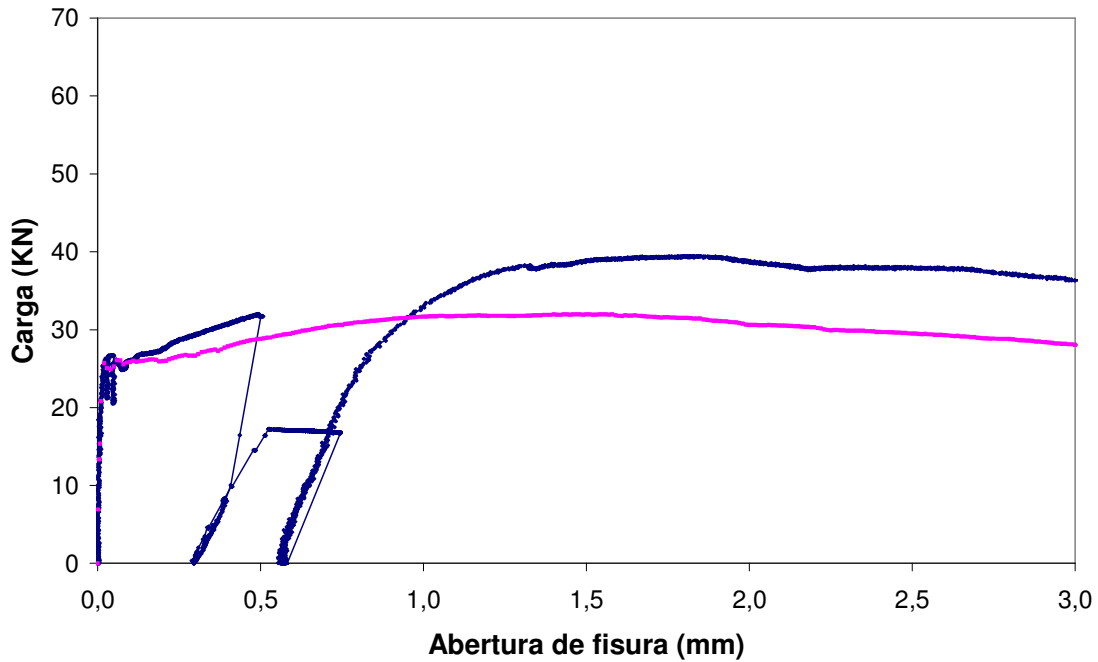


Figura A5.2a. Gráfico de ensayo para elemento 2, I-80/35-40-10.

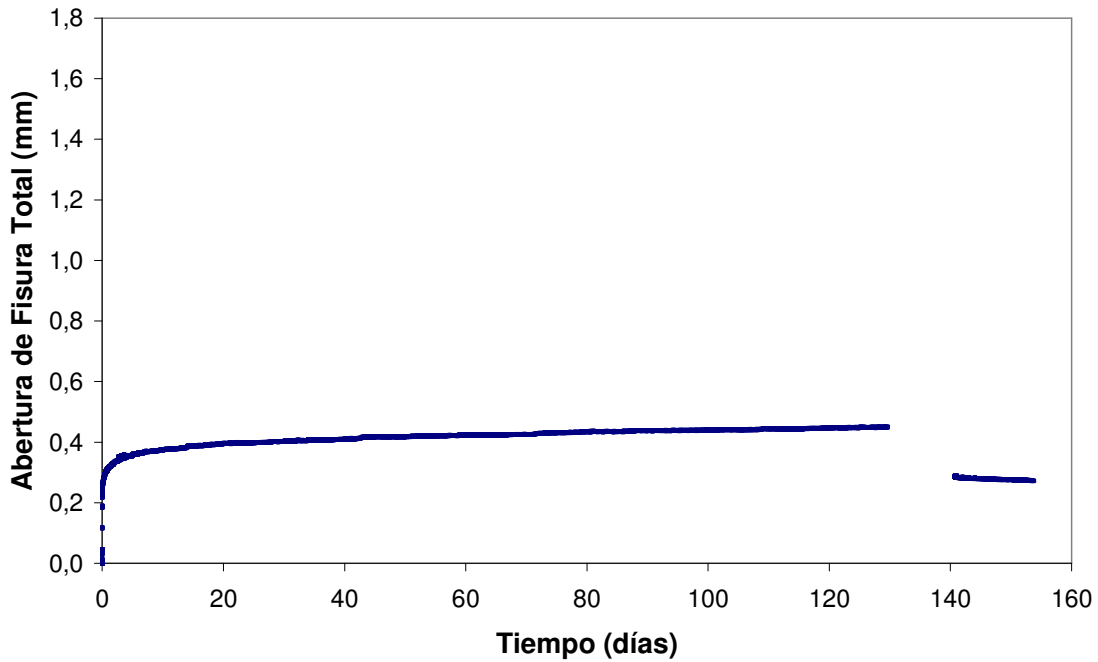


Figura A5.2b. Curva de fluencia para elemento 2, I-80/35-40-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	1
2	BASTIDOR	1

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-40-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	60
Posición en bastidor	2

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	15/09/2008
Carga aplicada (F_a)(kN)	17,6
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	54,9
Fecha descarga	02/02/2009
Duración en carga (t_r)(días)	140
Fecha retiro bastidor	16/02/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	154
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	16/02/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	08/09/2008
Fecha de prefisuración	15/09/2008
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	26,7
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	5,13
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,508
Carga de prefisura (F_w)(kN)	32,0
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,298
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,528
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,750
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,570
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	39,5
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	1,828
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	7,45
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	7,28
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	6,60

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,231
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,208
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,221
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,452
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	-
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,272
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	-
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	-
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,180

ANOTACIONES: al inicio del proceso de descarga no se registraron datos, por lo que algunos datos han tenido que ser obtenidos mediante regresiones. Los valores subrayados han sido obtenidos mediante regresiones.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 1 - A 3
Fecha de fabricación	18/08/2008
Fecha de desmoldeo	19/08/2008

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	52,4
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29750
Carga a primera fisura (F_{f1})(kN)	25,7
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,94
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	5,53
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	6,13
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	5,66
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,03
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,460
Carga máxima (F_{max})(kN)	32,0
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	28,8
F_{max} / F_f	1,24
F_w / F_f	1,12
F_{max} / F_w	1,11

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.2c. Ficha de ensayo para elemento 2, I-80/35-40-10.

ELEMENTOS I-80/35-40-10

3. Elemento 3, Serie 1, Bastidor 1, Posición 3

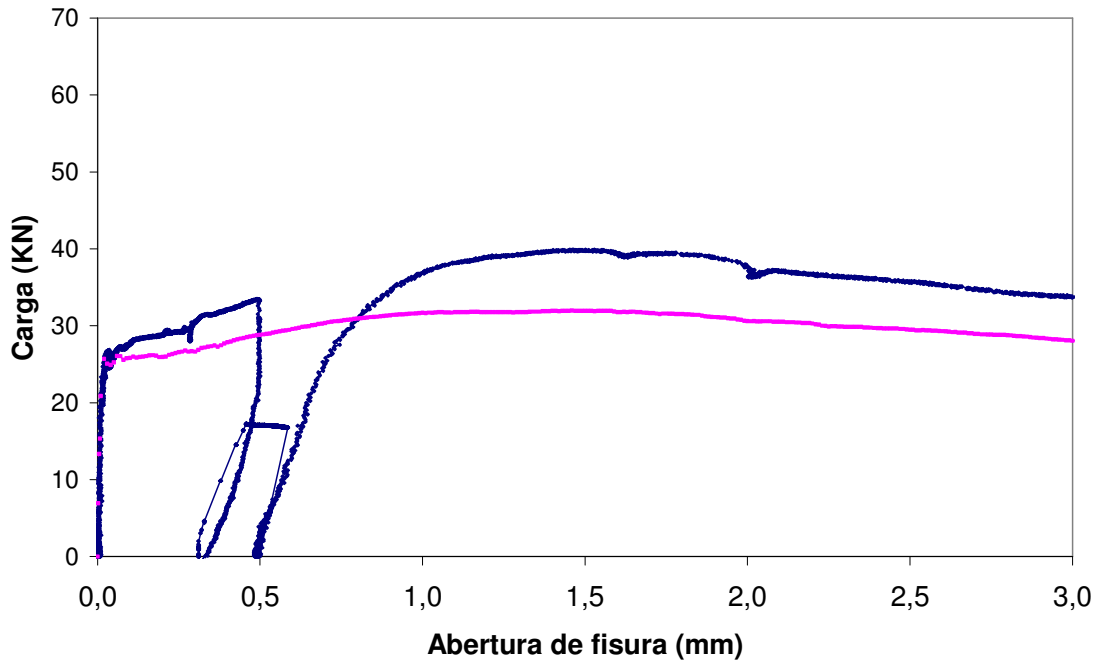


Figura A5.3a. Gráfico de ensayo para elemento 3, I-80/35-40-10.

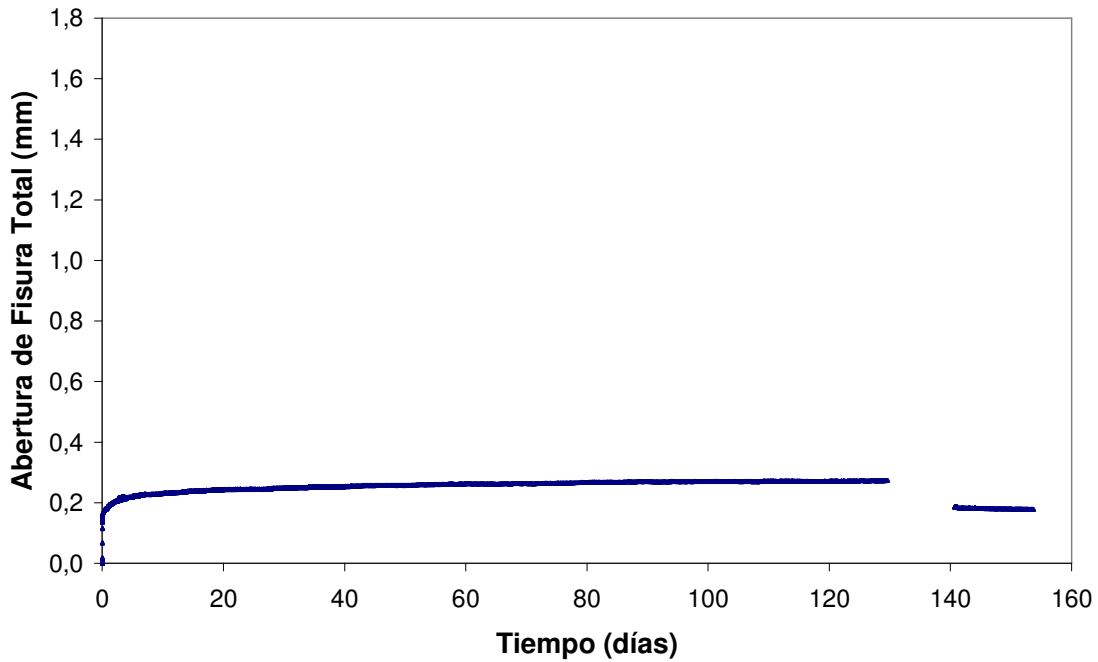


Figura A5.3b. Curva de fluencia para elemento 3, I-80/35-40-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	1
3	BASTIDOR	1

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-40-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	60
Posición en bastidor	3

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	15/09/2008
Carga aplicada (F_a)(kN)	18,2
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	54,2
Fecha descarga	02/02/2009
Duración en carga (t_r)(días)	140
Fecha retiro bastidor	16/02/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	154
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	16/02/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	08/09/2008
Fecha de prefisuración	15/09/2008
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	26,8
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	5,15
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,501
Carga de prefisura (F_w)(kN)	33,5
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,312
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,459
Abertura final (w_{pc})(mm)	<u>0,594</u>
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,491
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	39,9
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	1,529
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	7,64
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	6,85
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,97

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,147
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,123
Abertura dif. final (w_{cd}^{ff})(mm)	<u>0,135</u>
Abertura total final (w_{ct}^{ff})(mm)	<u>0,282</u>
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	-
Abertura res. final (w_{cr}^{ff})(mm)	0,179
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	-
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	-
Recuperación total (w_{cut})(mm)	<u>0,103</u>

ANOTACIONES: al inicio del proceso de descarga no se registraron datos, por lo que algunos datos han tenido que ser obtenidos mediante regresiones. Los valores subrayados han sido obtenidos mediante regresiones.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 1 - A 3
Fecha de fabricación	18/08/2008
Fecha de desmoldeo	19/08/2008

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	52,4
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29750
Carga a primera fisura (F_{f1})(kN)	25,7
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,94
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	5,53
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	6,13
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	5,66
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,03
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,460
Carga máxima (F_{max})(kN)	32,0
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	28,8
F_{max} / F_f	1,24
F_w / F_f	1,12
F_{max} / F_w	1,11

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{ff})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{ff})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{ff})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.3c. Ficha de ensayo para elemento 3, I-80/35-40-10.

ELEMENTOS I-80/35-40-10

4. Elemento 21, Serie 2, Bastidor 2, Posición 1

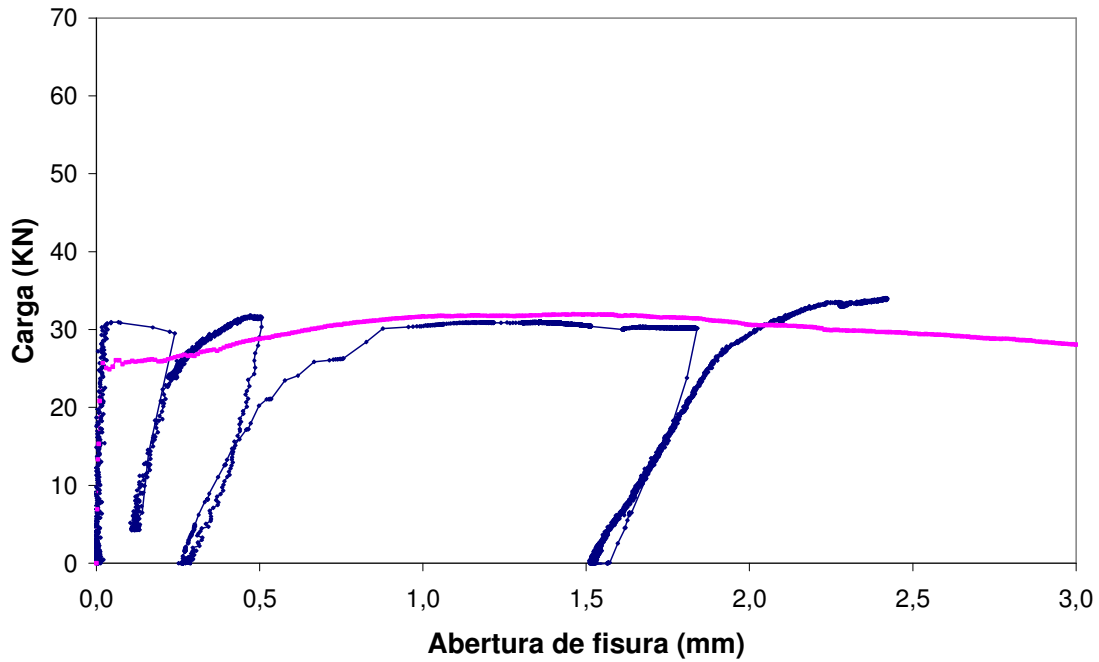


Figura A5.4a. Gráfico de ensayo para elemento 21, I-80/35-40-10.

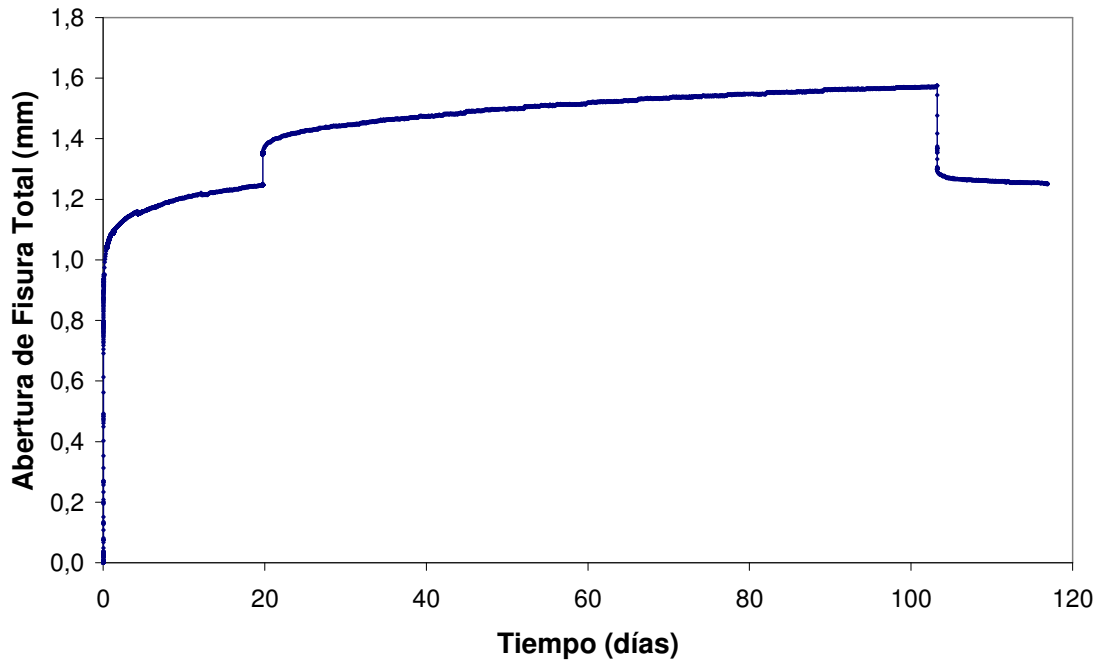


Figura A5.4b. Curva de fluencia para elemento 21, I-80/35-40-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	2
21	BASTIDOR	2

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-40-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	1

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	26/02/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	30,6
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	97,0
Fecha descarga	09/06/2009
Duración en carga (t_r)(días)	103
Fecha retiro bastidor	23/06/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	117
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	23/06/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	17/02/2009
Fecha de prefisuración	25/02/2009
Edad de prefisuración (días)	29
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	30,9
Resist. primera fisura (f_{cf1})(MPa)	5,81
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,507
Carga de prefisura (F_w)(kN)	31,6
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,270
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	1,034
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,843
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,521
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	34,0
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	2,418
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	-
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	-
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	-

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,764
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,798
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,808
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	1,573
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	1,301
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	1,251
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,272
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,049
Recuperación total (w_{cu})(mm)	0,321

ANOTACIONES: se aprecia un salto en la curva de fluencia en el día 19. La probeta en la posición 3 es la que tiene la galga en este bastidor.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 2 - A 1
Fecha de fabricación	27/01/2009
Fecha de desmoldeo	28/01/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	52,4
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29750
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	25,7
Resist. primera fisura (f_{cf})(MPa)	4,94
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	5,53
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	6,13
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	5,66
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,03
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,460
Carga máxima (F_{max})(kN)	32,0
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	28,8
F_{max} / F_f	1,24
F_w / F_f	1,12
F_{max} / F_w	1,11

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cu})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.4c. Ficha de ensayo para elemento 21, I-80/35-40-10.

ELEMENTOS I-80/35-40-10

5. Elemento 22, Serie 2, Bastidor 2, Posición 2

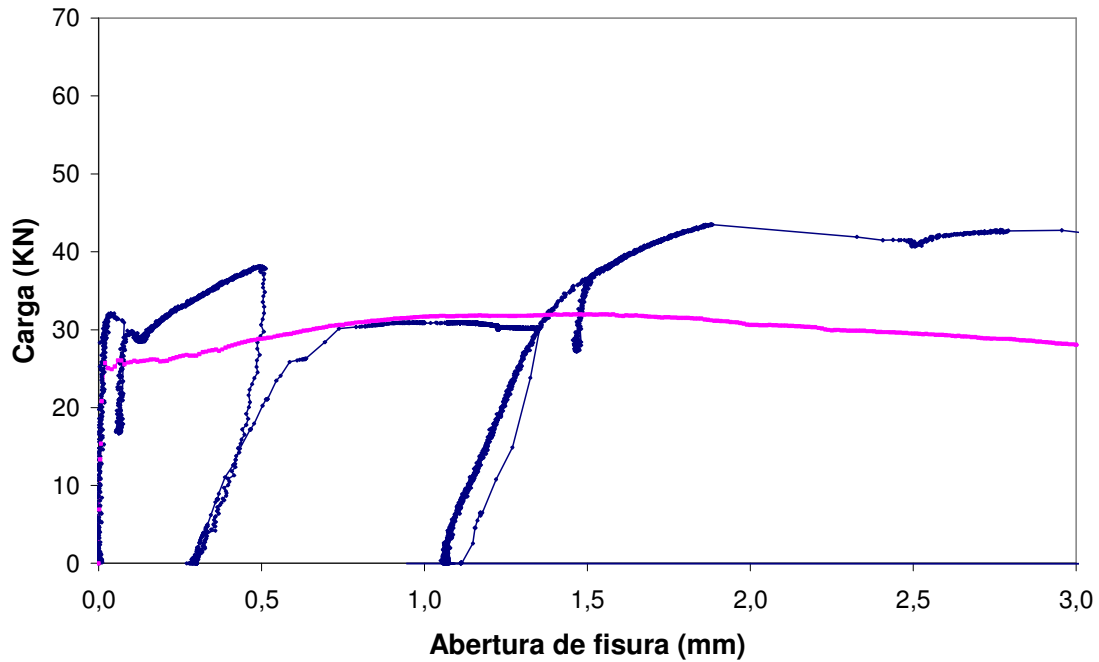


Figura A5.5a. Gráfico de ensayo para elemento 22, I-80/35-40-10.

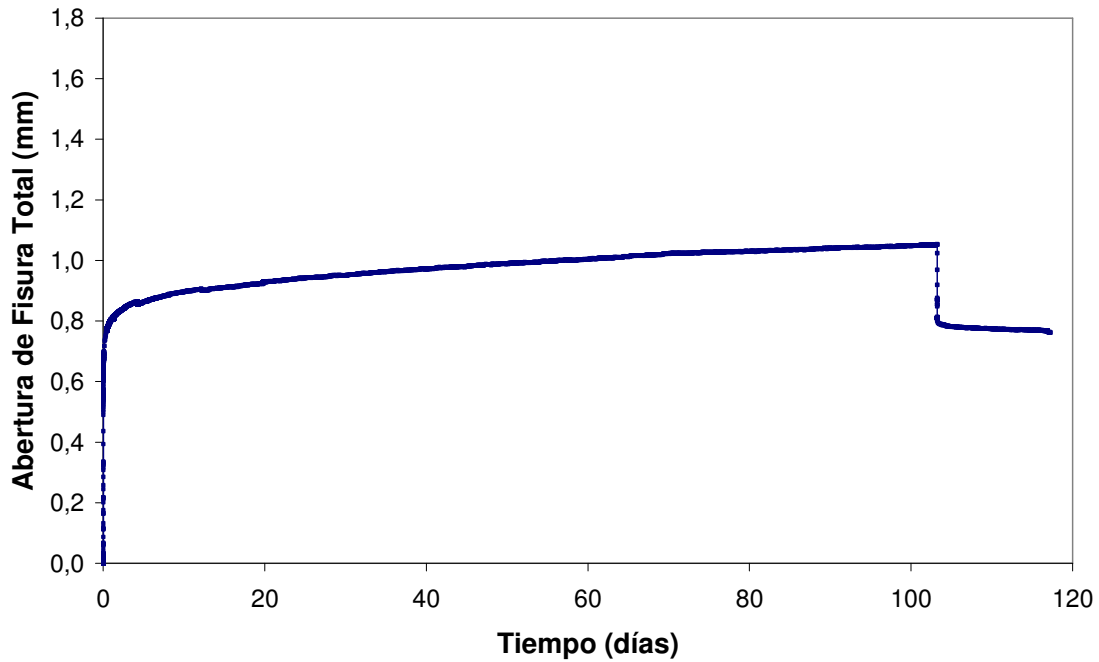


Figura A5.5b. Curva de fluencia para elemento 22, I-80/35-40-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	2
22	BASTIDOR	2

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-40-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	2

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	26/02/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	31,2
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	81,9
Fecha descarga	09/06/2009
Duración en carga (t_f)(días)	103
Fecha retiro bastidor	23/06/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	117
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	23/06/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	17/02/2009
Fecha de prefisuración	25/02/2009
Edad de prefisuración (días)	29
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	32,1
Resist. primera fisura (f_{cf1})(MPa)	6,06
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,514
Carga de prefisura (F_w)(kN)	38,1
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,291
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,835
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,343
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,053
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	43,5
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	1,880
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	6,87
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	7,74
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	-

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva general (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,544
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,496
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,507
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	1,052
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,811
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,762
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,240
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,049
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,289

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 2 - A 1
Fecha de fabricación	27/01/2009
Fecha de desmoldeo	28/01/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	52,4
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29750
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	25,7
Resist. primera fisura (f_{cf})(MPa)	4,94
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	5,53
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	6,13
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	5,66
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,03
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,460
Carga máxima (F_{max})(kN)	32,0
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	28,8
F_{max} / F_f	1,24
F_w / F_f	1,12
F_{max} / F_w	1,11

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

ANOTACIONES: la probeta en la posición 3 es la que tiene la galga en este bastidor.

Figura A5.5c. Ficha de ensayo para elemento 22, I-80/35-40-10.

ELEMENTOS I-80/35-40-10

6. Elemento 23, Serie 2, Bastidor 2, Posición 3

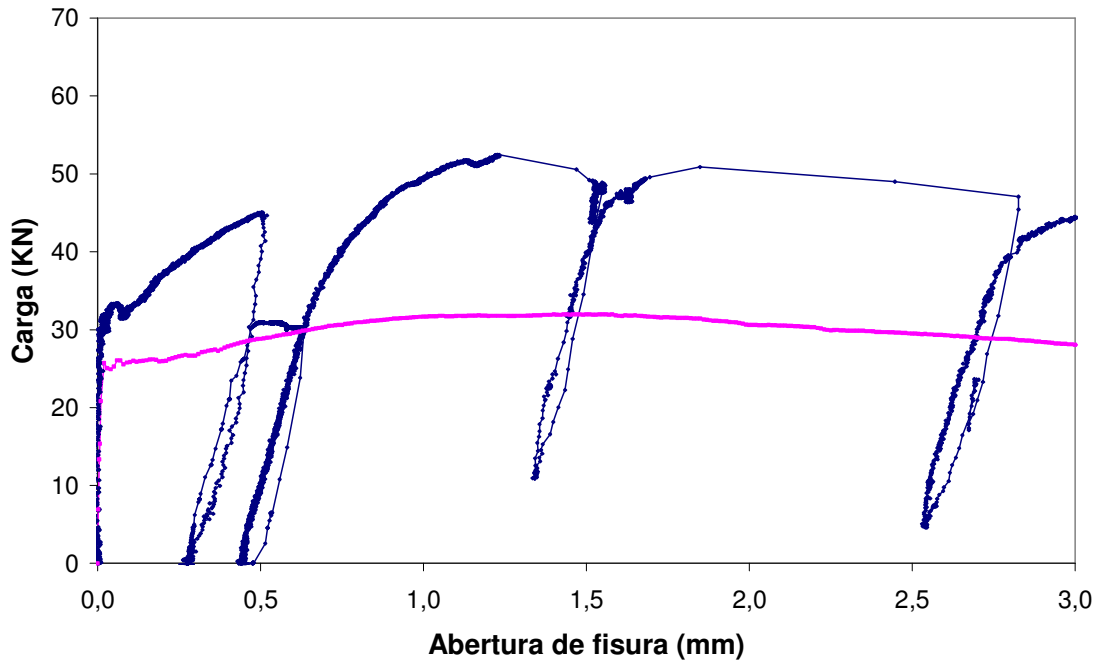


Figura A5.6a. Gráfica de ensayo para elemento 23, I-80/35-40-10.

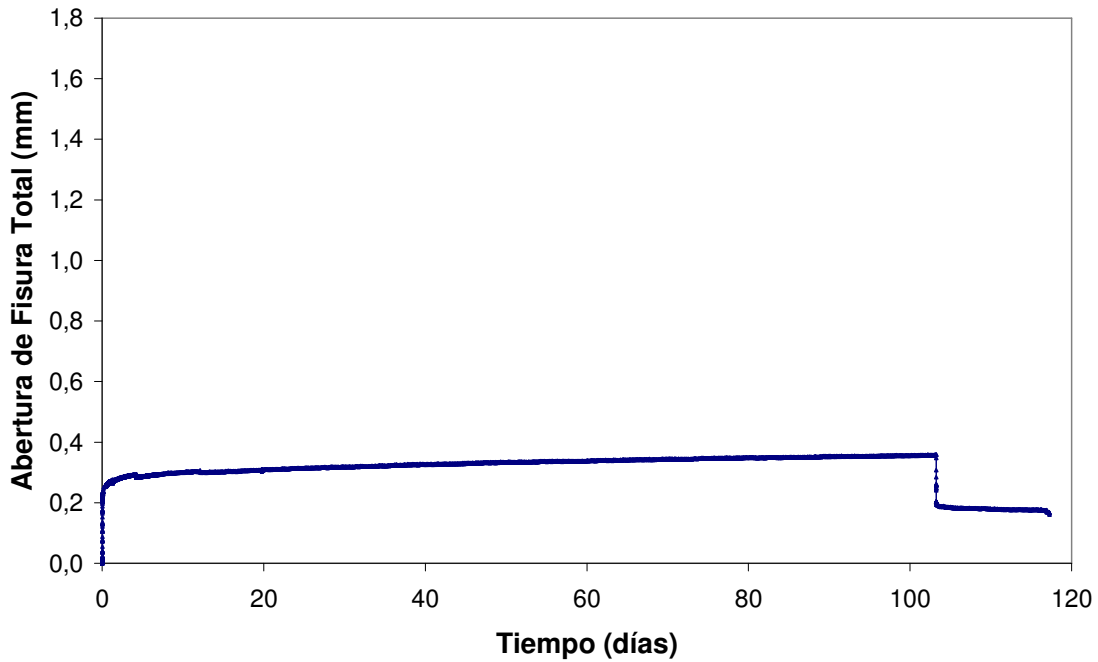


Figura A5.6b. Curva de fluencia para elemento 23, I-80/35-40-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	2
23	BASTIDOR	2

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-40-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	3

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	26/02/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	31,8
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	70,5
Fecha descarga	09/06/2009
Duración en carga (t_r)(días)	103
Fecha retiro bastidor	23/06/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	117
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	23/06/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	17/02/2009
Fecha de prefisuración	25/02/2009
Edad de prefisuración (días)	29
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	33,4
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	6,27
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,520
Carga de prefisura (F_w)(kN)	45,1
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,285
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,492
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,643
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,444
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	52,4
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	1,233
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	9,23
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	8,28
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	7,79

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,207
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,146
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,151
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,358
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,203
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,159
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,155
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,044
Recuperación total (w_{cu})(mm)	0,199

ANOTACIONES: la galga se empleó únicamente para evaluar las deformaciones en la etapa de fluencia, no en prefisuración ni rotura.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 2 - A 1
Fecha de fabricación	27/01/2009
Fecha de desmoldeo	28/01/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	52,4
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29750
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	25,7
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,94
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	5,53
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	6,13
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	5,66
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,03
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,460
Carga máxima (F_{max})(kN)	32,0
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	28,8
F_{max} / F_f	1,24
F_w / F_f	1,12
F_{max} / F_w	1,11

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	0,447
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	0,926
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	0,955
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	1,402
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	1,077
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	1,004
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	0,325
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	0,073
Recuperación total (ϵ_{cu})	0,398

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.6c. Ficha de ensayo para elemento 23, I-80/35-40-10.

ELEMENTOS I-80/35-40-10

7. Elemento 24, Serie 2, Bastidor 3, Posición 1

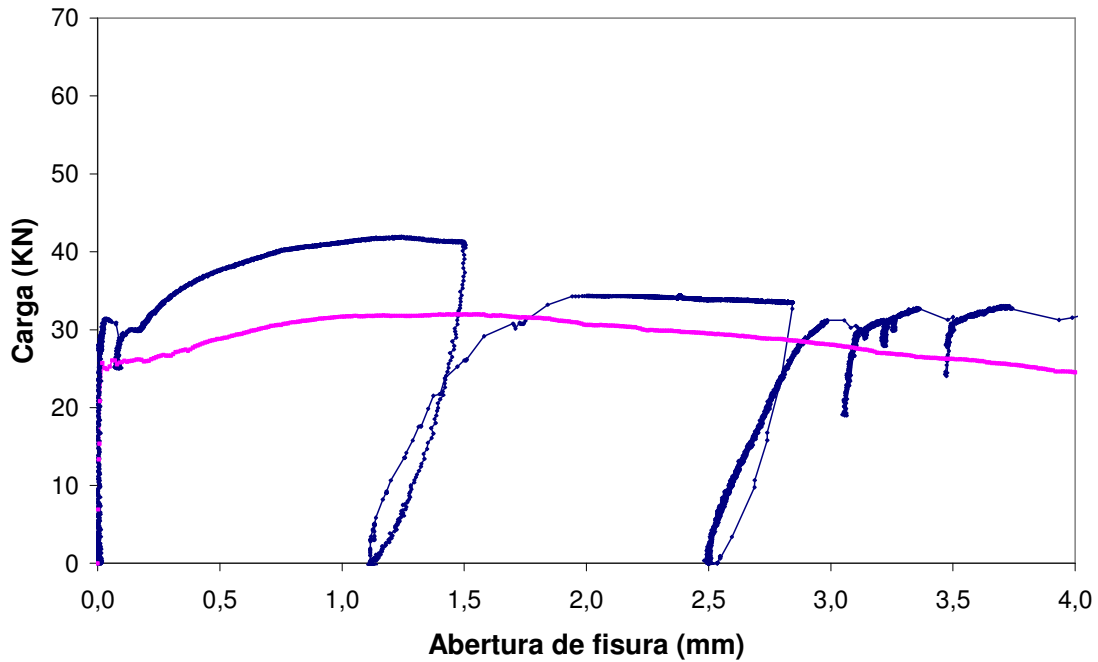


Figura A5.7a. Gráfico de ensayo para elemento 24, I-80/35-40-10.

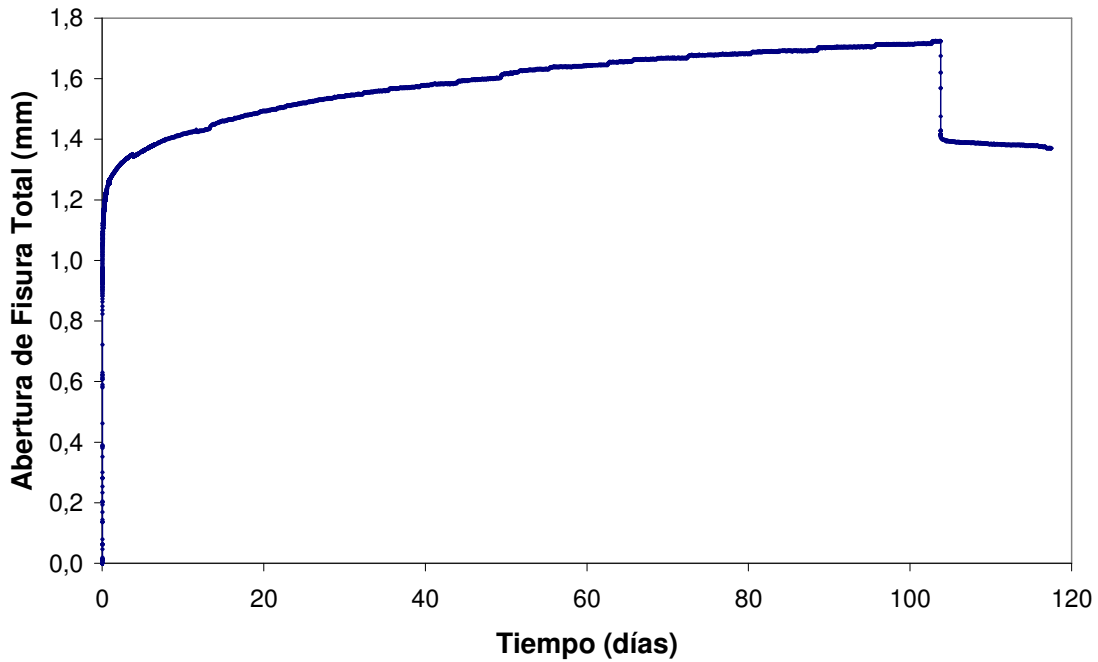


Figura A5.7b. Curva de fluencia para elemento 24, I-80/35-40-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	2
24	BASTIDOR	3

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-40-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	1,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	1

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	26/02/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	34,1
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	82,9
Fecha descarga	10/06/2009
Duración en carga (t_r)(días)	104
Fecha retiro bastidor	24/06/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	118
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	24/06/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	18/02/2009
Fecha de prefisuración	26/02/2009
Edad de prefisuración (días)	29
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	31,4
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	5,88
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	1,505
Carga de prefisura (F_w)(kN)	41,1
Abertura residual (w_{pr})(mm)	1,115
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	2,019
Abertura final (w_{pc})(mm)	2,838
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	2,485
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	33,0
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	3,714
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	-
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	-
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,81

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,904
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,798
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,819
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	1,723
Abertura res. inicial (w_{cti})(mm)	1,415
Abertura res. final (w_{ct}^{df})(mm)	1,370
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,309
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,045
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,353

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 2 - A 1
Fecha de fabricación	28/01/2009
Fecha de desmoldeo	29/01/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	52,4
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29750
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	25,7
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,94
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	5,53
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	6,13
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	5,66
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,03
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,460
Carga máxima (F_{max})(kN)	32,0
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	31,9
F_{max} / F_f	1,24
F_w / F_f	1,24
F_{max} / F_w	1,00

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cti})	-
Def. residual final (ϵ_{ct}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

ANOTACIONES: la galga se empleó en la probeta en la posición 3 (probeta 26).

Figura A5.7c. Ficha de ensayo para elemento 24, I-80/35-40-10.

ELEMENTOS I-80/35-40-10

8. Elemento 25, Serie 2, Bastidor 3, Posición 2

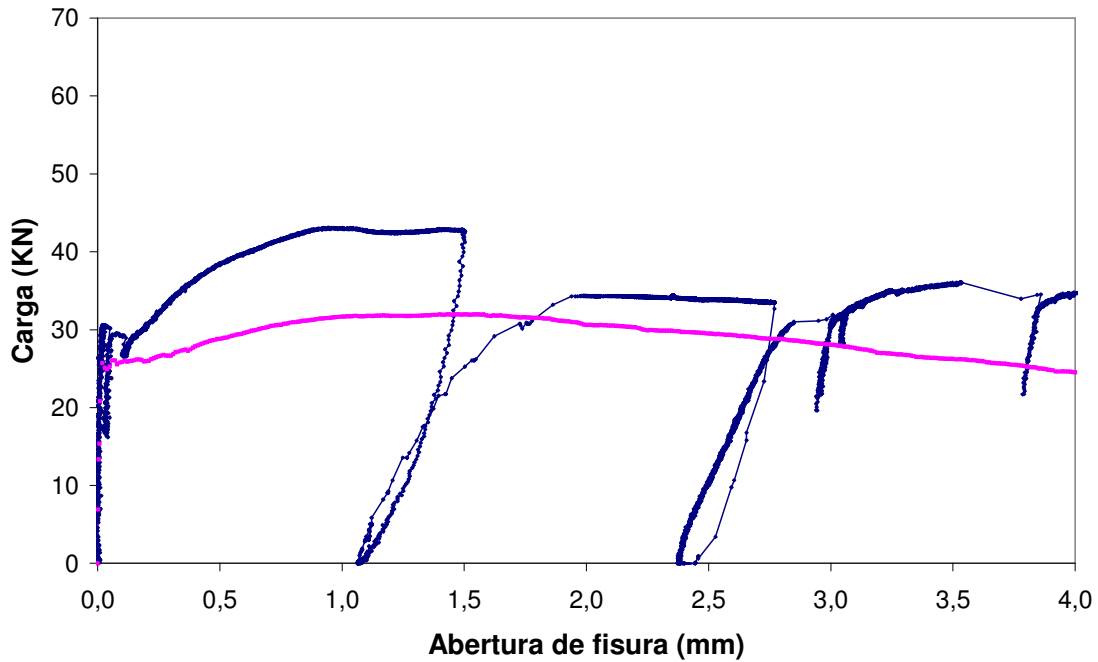


Figura A5.8a. Gráfico de ensayo para elemento 25, I-80/35-40-10.

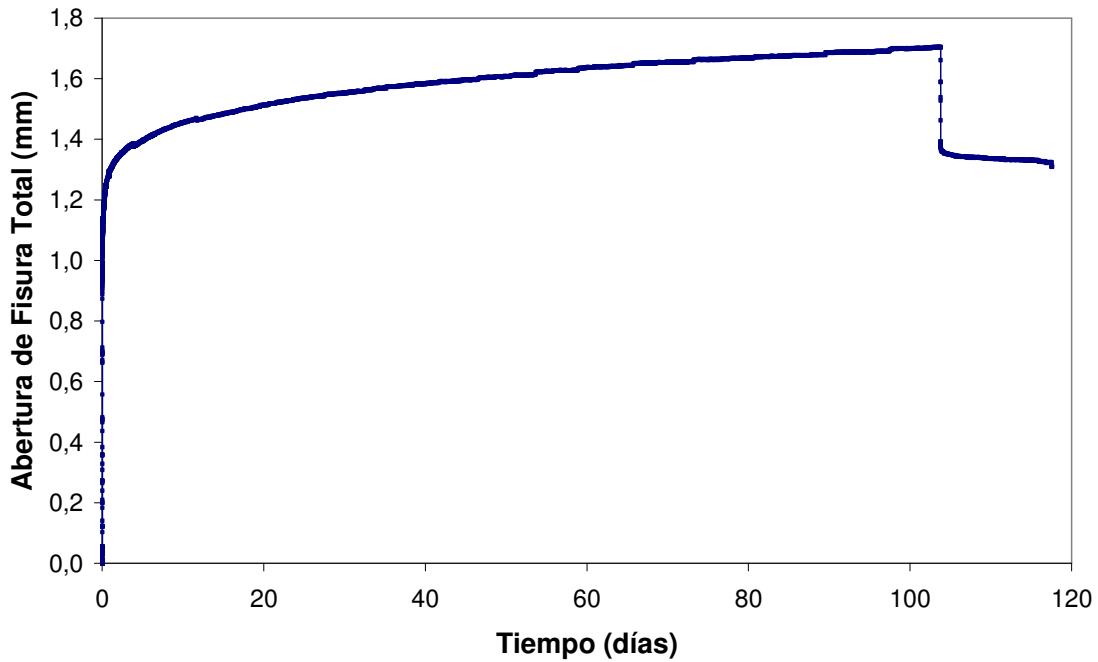


Figura A5.8b. Curva de fluencia para elemento 25, I-80/35-40-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	2
25	BASTIDOR	3

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-40-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	1,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	2

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	26/02/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	34,6
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	81,0
Fecha descarga	10/06/2009
Duración en carga (t_r)(días)	104
Fecha retiro bastidor	24/06/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	118
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	24/06/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	18/02/2009
Fecha de prefisuración	26/02/2009
Edad de prefisuración (días)	29
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	30,6
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	5,70
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	1,505
Carga de prefisura (F_w)(kN)	42,8
Abertura residual (w_{pr})(mm)	1,068
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	2,004
Abertura final (w_{pc})(mm)	2,772
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	2,386
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	36,1
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	3,531
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	-
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	-
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	6,68

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,936
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,750
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,767
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	1,704
Abertura res. inicial (w_{cti})(mm)	1,378
Abertura res. final (w_{ct}^{df})(mm)	1,318
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,326
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,060
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,386

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 2 - A 1
Fecha de fabricación	28/01/2009
Fecha de desmoldeo	29/01/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	52,4
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29750
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	25,7
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,94
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	5,53
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	6,13
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	5,66
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,03
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,460
Carga máxima (F_{max})(kN)	32,0
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	31,9
F_{max} / F_f	1,24
F_w / F_f	1,24
F_{max} / F_w	1,00

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cti})	-
Def. residual final (ϵ_{ct}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

ANOTACIONES: la galga se empleó en la probeta en la posición 3 (probeta 26).

Figura A5.8c. Ficha de ensayo para elemento 25, I-80/35-40-10.

ELEMENTOS I-80/35-40-10

9. Elemento 26, Serie 2, Bastidor 3, Posición 3

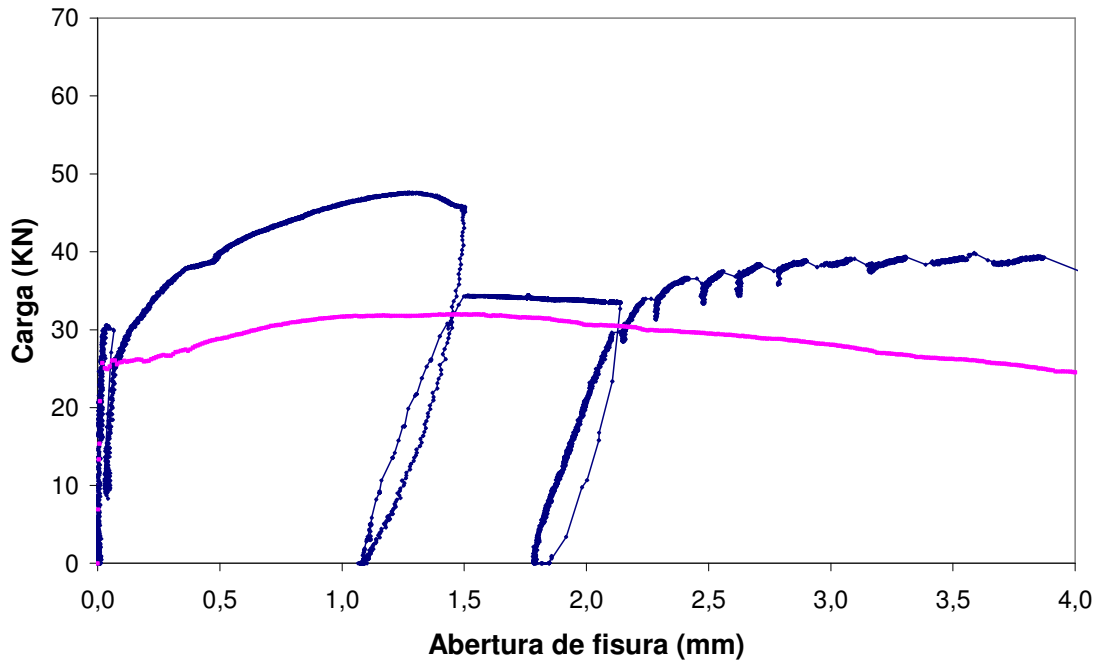


Figura A5.9a. Gráfico de ensayo para elemento 26, I-80/35-40-10.

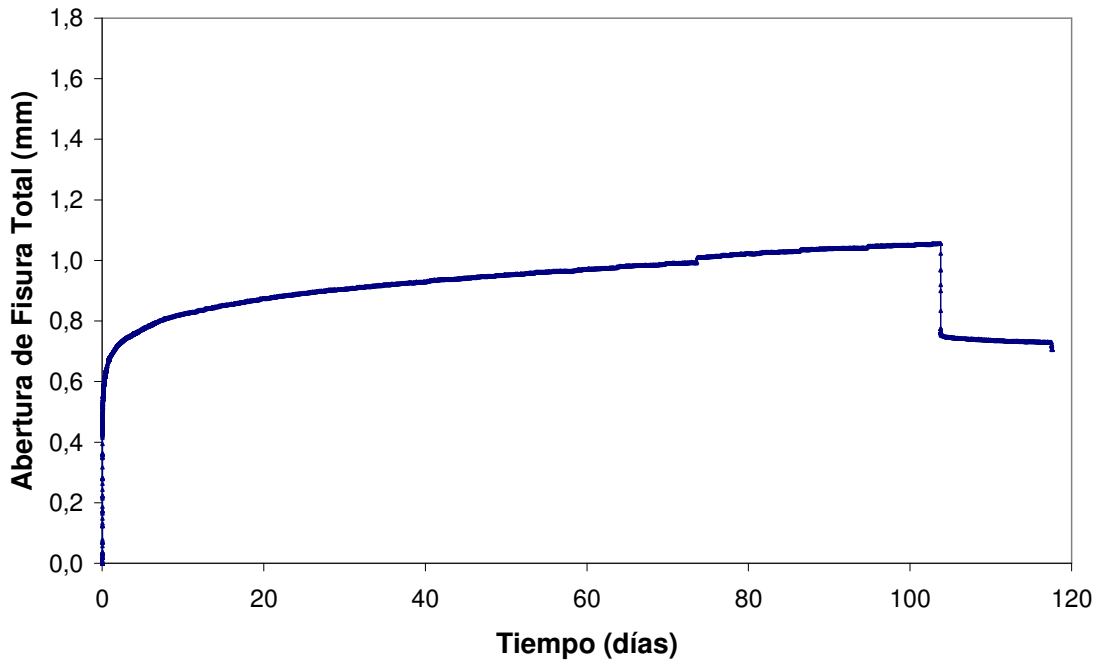


Figura A5.9b. Curva de fluencia para elemento 26, I-80/35-40-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	2
26	BASTIDOR	3

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-40-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	1,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	3

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	26/02/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	35,2
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	77,4
Fecha descarga	10/06/2009
Duración en carga (t_f)(días)	104
Fecha retiro bastidor	24/06/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	118
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	24/06/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	18/02/2009
Fecha de prefisuración	26/02/2009
Edad de prefisuración (días)	29
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	30,6
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	5,71
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	1,504
Carga de prefisura (F_w)(kN)	45,5
Abertura residual (w_{pr})(mm)	1,092
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	1,529
Abertura final (w_{pc})(mm)	2,147
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,798
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	39,8
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	3,587
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	-
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	6,81
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	7,31

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,437
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,603
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,619
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	1,055
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,762
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,706
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,293
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,056
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,349

ANOTACIONES: la galga se empleó únicamente para evaluar las deformaciones en la etapa de fluencia, no en prefisuración ni rotura.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 2 - A 1
Fecha de fabricación	28/01/2009
Fecha de desmoldeo	29/01/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	52,4
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29750
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	25,7
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,94
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	5,53
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	6,13
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	5,66
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,03
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,460
Carga máxima (F_{max})(kN)	32,0
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	31,9
F_{max} / F_f	1,24
F_w / F_f	1,24
F_{max} / F_w	1,00

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	0,753
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	1,410
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	1,446
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	2,199
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	1,740
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	1,638
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	0,458
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	0,102
Recuperación total (ϵ_{cut})	0,561

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.9c. Ficha de ensayo para elemento 26, I-80/35-40-10.

ELEMENTOS I-80/35-70-10

10. Elemento 4, Serie 1, Bastidor 2, Posición 1

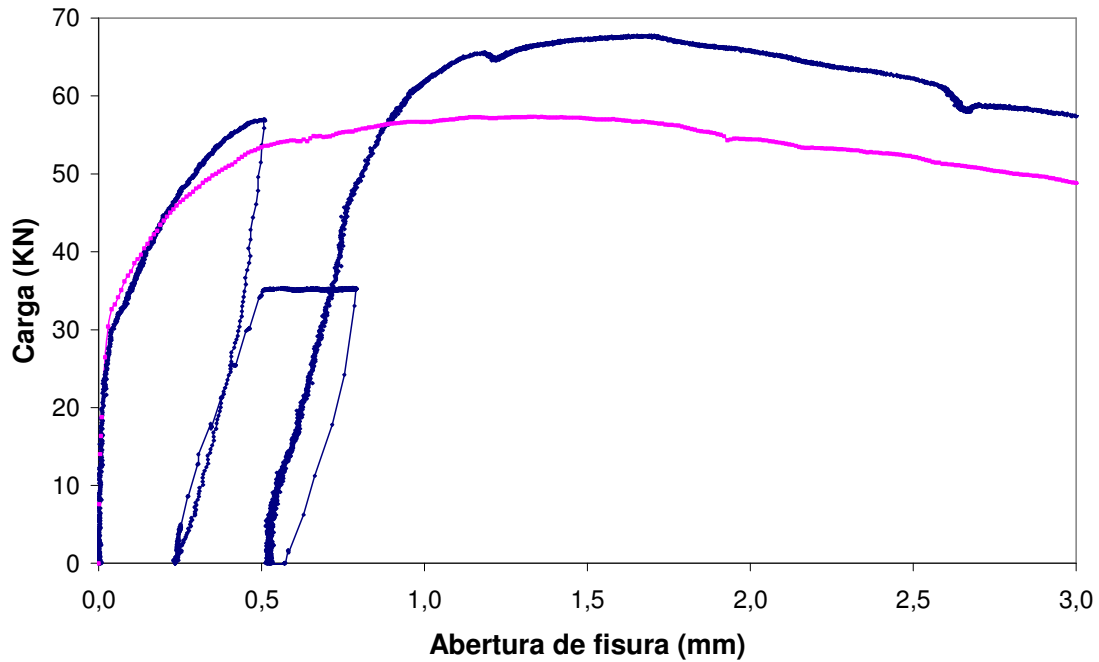


Figura A5.10a. Gráfico de ensayo para elemento 4, I-80/35-70-10.

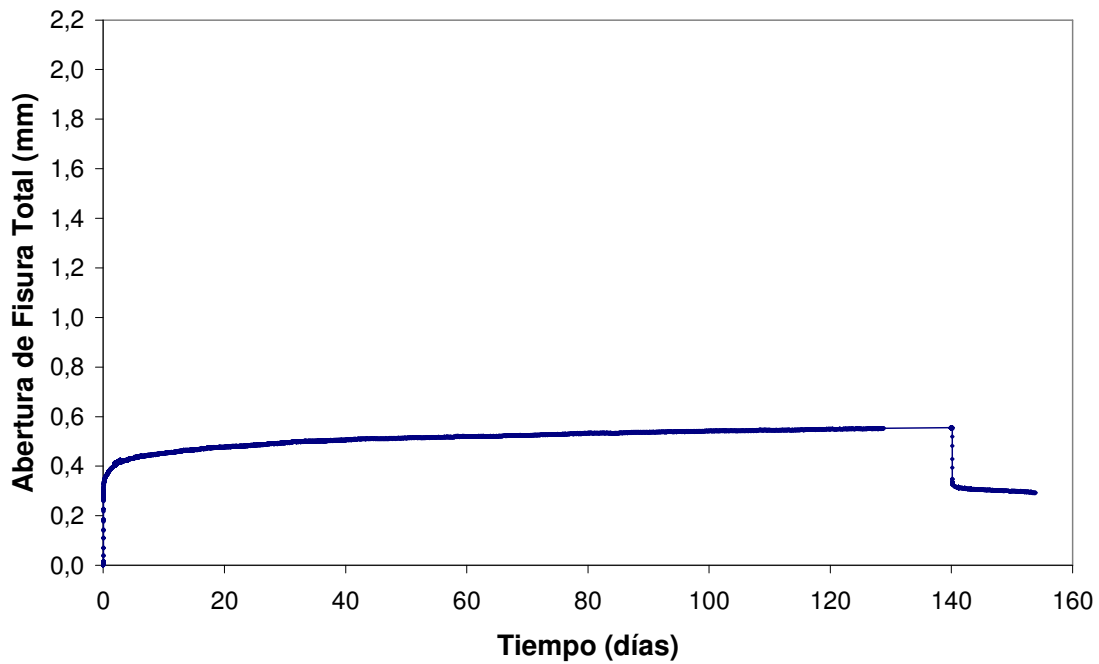


Figura A5.10b. Curva de fluencia para elemento 4, I-80/35-70-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	1
4	BASTIDOR	2

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-70-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	60
Posición en bastidor	1

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	16/09/2008
Carga aplicada (F_a)(kN)	35,3
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	61,9
Fecha descarga	03/02/2009
Duración en carga (t_r)(días)	140
Fecha retiro bastidor	17/02/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	154
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	17/02/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	09/09/2008
Fecha de prefisuración	16/09/2008
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	30,8
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	5,91
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,511
Carga de prefisura (F_w)(kN)	57,0
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,234
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,512
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,790
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,527
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	67,8
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	1,696
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	12,92
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	11,95
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	10,31

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,278
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,259
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,278
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,556
Abertura res. inicial (w_{cti})(mm)	0,335
Abertura res. final (w_{ct}^{df})(mm)	0,293
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,220
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,042
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,263

ANOTACIONES:

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 1 - A 3
Fecha de fabricación	19/08/2008
Fecha de desmoldeo	20/08/2008

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	56,0
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29500
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	33,3
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	6,38
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	10,19
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	10,71
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	9,78
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	8,62
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,150
Carga máxima (F_{max})(kN)	57,3
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	53,1
F_{max} / F_f	1,72
F_w / F_f	1,60
F_{max} / F_w	1,08

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cti})	-
Def. residual final (ϵ_{ct}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.10c. Ficha de ensayo para elemento 4, I-80/35-70-10.

ELEMENTOS I-80/35-70-10

11. Elemento 5, Serie 1, Bastidor 2, Posición 2

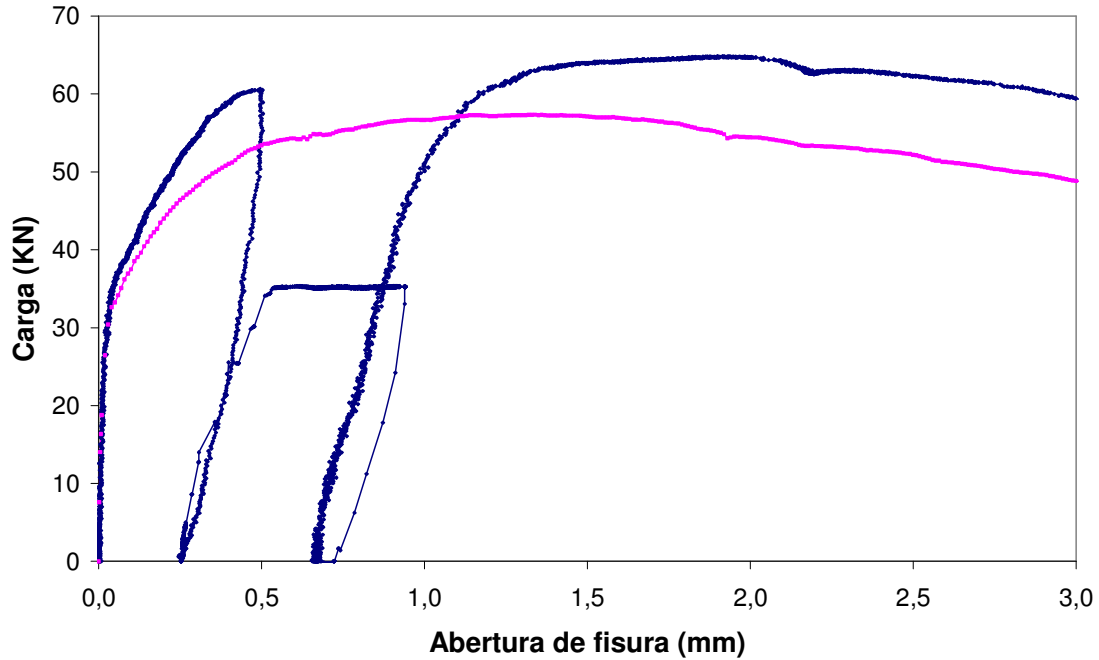


Figura A5.11a. Gráfico de ensayo para elemento 5, I-80/35-70-10.

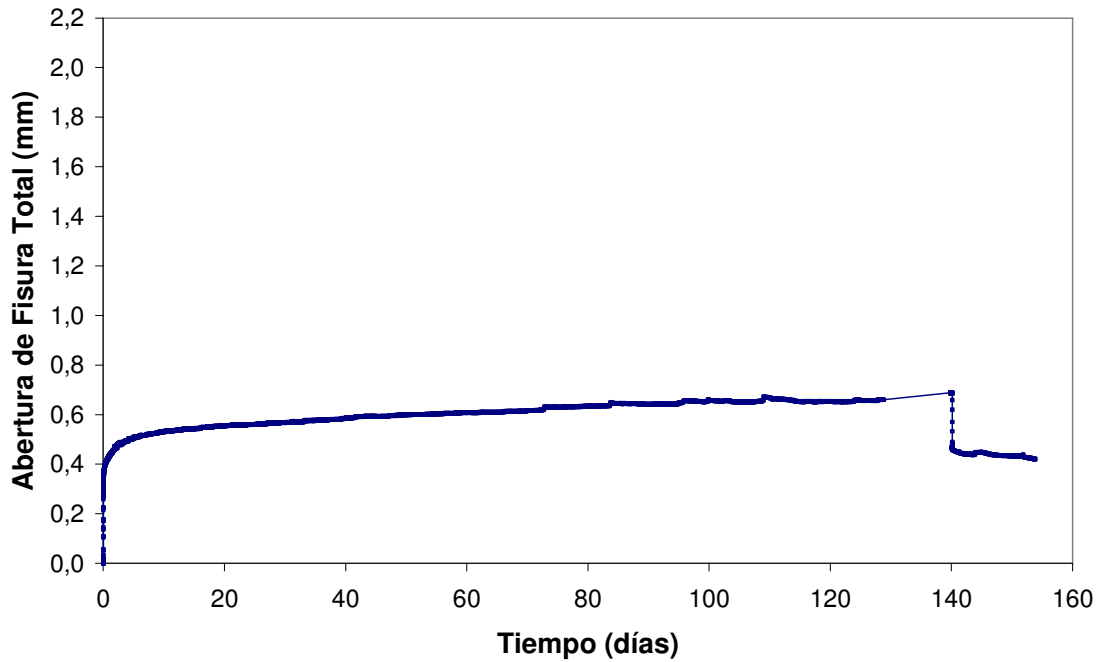


Figura A5.11b. Curva de fluencia para elemento 5, I-80/35-70-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	1
5	BASTIDOR	2

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-70-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	60
Posición en bastidor	2

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	16/09/2008
Carga aplicada (F_a)(kN)	35,9
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	59,2
Fecha descarga	03/02/2009
Duración en carga (t_r)(días)	140
Fecha retiro bastidor	17/02/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	154
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	17/02/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	09/09/2008
Fecha de prefisuración	16/09/2008
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	35,4
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	6,79
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,505
Carga de prefisura (F_w)(kN)	60,6
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,251
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,545
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,938
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,672
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	64,8
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	1,915
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	12,27
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	11,95
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	10,53

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,294
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,348
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,394
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,687
Abertura res. inicial (w_{cti})(mm)	0,469
Abertura res. final (w_{ct}^{df})(mm)	0,421
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,218
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,048
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,266

ANOTACIONES:

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 1 - A 3
Fecha de fabricación	19/08/2008
Fecha de desmoldeo	20/08/2008

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	56,0
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29500
Carga a primera fisura (F_{f1})(kN)	33,3
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	6,38
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	10,19
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	10,71
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	9,78
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	8,62
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,150
Carga máxima (F_{max})(kN)	57,3
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	53,1
F_{max} / F_f	1,72
F_w / F_f	1,60
F_{max} / F_w	1,08

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cti})	-
Def. residual final (ϵ_{ct}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.11c. Ficha de ensayo para elemento 5, I-80/35-70-10.

ELEMENTOS I-80/35-70-10

12. Elemento 6, Serie 1, Bastidor 2, Posición 3

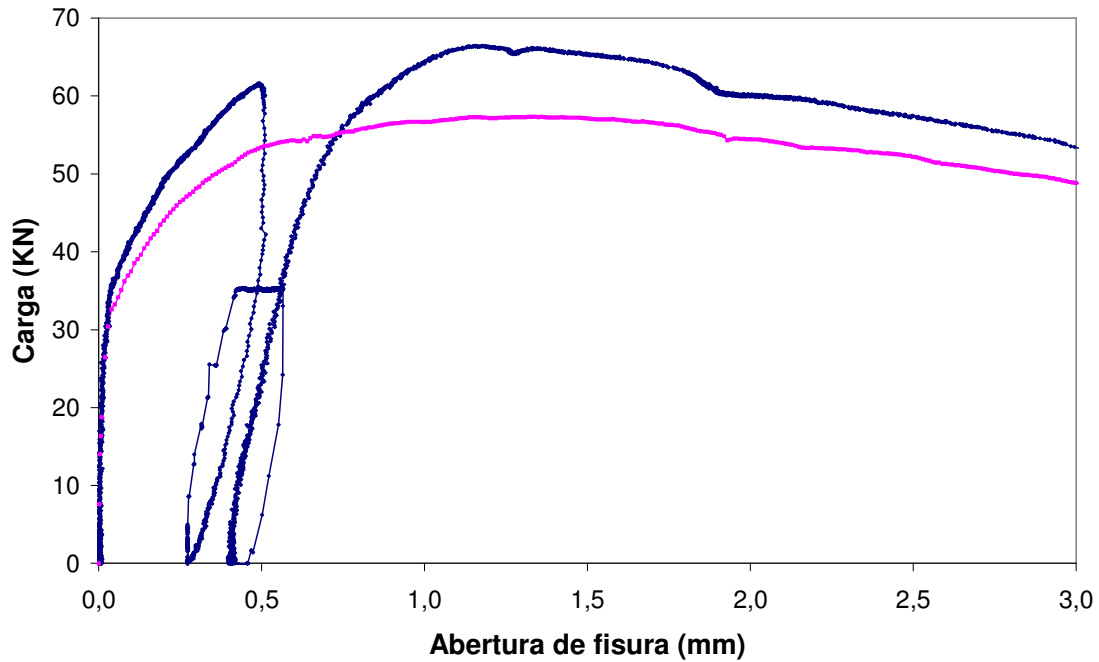


Figura A5.12a. Gráfico de ensayo para elemento 6, I-80/35-70-10.

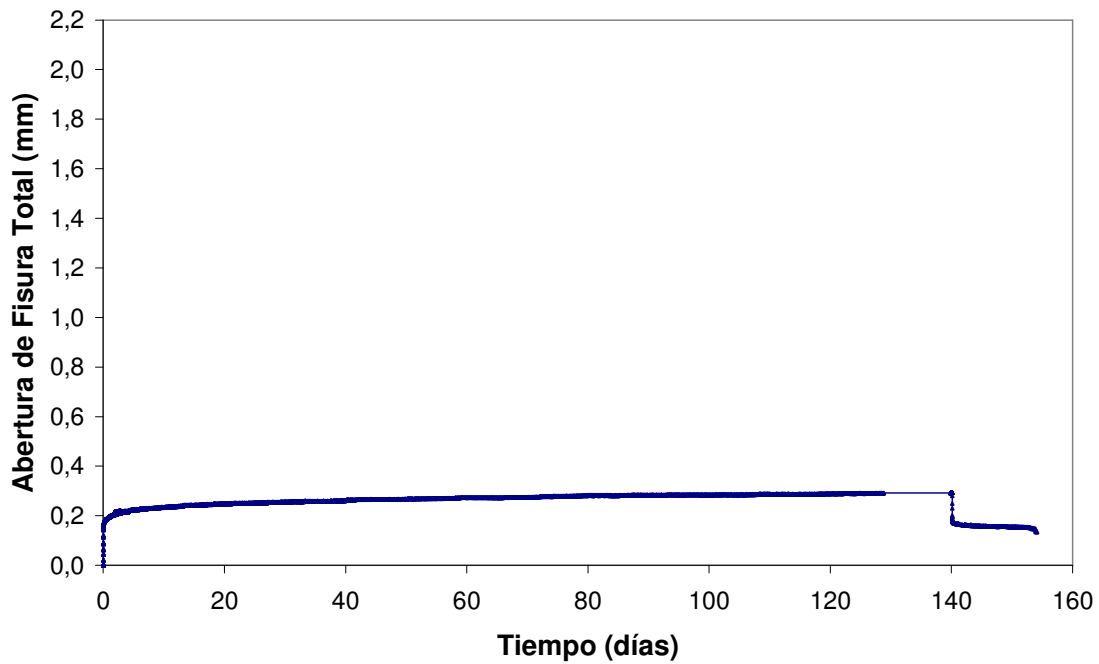


Figura A5.12b. Curva de fluencia para elemento 6, I-80/35-70-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	1
6	BASTIDOR	2

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-70-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	60
Posición en bastidor	3

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	16/09/2008
Carga aplicada (F_a)(kN)	36,5
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	59,2
Fecha descarga	03/02/2009
Duración en carga (t_r)(días)	140
Fecha retiro bastidor	17/02/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	154
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	17/02/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	09/09/2008
Fecha de prefisuración	16/09/2008
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	36,3
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	6,97
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,513
Carga de prefisura (F_w)(kN)	61,6
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,274
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,427
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,567
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,410
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	66,4
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	1,178
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	12,57
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	11,03
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	9,17

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,153
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,131
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,141
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,293
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,184
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,136
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,109
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,048
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,157

ANOTACIONES:

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 1 - A 3
Fecha de fabricación	19/08/2008
Fecha de desmoldeo	20/08/2008

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	56,0
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29500
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	33,3
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	6,38
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	10,19
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	10,71
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	9,78
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	8,62
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,150
Carga máxima (F_{max})(kN)	57,3
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	53,1
F_{max} / F_f	1,72
F_w / F_f	1,60
F_{max} / F_w	1,08

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.12c. Ficha de ensayo para elemento 6, I-80/35-70-10.

ELEMENTOS I-80/35-70-10

13. Elemento 7, Serie 1, Bastidor 3, Posición 1

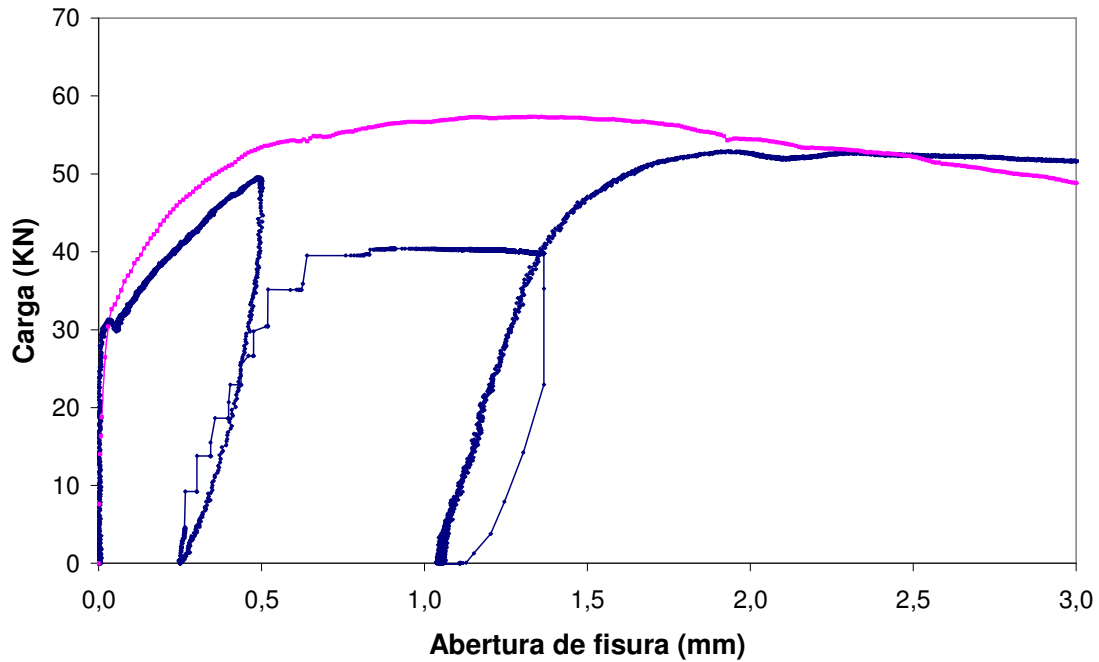


Figura A5.13a. Gráfico de ensayo para elemento 7, I-80/35-70-10.

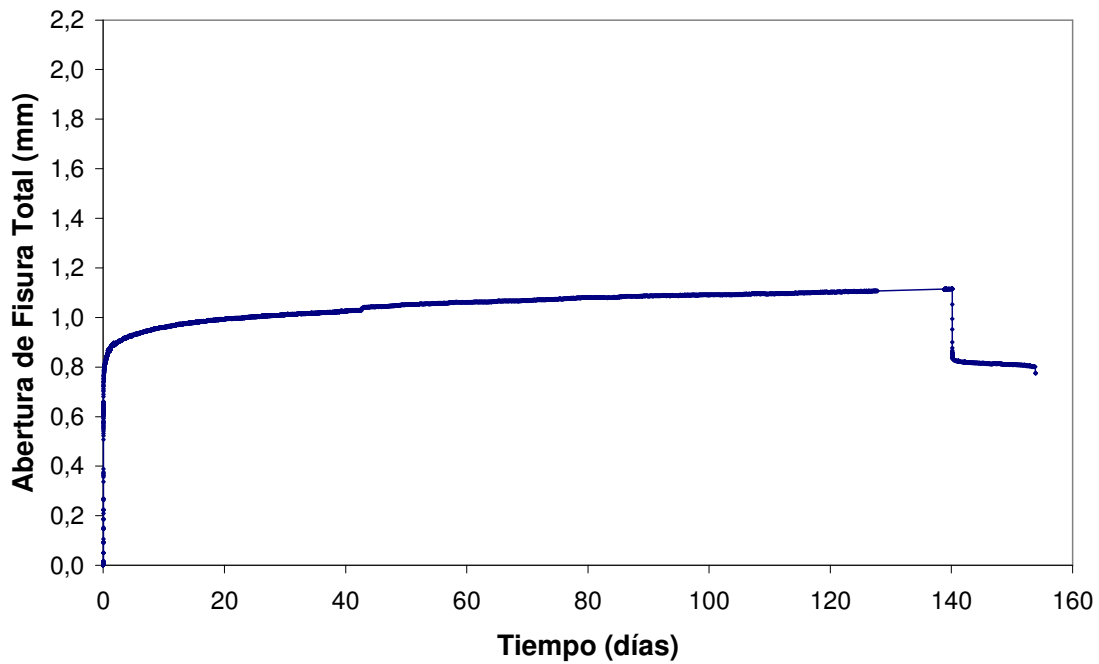


Figura A5.13b. Curva de fluencia para elemento 7, I-80/35-70-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	1
7	BASTIDOR	3

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-70-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	1

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	17/09/2008
Carga aplicada (F_a)(kN)	40,1
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	81,0
Fecha descarga	04/02/2009
Duración en carga (t_r)(días)	140
Fecha retiro bastidor	18/02/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	154
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	18/02/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	10/09/2008
Fecha de prefisuración	17/09/2008
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	31,3
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	6,01
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,505
Carga de prefisura (F_w)(kN)	49,5
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,253
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,870
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,369
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,055
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	52,9
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	1,932
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	9,00
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	10,06
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	9,61

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,617
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,470
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,499
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	1,116
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,854
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,802
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,262
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,052
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,314

ANOTACIONES: aumento en la velocidad de fluencia a los 43 días.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 1 - A 4
Fecha de fabricación	20/08/2008
Fecha de desmoldeo	21/08/2008

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	56,0
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29500
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	33,3
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	6,38
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	10,19
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	10,71
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	9,78
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	8,62
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,150
Carga máxima (F_{max})(kN)	57,3
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	53,1
F_{max} / F_f	1,72
F_w / F_f	1,60
F_{max} / F_w	1,08

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.13c. Ficha de ensayo para elemento 7, I-80/35-70-10.

ELEMENTOS I-80/35-70-10

14. Elemento 8, Serie 1, Bastidor 3, Posición 2

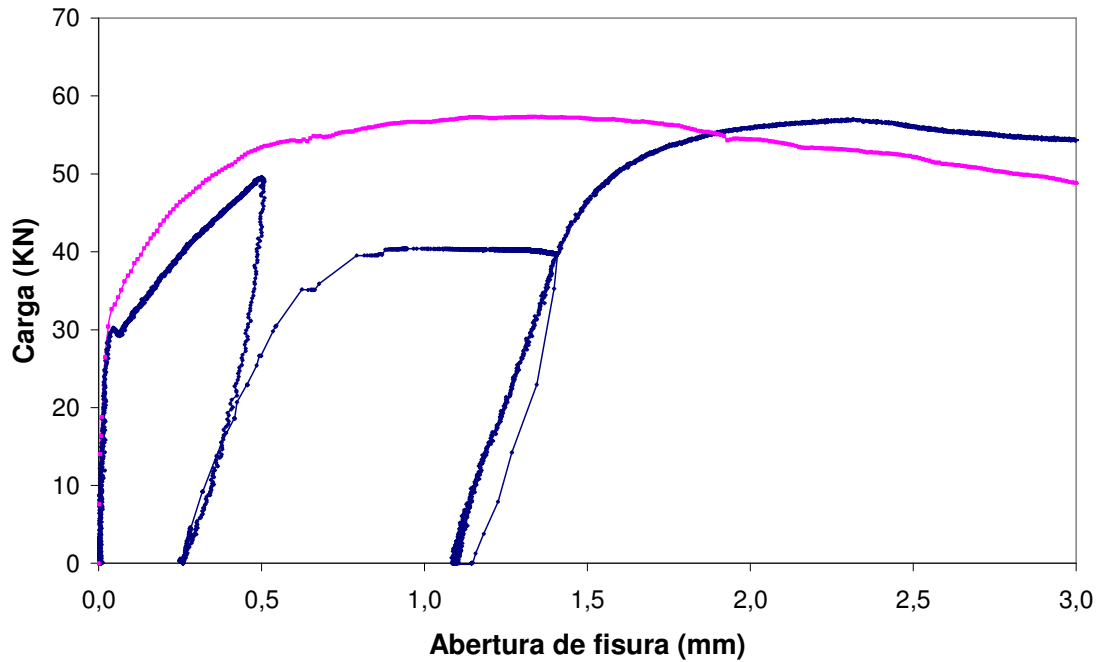


Figura A5.14a. Gráfico de ensayo para elemento 8, I-80/35-70-10.

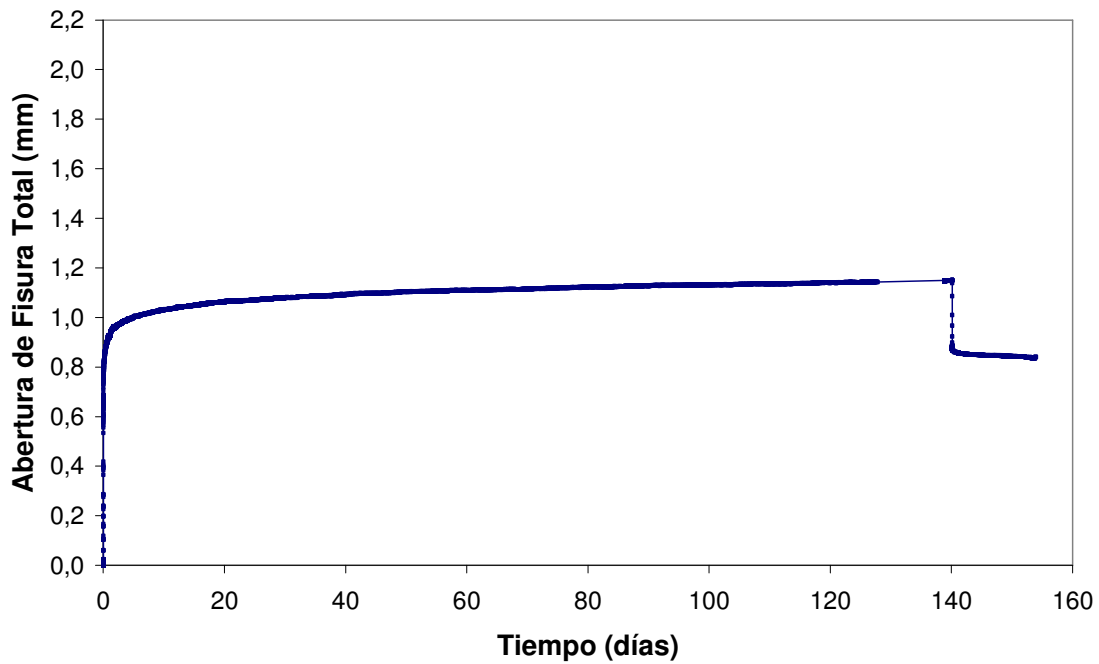


Figura A5.14b. Curva de fluencia para elemento 8, I-80/35-70-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	1
8	BASTIDOR	3

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-70-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	2

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	17/09/2008
Carga aplicada (F_a)(kN)	40,7
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	82,2
Fecha descarga	04/02/2009
Duración en carga (t_r)(días)	140
Fecha retiro bastidor	18/02/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	154
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	18/02/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	10/09/2008
Fecha de prefisuración	17/09/2008
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	30,2
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	5,81
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,509
Carga de prefisura (F_w)(kN)	49,6
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,253
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,902
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,403
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,089
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	57,0
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	2,316
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	8,88
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	10,77
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	9,91

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,649
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,479
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,501
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	1,150
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,885
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,836
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,265
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,049
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,314

ANOTACIONES:

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 1 - A 4
Fecha de fabricación	20/08/2008
Fecha de desmoldeo	21/08/2008

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	56,0
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29500
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	33,3
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	6,38
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	10,19
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	10,71
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	9,78
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	8,62
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,150
Carga máxima (F_{max})(kN)	57,3
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	53,1
F_{max} / F_f	1,72
F_w / F_f	1,60
F_{max} / F_w	1,08

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.14c. Ficha de ensayo para elemento 8, I-80/35-70-10.

ELEMENTOS I-80/35-70-10

15. Elemento 9, Serie 1, Bastidor 3, Posición 3

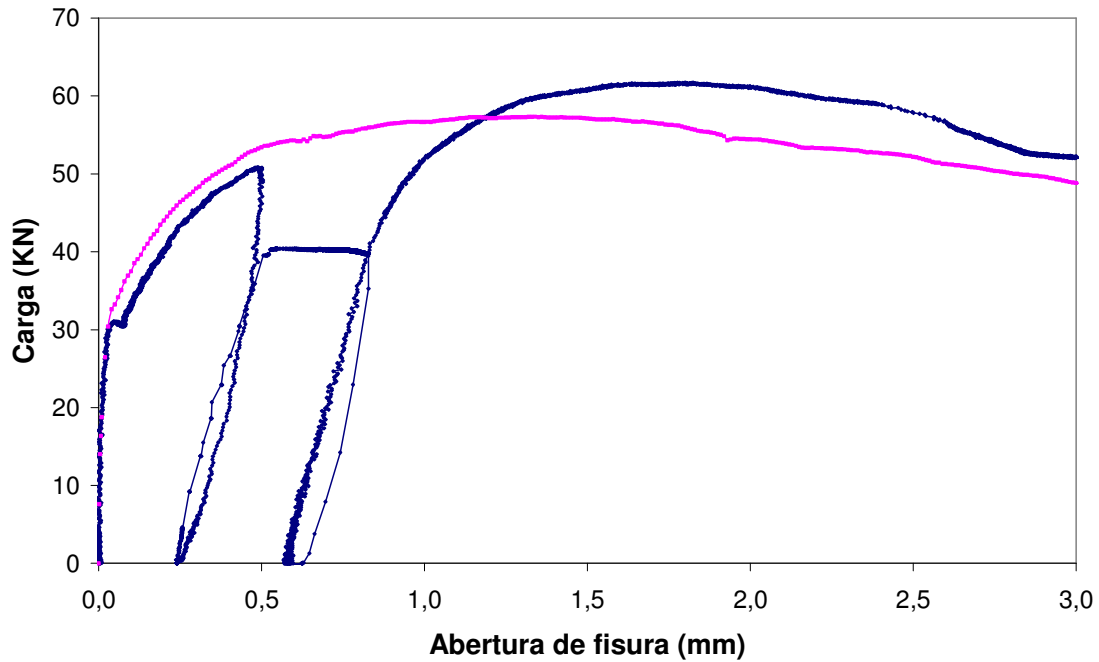


Figura A5.15a. Gráfico de ensayo para elemento 9, I-80/35-70-10.

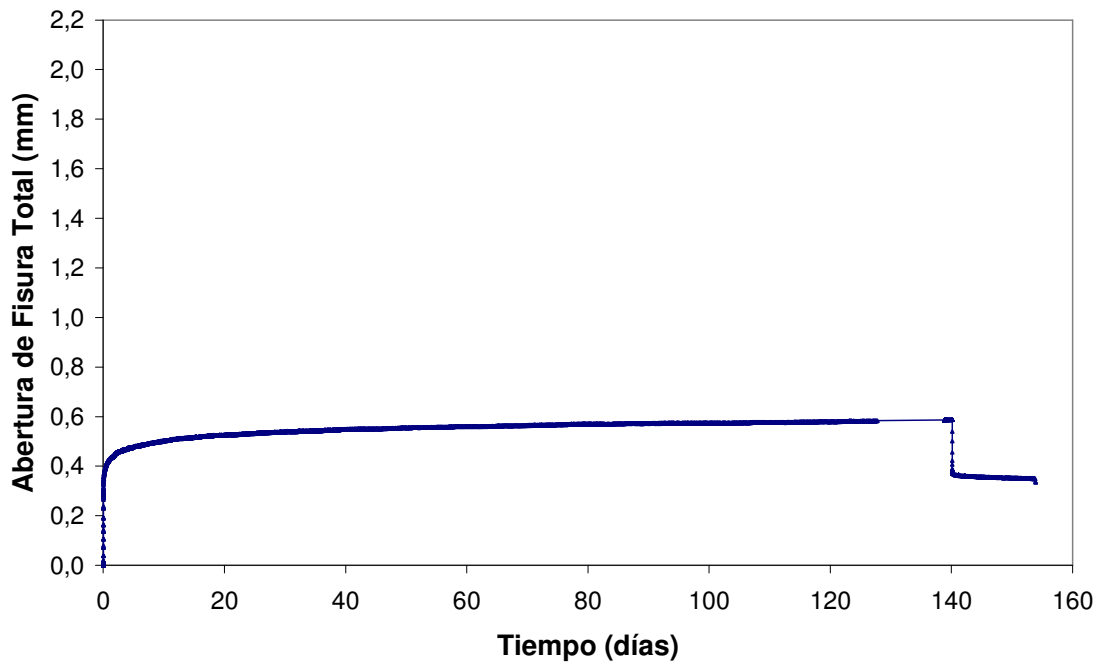


Figura A5.15b. Curva de fluencia para elemento 9, I-80/35-70-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	1
9	BASTIDOR	3

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-70-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	3

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	17/09/2008
Carga aplicada (F_a)(kN)	41,3
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	81,3
Fecha descarga	04/02/2009
Duración en carga (t_r)(días)	140
Fecha retiro bastidor	18/02/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	154
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	18/02/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	10/09/2008
Fecha de prefisuración	17/09/2008
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	31,0
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	5,96
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,505
Carga de prefisura (F_w)(kN)	50,8
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,246
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,540
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,834
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,582
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	61,7
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	1,824
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	11,68
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	11,14
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	9,56

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,294
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,278
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,294
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,588
Abertura res. inicial (w_{cti})(mm)	0,382
Abertura res. final (w_{ct}^{df})(mm)	0,336
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,206
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,046
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,252

ANOTACIONES:

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 1 - A 4
Fecha de fabricación	20/08/2008
Fecha de desmoldeo	21/08/2008

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	56,0
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29500
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	33,3
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	6,38
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	10,19
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	10,71
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	9,78
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	8,62
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,150
Carga máxima (F_{max})(kN)	57,3
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	53,1
F_{max} / F_f	1,72
F_w / F_f	1,60
F_{max} / F_w	1,08

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva general (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cti})	-
Def. residual final (ϵ_{ct}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.15c. Ficha de ensayo para elemento 9, I-80/35-70-10.

ELEMENTOS I-80/35-70-10

16. Elemento 30, Serie 2, Bastidor 4, Posición 1

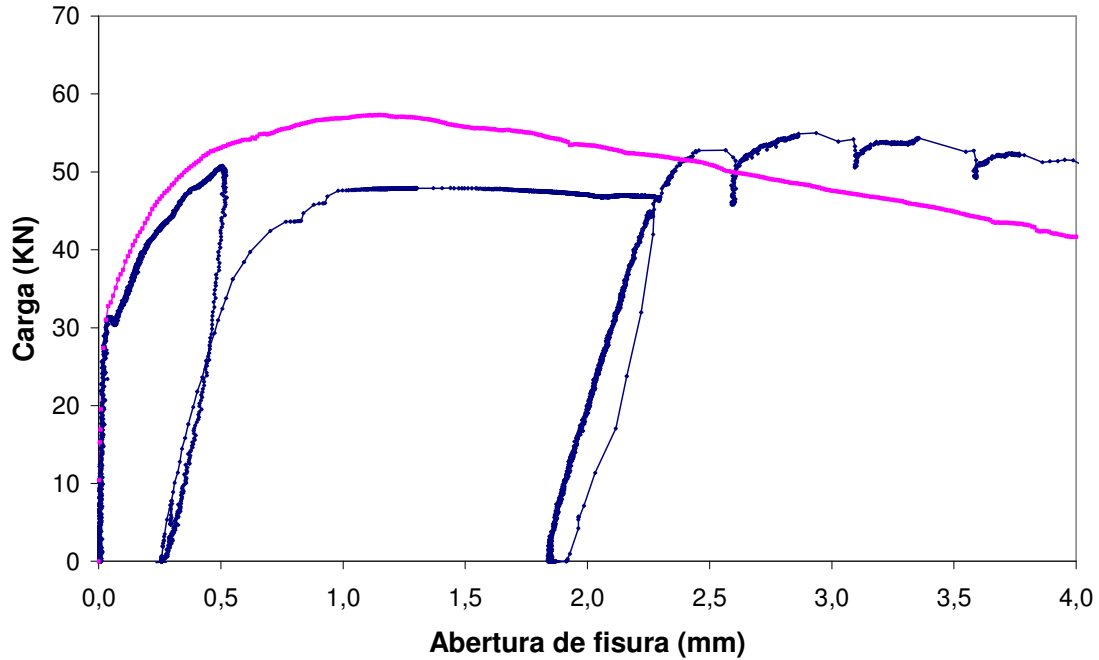


Figura A5.16a. Gráfico de ensayo para elemento 30, I-80/35-70-10.

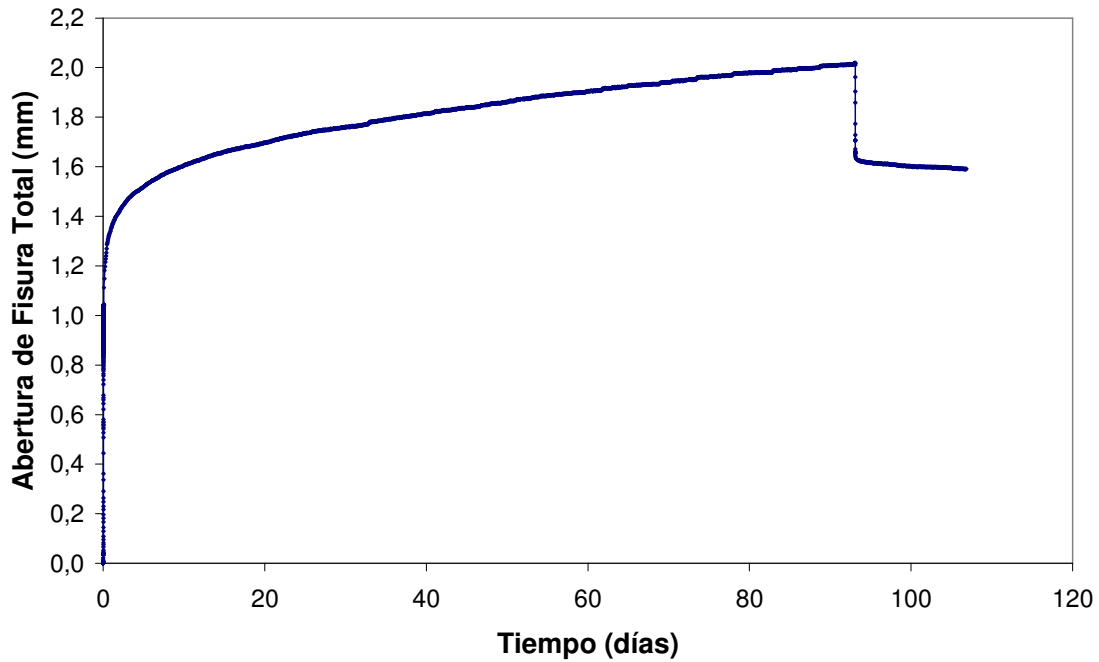


Figura A5.16b. Curva de fluencia para elemento 30, I-80/35-70-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	2
30	BASTIDOR	4

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-70-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	95
Posición en bastidor	1

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	10/03/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	47,4
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	93,7
Fecha descarga	11/06/2009
Duración en carga (t_f)(días)	93
Fecha retiro bastidor	25/06/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	107
Roturas en bastidor	Si
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	25/06/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	19/02/2009
Fecha de prefisuración	09/03/2009
Edad de prefisuración (días)	39
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	31,4
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	5,83
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,525
Carga de prefisura (F_w)(kN)	50,6
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,256
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	1,072
Abertura final (w_{pc})(mm)	2,272
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,847
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	55,0
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	2,936
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	-
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	9,81
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	9,81

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,816
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	1,193
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	1,200
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	2,016
Abertura res. inicial (w_{cti})(mm)	1,654
Abertura res. final (w_{ctf})(mm)	1,591
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,362
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,063
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,425

ANOTACIONES: el elemento 29 a sufrido cuatro procesos de carga, debido a la necesidad de descargar el bastidor para reemplazar elementos que han llegado a la rotura.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 2 - A 1
Fecha de fabricación	29/01/2009
Fecha de desmoldeo	30/01/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	56,0
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29500
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	33,3
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	6,38
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	10,19
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	10,71
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	9,78
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	8,62
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,150
Carga máxima (F_{max})(kN)	57,3
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	53,1
F_{max} / F_f	1,72
F_w / F_f	1,60
F_{max} / F_w	1,08

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cti})	-
Def. residual final (ϵ_{ctf})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.16c. Ficha de ensayo para elemento 30, I-80/35-70-10.

ELEMENTOS I-80/35-70-10

17. Elemento 31, Serie 2, Bastidor 4, Posición 2

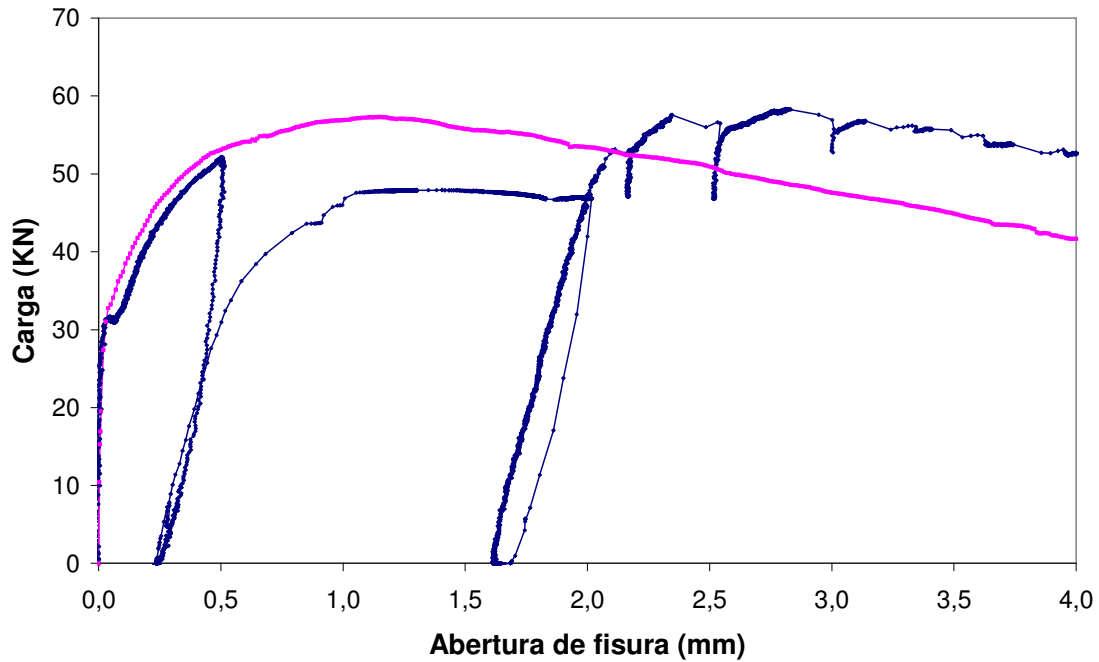


Figura A5.17a. Gráfico de ensayo para elemento 31, I-80/35-70-10.

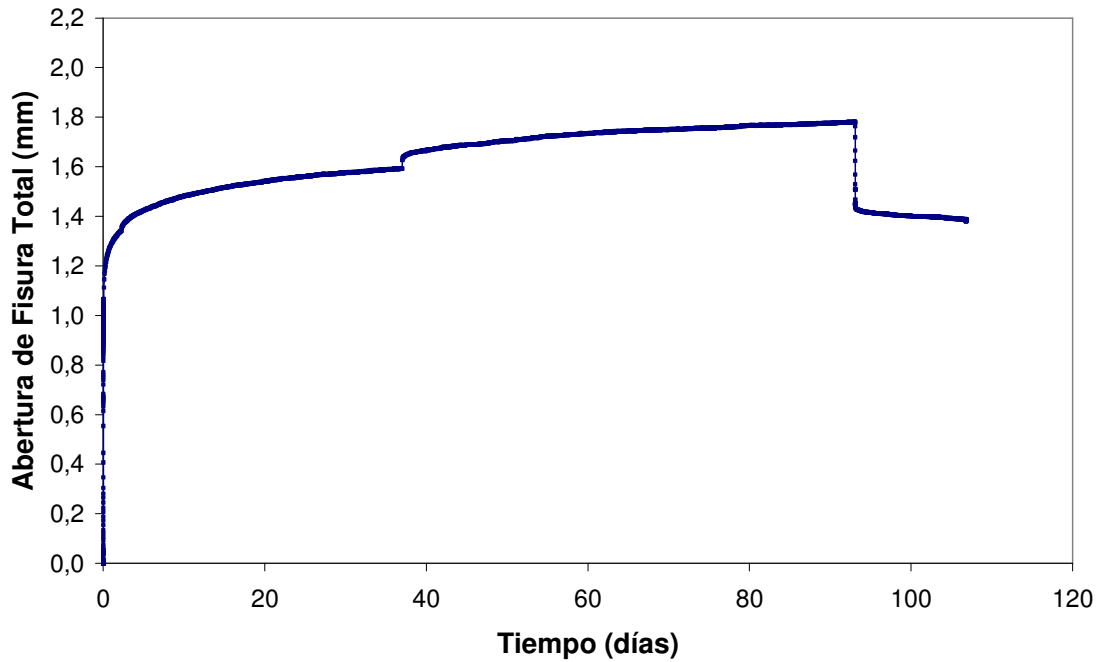


Figura A5.17b. Curva de fluencia para elemento 31, I-80/35-70-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	2
31	BASTIDOR	4

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-70-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	95
Posición en bastidor	2

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	10/03/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	48,0
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	92,1
Fecha descarga	11/06/2009
Duración en carga (t_r)(días)	93
Fecha retiro bastidor	25/06/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	107
Roturas en bastidor	Si
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	25/06/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	19/02/2009
Fecha de prefisuración	09/03/2009
Edad de prefisuración (días)	39
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	31,6
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	5,77
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,516
Carga de prefisura (F_w)(kN)	52,1
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,243
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	1,132
Abertura final (w_{pc})(mm)	2,023
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,625
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	58,3
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	2,811
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	-
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	10,27
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	10,06

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,889
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,887
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,891
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	1,780
Abertura res. inicial (w_{cti})(mm)	1,448
Abertura res. final (w_{ct}^{df})(mm)	1,382
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,332
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,066
Recuperación total (w_{cu})(mm)	0,398

ANOTACIONES: el elemento 29 a sufrido cuatro procesos de carga, debido a la necesidad de descargar el bastidor para reemplazar elementos que han llegado a la rotura. Esta probeta tiene un aumento súbito en la velocidad de deformación elrededor del día 37, que no se ve reflejado en ninguna otra.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 2 - A 1
Fecha de fabricación	29/01/2009
Fecha de desmoldeo	30/01/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	56,0
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29500
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	33,3
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	6,38
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	10,19
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	10,71
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	9,78
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	8,62
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,150
Carga máxima (F_{max})(kN)	57,3
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	53,1
F_{max} / F_f	1,72
F_w / F_f	1,60
F_{max} / F_w	1,08

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cti})	-
Def. residual final (ϵ_{ct}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cu})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.17c. Ficha de ensayo para elemento 31, I-80/35-70-10.

ELEMENTOS I-80/35-70-10

18. Elemento 29, Serie 2, Bastidor 4, Posición 3

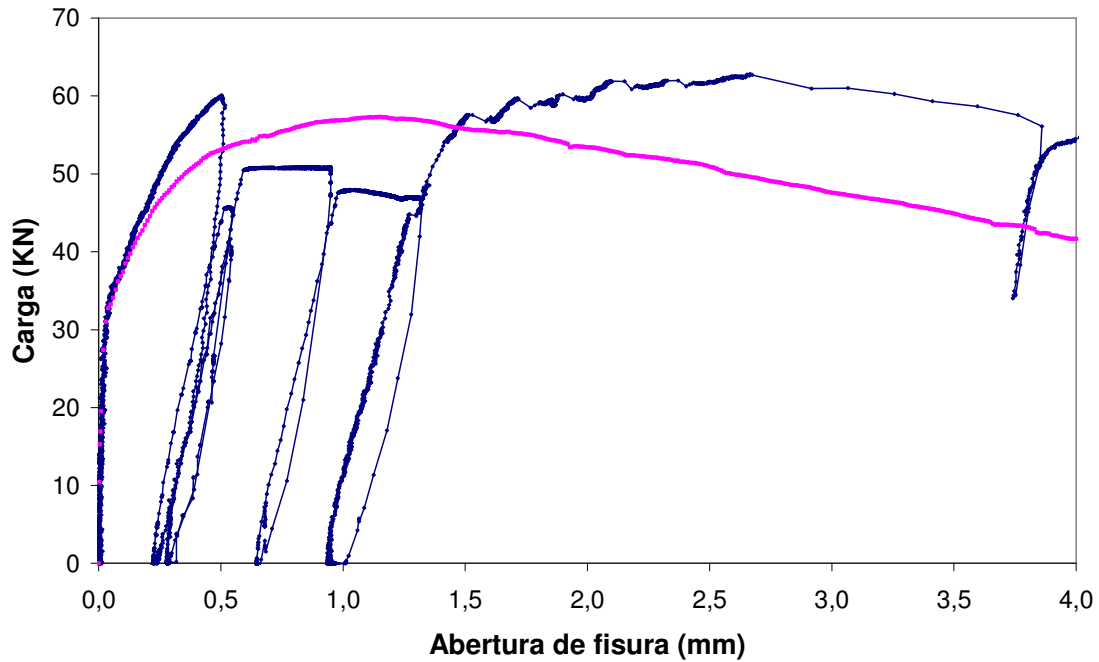


Figura A5.18a. Gráfico de ensayo para elemento 29, I-80/35-70-10.

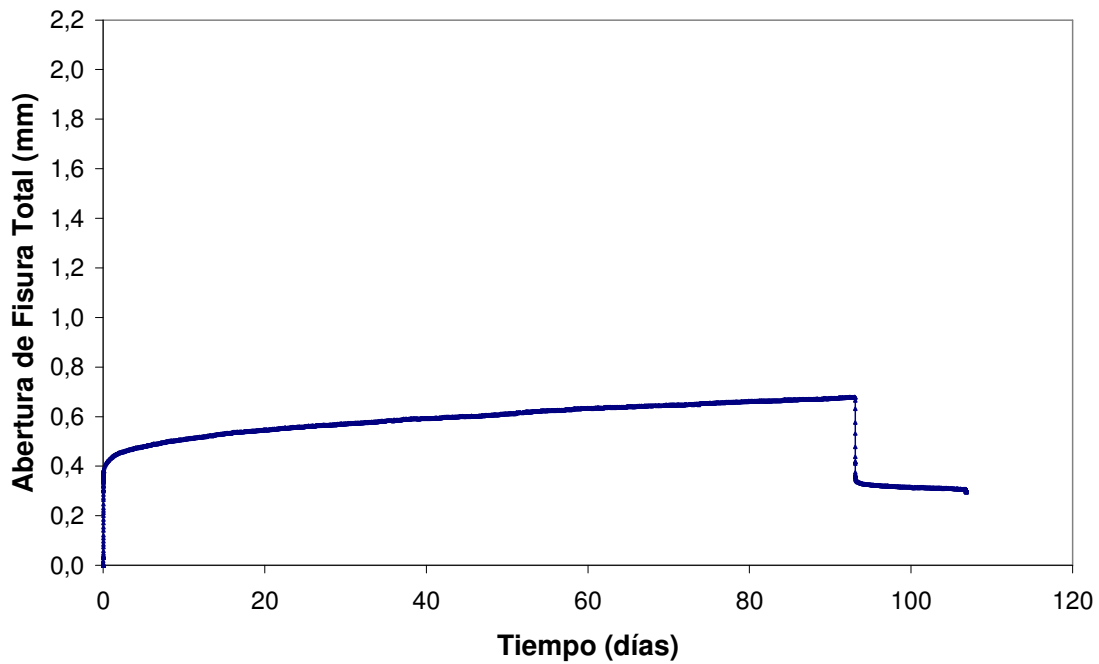


Figura A5.18b. Curva de fluencia para elemento 29, I-80/35-70-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	2
29	BASTIDOR	4

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/35-70-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	95
Posición en bastidor	3

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	10/03/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	48,6
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	80,9
Fecha descarga	11/06/2009
Duración en carga (t_f)(días)	93
Fecha retiro bastidor	25/06/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	107
Roturas en bastidor	Si
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	25/06/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	19/02/2009
Fecha de prefisuración	27/02/2009
Edad de prefisuración (días)	29
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	33,8
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	6,33
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,518
Carga de prefisura (F_w)(kN)	60,0
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,229
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,573
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,906
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,526
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	62,8
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	2,667
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	10,68
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	11,55
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	11,04

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,344
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,329
Abertura dif. final (w_{cd}^{ff})(mm)	0,333
Abertura total final (w_{ct}^{ff})(mm)	0,677
Abertura res. inicial (w_{cti})(mm)	0,360
Abertura res. final (w_{ctf}^{ff})(mm)	0,297
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,318
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,063
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,380

ANOTACIONES: el elemento 29 a sufrido cuatro procesos de carga, debido a la necesidad de descargar el bastidor para reemplazar elementos que han llegado a la rotura.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 2 - A 1
Fecha de fabricación	29/01/2009
Fecha de desmoldeo	30/01/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	56,0
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	29500
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	33,3
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	6,38
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	10,19
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	10,71
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	9,78
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	8,62
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,150
Carga máxima (F_{max})(kN)	57,3
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	53,1
F_{max} / F_f	1,72
F_w / F_f	1,60
F_{max} / F_w	1,08

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	0,672
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	0,851
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{ff})	0,858
Def. total final (ϵ_{ct}^{ff})	1,530
Def. residual inicial (ϵ_{cti})	0,945
Def. residual final (ϵ_{ctf}^{ff})	0,818
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	0,585
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	0,127
Recuperación total (ϵ_{cut})	0,712

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	3
Recarga número	3

Figura A5.18c. Ficha de ensayo para elemento 29, I-80/35-70-10.

ELEMENTOS I-80/50-40-10

19. Elemento 41, Serie 3, Bastidor 3, Posición 2

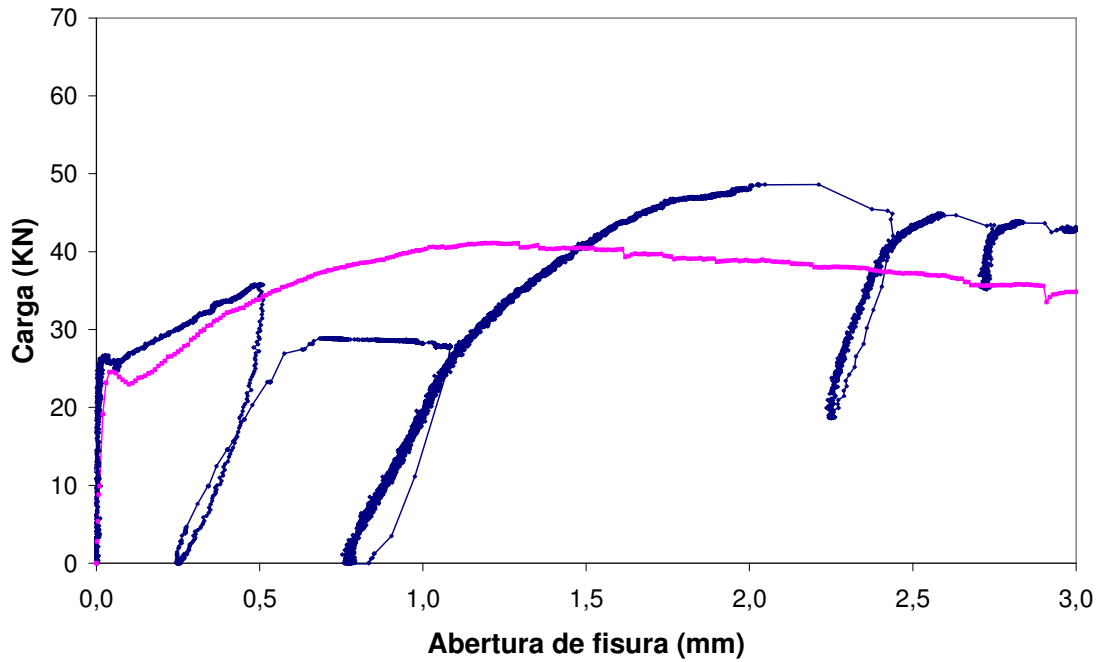


Figura A5.19a. Gráfico de ensayo para elemento 41, I-80/50-40-10.

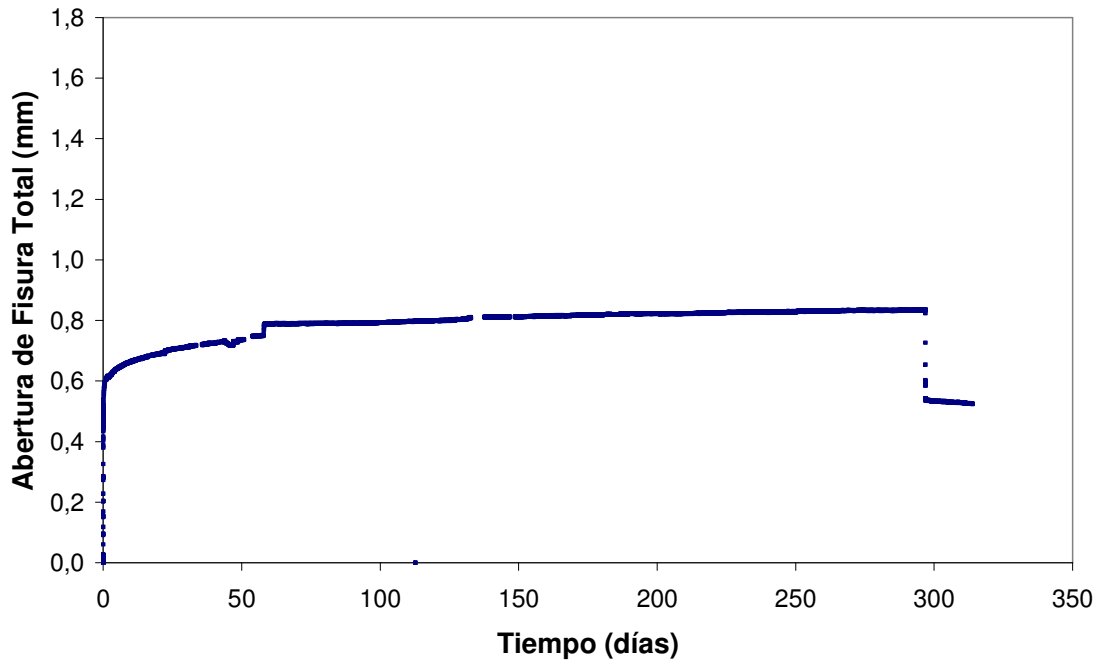


Figura A5.19b. Curva de fluencia para elemento 41, I-80/50-40-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	3
41	BASTIDOR	3

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/50-40-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	2

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	01/07/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	28,5
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	79,6
Fecha descarga	24/04/2010
Duración en carga (t_r)(días)	297
Fecha retiro bastidor	11/05/2010
Duración total ensayo (t_t)(días)	314
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	11/05/2010

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	24/06/2009
Fecha de prefisuración	01/07/2009
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	26,7
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	5,13
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,511
Carga de prefisura (F_w)(kN)	35,8
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,250
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,707
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,084
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,775
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	48,6
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	2,028
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	7,91
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	8,22
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	7,69

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,457
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,334
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,377
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,834
Abertura res. inicial (w_{cti})(mm)	0,541
Abertura res. final (w_{ctf}^{df})(mm)	0,525
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,293
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,016
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,309

ANOTACIONES: en la descarga las barras de tiro tiran de los cables de los captadores y producen un incremento en la abertura de fisura que ha sido corregido.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	A 3 - Serie 3
Fecha de fabricación	03/06/2009
Fecha de desmoldeo	04/06/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	54,1
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	26900
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	24,5
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,53
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	6,14
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	7,33
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	6,79
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,98
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,280
Carga máxima (F_{max})(kN)	41,1
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	33,9
F_{max} / F_f	1,67
F_w / F_f	1,38
F_{max} / F_w	1,21

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	0,759
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	0,258
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	0,621
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	0,845
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	1,027
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	1,648
Def. residual inicial (ϵ_{cti})	1,262
Def. residual final (ϵ_{ctf}^{df})	1,210
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	0,386
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	0,052
Recuperación total (ϵ_{cut})	0,438

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.19c. Ficha de ensayo para elemento 41, I-80/50-40-10.

ELEMENTOS I-80/50-40-10

20. Elemento 42, Serie 3, Bastidor 3, Posición 3

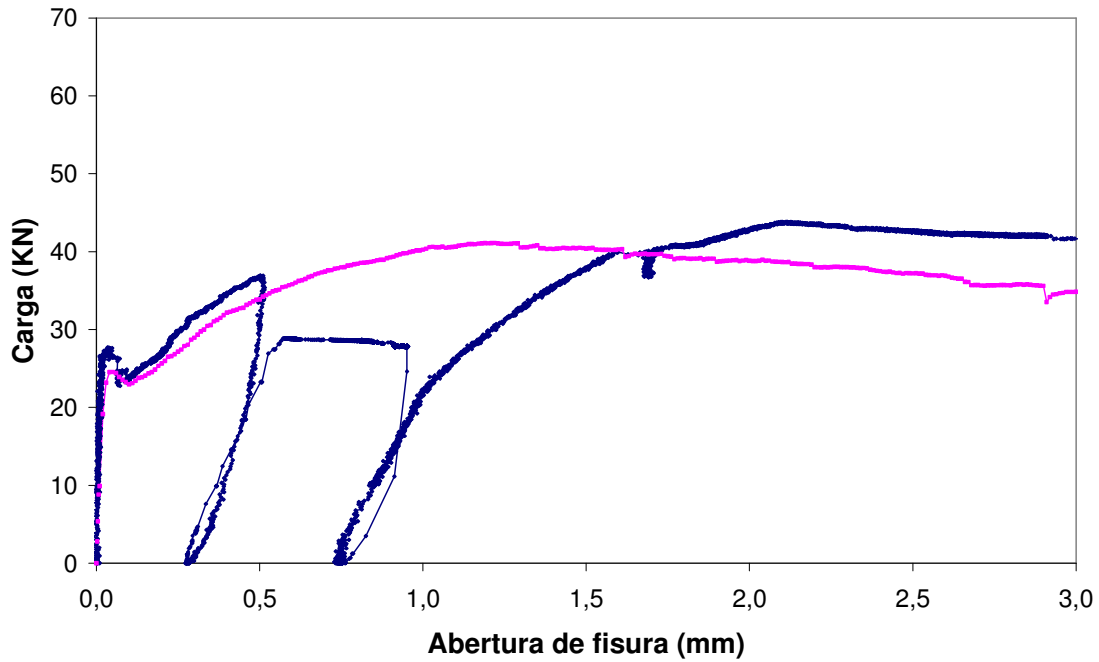


Figura A5.20a. Gráfico de ensayo para elemento 42, I-80/50-40-10.

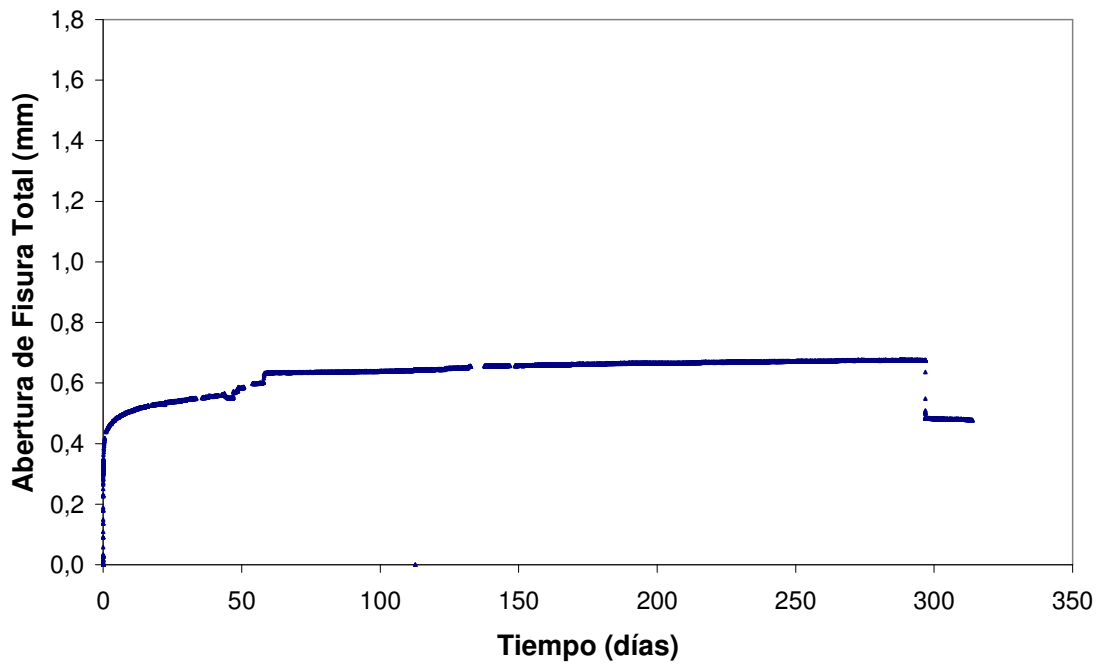


Figura A5.20b. Curva de fluencia para elemento 42, I-80/50-40-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	3
42	BASTIDOR	3

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-80/50-40-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	3

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	01/07/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	29,1
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	78,8
Fecha descarga	24/04/2010
Duración en carga (t_r)(días)	297
Fecha retiro bastidor	11/05/2010
Duración total ensayo (t_t)(días)	314
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	11/05/2010

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	24/06/2009
Fecha de prefisuración	01/07/2009
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	27,7
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	5,32
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,515
Carga de prefisura (F_w)(kN)	36,9
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,278
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,584
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,953
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,756
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	43,8
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	2,112
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	7,28
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	8,18
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	-

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,306
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,332
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,369
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,675
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,484
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,478
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,191
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,006
Recuperación total (w_{cu})(mm)	0,197

ANOTACIONES: en la descarga las barras de tiro tiran de los cables de los captadores y producen un incremento en la abertura de fisura que ha sido corregido.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	A 3 - Serie 3
Fecha de fabricación	03/06/2009
Fecha de desmoldeo	04/06/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	54,1
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	26900
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	24,5
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,53
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	6,14
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	7,33
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	6,79
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,98
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,280
Carga máxima (F_{max})(kN)	41,1
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	33,9
F_{max} / F_f	1,67
F_w / F_f	1,38
F_{max} / F_w	1,21

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cu})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.20c. Ficha de ensayo para elemento 42, I-80/50-40-10.

ELEMENTOS I-2φ8-10

21. Elemento 46, Serie 3, Bastidor 5, Posición 1

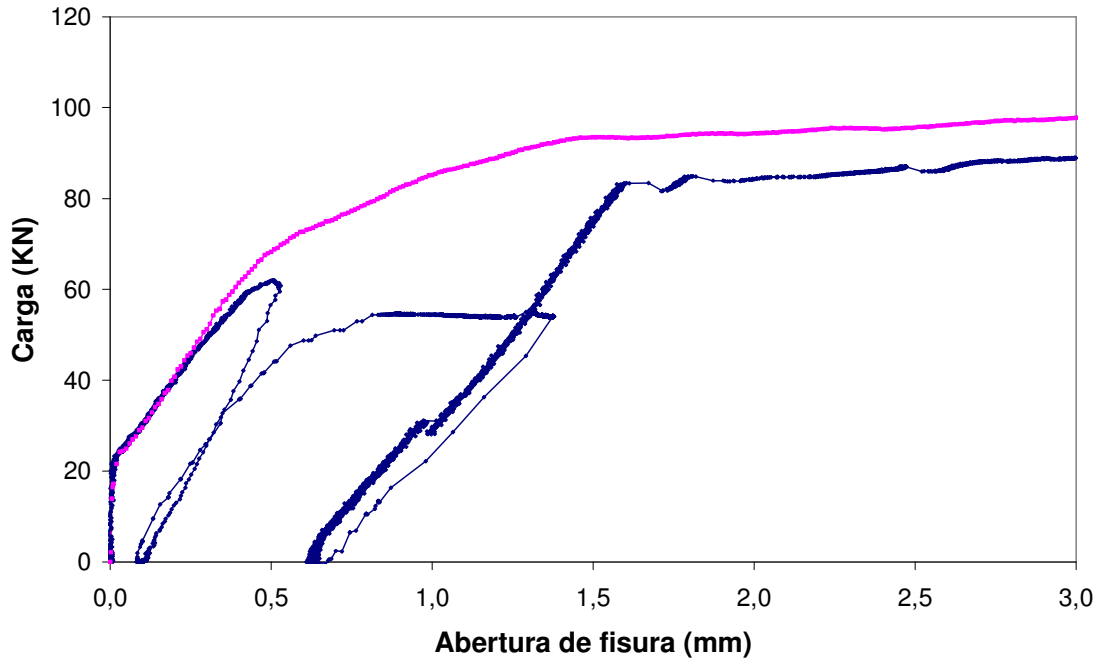


Figura A5.21a. Gráfico de ensayo para elemento 46, I-2φ8-10.

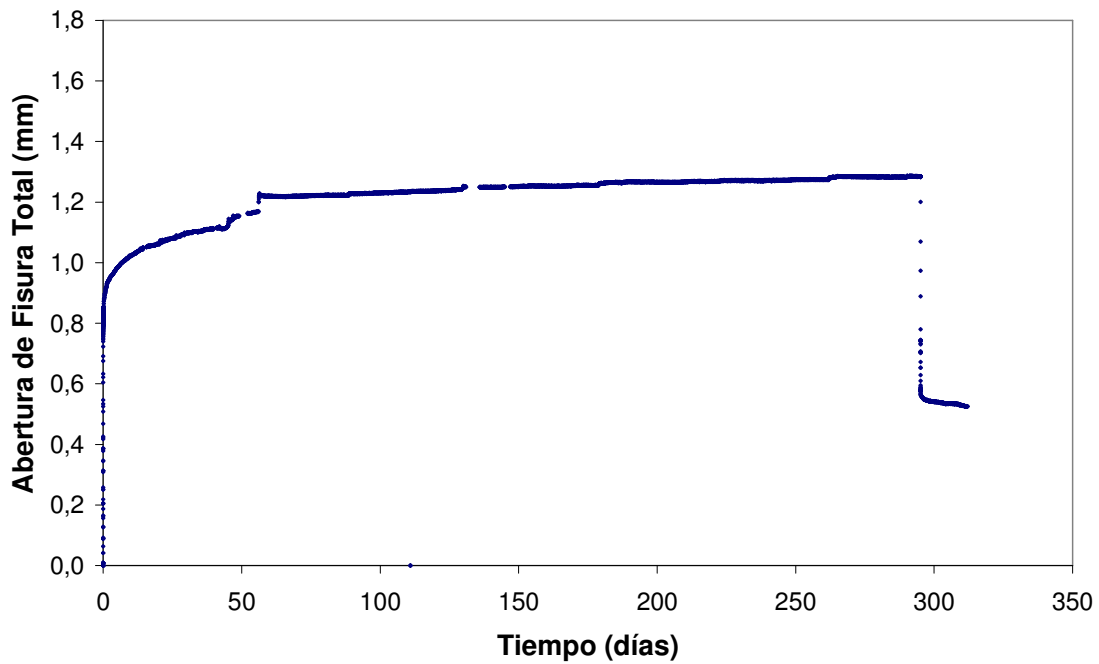


Figura A5.21b. Curva de fluencia para elemento 46, I-2φ8-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	3
46	BASTIDOR	5

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-2φ8-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	1

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	03/07/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	54,3
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	87,6
Fecha descarga	24/04/2010
Duración en carga (t_r)(días)	295
Fecha retiro bastidor	11/05/2010
Duración total ensayo (t_t)(días)	312
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	11/05/2010

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	26/06/2009
Fecha de prefisuración	03/07/2009
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	25,7
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,94
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,530
Carga de prefisura (F_w)(kN)	62,0
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,096
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,868
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,380
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,622
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	89,3
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	4,000
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	14,52
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	16,72
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	17,70

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,773
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,455
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,511
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	1,284
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,577
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,526
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,707
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,051
Recuperación total (w_{cu})(mm)	0,758

ANOTACIONES: caída en la abertura de fisura en probeta 3, probablemente causada por fisuras generadas bajo los puntos de carga.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	A 5 - Serie 3
Fecha de fabricación	05/06/2009
Fecha de desmoldeo	06/06/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	56,0
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	28700
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	25,0
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,80
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	13,10
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	17,95
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	18,36
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	18,70
Abertura carga max (w_{max})(mm)	4,000
Carga máxima (F_{max})(kN)	99,1
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	68,3
F_{max} / F_f	3,97
F_w / F_f	2,73
F_{max} / F_w	1,45

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cu})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.21c. Ficha de ensayo para elemento 46, I-2φ8-10.

ELEMENTOS I-2φ8-10

22. Elemento 47, Serie 3, Bastidor 5, Posición 2

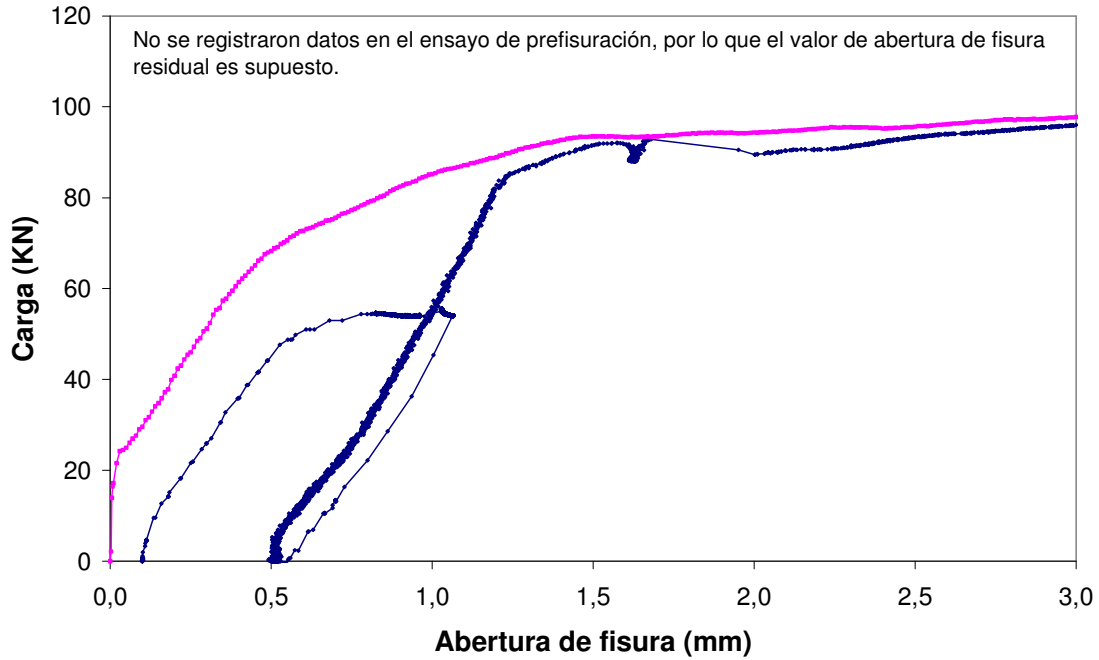


Figura A5.22a. Gráfico de ensayo para elemento 47, I-2φ8-10.

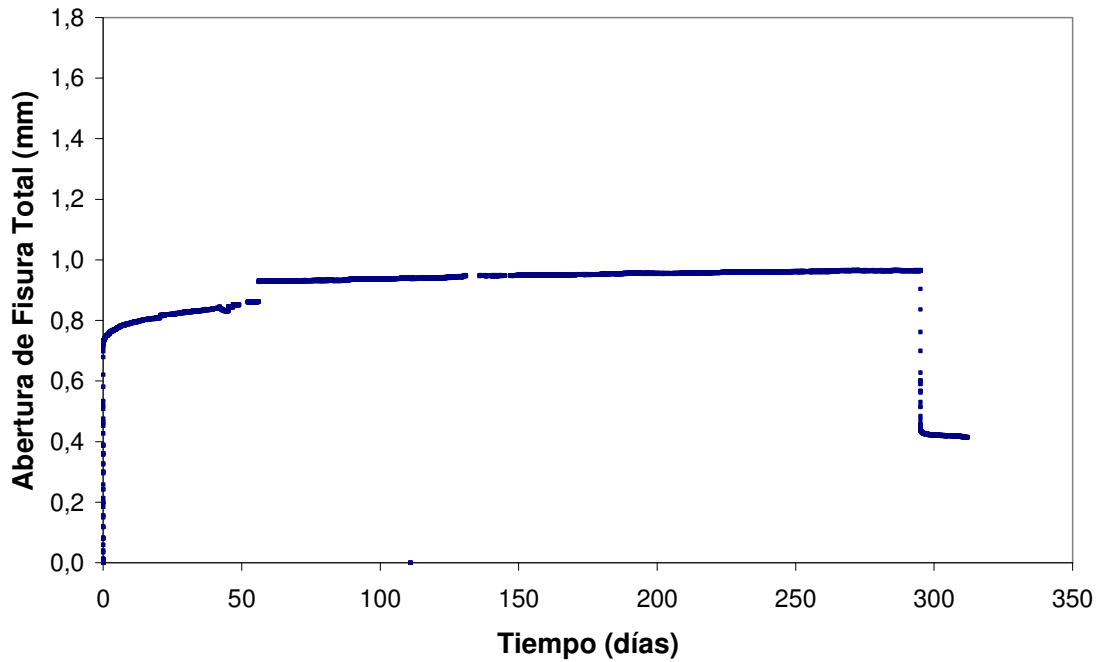


Figura A5.22b. Curva de fluencia para elemento 47, I-2φ8-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	3
47	BASTIDOR	5

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-2φ8-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	2

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	03/07/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	54,9
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	81,6
Fecha descarga	24/04/2010
Duración en carga (t_r)(días)	295
Fecha retiro bastidor	11/05/2010
Duración total ensayo (t_t)(días)	312
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	11/05/2010

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	26/06/2009
Fecha de prefisuración	03/07/2009
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	-
Resist. primera fisura (f_{cf1})(MPa)	-
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	-
Carga de prefisura (F_w)(kN)	67,3
Abertura residual (w_{pr})(mm)	-
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	-
Abertura final (w_{pc})(mm)	-
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	-
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	-
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	-
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	-
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	-
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	-

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,734
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,202
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,230
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,964
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,446
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,414
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,518
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,032
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,550

ANOTACIONES: en el ensayo de prefisura de este elemento (F probeta 2), el sistema de adquisición de datos no registra nada, archivo creado pero vacío.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	A 5 - Serie 3
Fecha de fabricación	05/06/2009
Fecha de desmoldeo	06/06/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	56,0
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	28700
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	25,0
Resist. primera fisura (f_{cf})(MPa)	4,80
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	13,10
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	17,95
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	18,36
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	18,70
Abertura carga max (w_{max})(mm)	4,000
Carga máxima (F_{max})(kN)	99,1
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	68,3
F_{max} / F_f	3,97
F_w / F_f	2,73
F_{max} / F_w	1,45

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	0,879
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	0,111
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	0,961
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	0,973
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	1,152
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	2,113
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	1,234
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	1,153
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	0,879
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	0,081
Recuperación total (ϵ_{cut})	0,960

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.22c. Ficha de ensayo para elemento 47, I-2φ8-10.

ELEMENTOS I-2φ8-10

23. Elemento 48, Serie 3, Bastidor 5, Posición 3

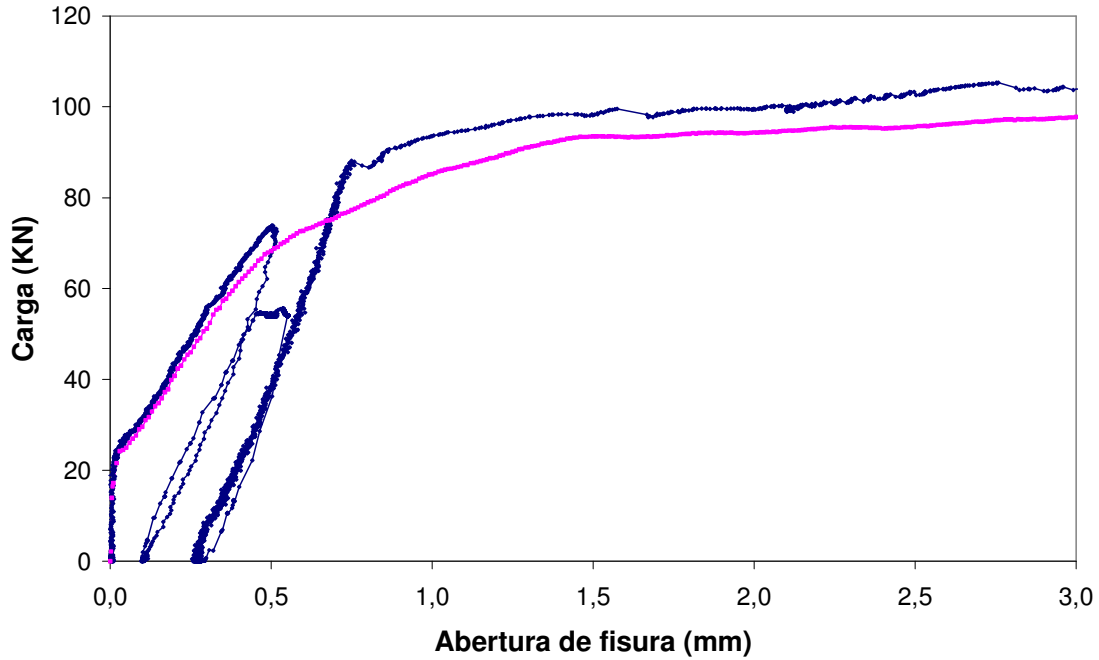


Figura A5.23a. Gráfico de ensayo para elemento 48, I-2φ8-10.

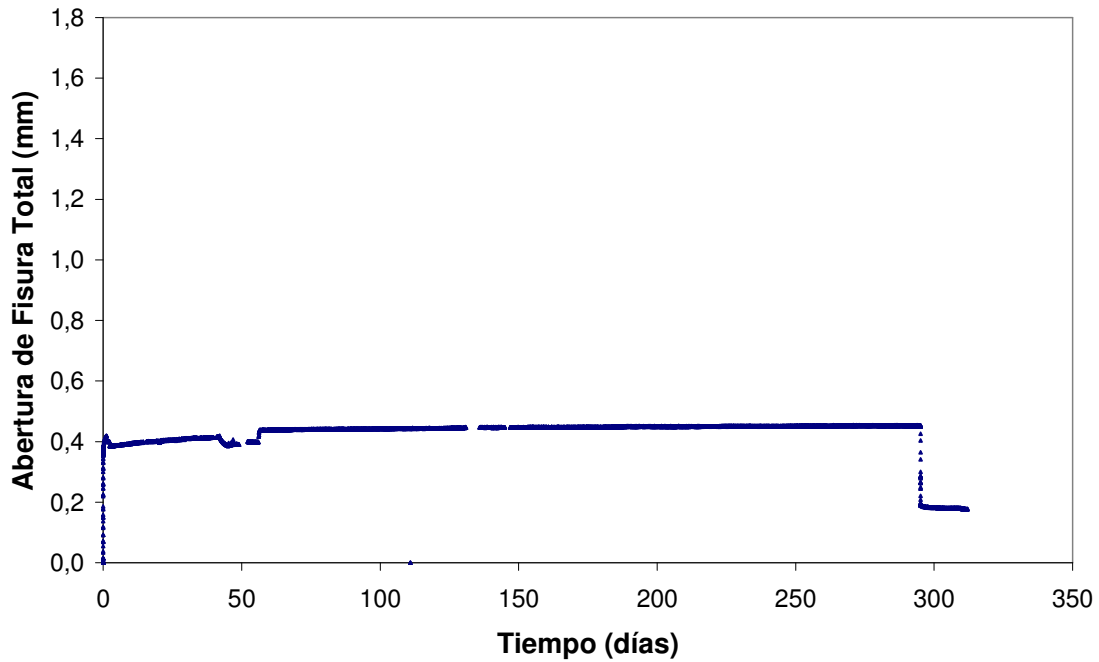


Figura A5.23b. Curva de fluencia para elemento 48, I-2φ8-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	3
48	BASTIDOR	5

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-2φ8-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	3

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	03/07/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	55,5
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	75,3
Fecha descarga	24/04/2010
Duración en carga (t_r)(días)	295
Fecha retiro bastidor	11/05/2010
Duración total ensayo (t_t)(días)	312
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	11/05/2010

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	26/06/2009
Fecha de prefisuración	03/07/2009
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	26,9
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	5,17
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,517
Carga de prefisura (F_w)(kN)	73,7
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,101
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,461
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,553
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,278
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	110,8
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	4,000
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	18,89
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	19,83
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	20,53

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,360
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,082
Abertura dif. Final (w_{cd}^{ff})(mm)	0,092
Abertura total final (w_{ct}^{ff})(mm)	0,452
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,193
Abertura res. final (w_{cr}^{ff})(mm)	0,177
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,259
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,016
Recuperación total (w_{cu})(mm)	0,275

ANOTACIONES: caída en la abertura de fisura en probeta 3, probablemente causada por fisuras generadas bajo los puntos de carga.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	A 5 - Serie 3
Fecha de fabricación	05/06/2009
Fecha de desmoldeo	06/06/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	56,0
Módulo deformación (E_{cs})(Mpa)	28700
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	25,0
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,80
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	13,10
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	17,95
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	18,36
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	18,70
Abertura carga max (w_{max})(mm)	4,000
Carga máxima (F_{max})(kN)	99,1
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	68,3
F_{max} / F_f	3,97
F_w / F_f	2,73
F_{max} / F_w	1,45

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{ff})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{ff})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{ff})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cu})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.23c. Ficha de ensayo para elemento 48, I-2φ8-10.

ELEMENTOS II-80/50-40-20

24. Elemento 38, Serie 3, Bastidor 4, Posición 1

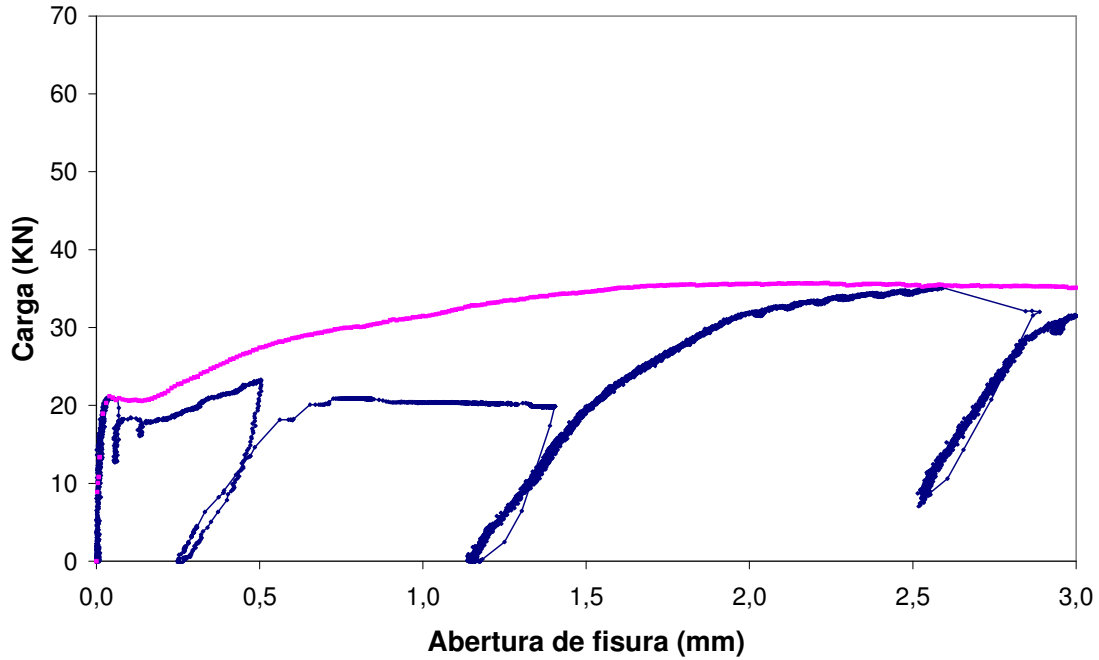


Figura A5.24a. Gráfico de ensayo para elemento 38, II-80/50-40-20.

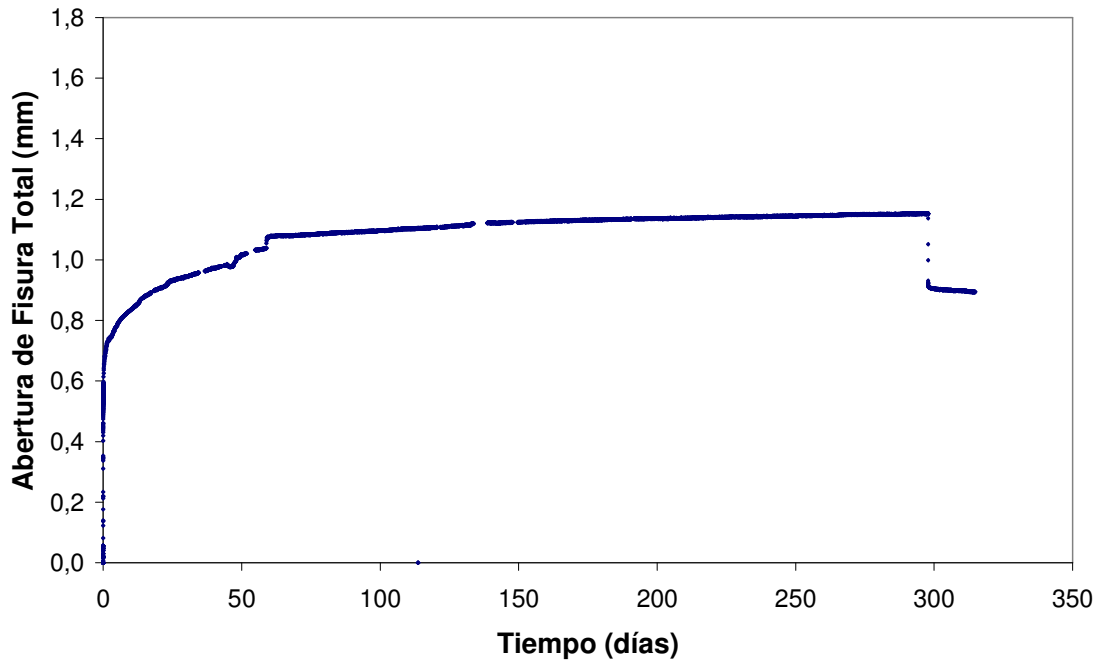


Figura A5.24b. Curva de fluencia para elemento 38, II-80/50-40-20.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	3
38	BASTIDOR	2

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-80/50-40-20
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	1

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	30/06/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	20,5
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	88,1
Fecha descarga	24/04/2010
Duración en carga (t_r)(días)	298
Fecha retiro bastidor	11/05/2010
Duración total ensayo (t_t)(días)	315
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	11/05/2010

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	23/06/2009
Fecha de prefisuración	30/06/2009
Edad de prefisuración (días)	29
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	21,0
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,02
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,505
Carga de prefisura (F_w)(kN)	23,3
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,254
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,760
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,406
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,148
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	35,2
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	2,587
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	3,83
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	6,65
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	6,55

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,506
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,585
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,646
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	1,152
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,916
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,894
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,236
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,022
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,258

ANOTACIONES:

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	A 1 - Serie 3
Fecha de fabricación	01/06/2009
Fecha de desmoldeo	02/06/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	39,0
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	25800
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	21,2
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	3,93
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	5,01
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	6,32
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	6,48
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	6,24
Abertura carga max (w_{max})(mm)	2,510
Carga máxima (F_{max})(kN)	35,7
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	27,4
F_{max} / F_f	1,69
F_w / F_f	1,30
F_{max} / F_w	1,30

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.24c. Ficha de ensayo para elemento 38, II-80/50-40-20.

ELEMENTOS II-80/50-40-20

25. Elemento 39, Serie 3, Bastidor 4, Posición 2

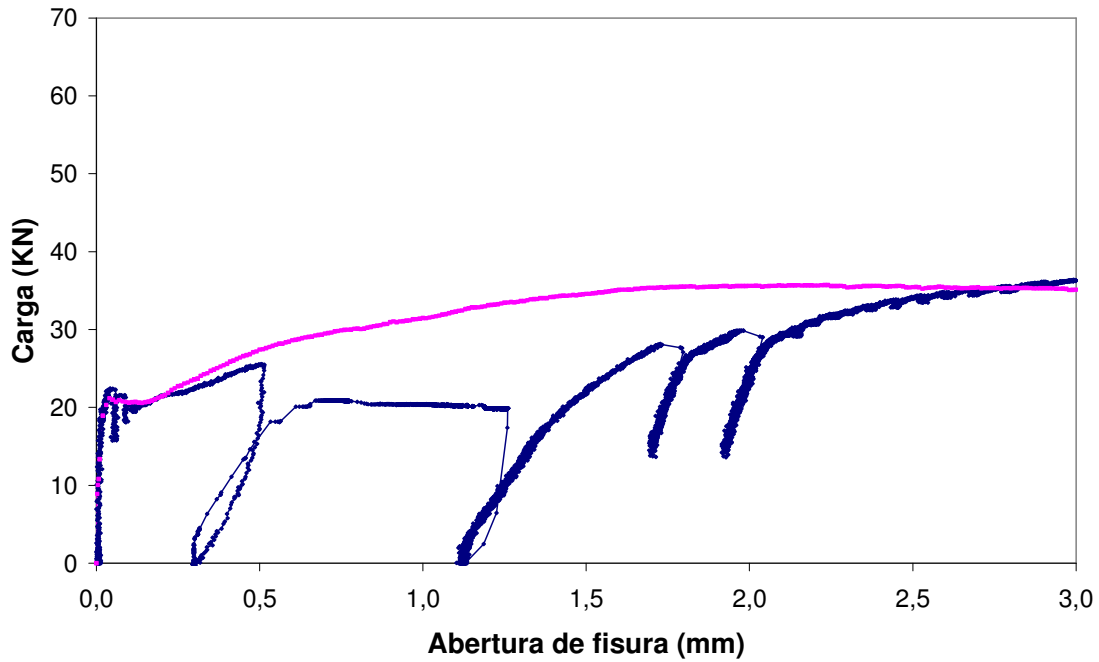


Figura A5.25a. Gráfico de ensayo para elemento 39, II-80/50-40-20.

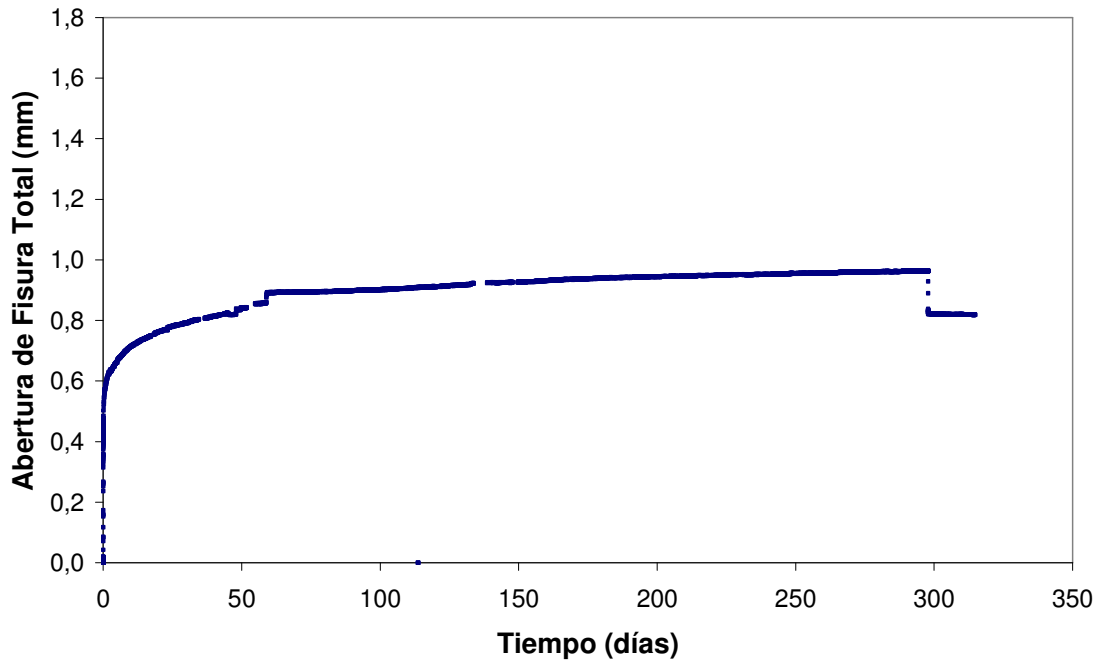


Figura A5.25b. Curva de fluencia para elemento 39, II-80/50-40-20.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	3
39	BASTIDOR	2

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-80/50-40-20
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	2

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	30/06/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	21,1
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	82,5
Fecha descarga	24/04/2010
Duración en carga (t_r)(días)	298
Fecha retiro bastidor	11/05/2010
Duración total ensayo (t_t)(días)	315
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	11/05/2010

CURVA COMPLETA (apertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	23/06/2009
Fecha de prefisuración	30/06/2009
Edad de prefisuración (días)	29
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	22,4
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,31
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,515
Carga de prefisura (F_w)(kN)	25,6
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,298
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,699
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,261
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,117
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	36,5
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	3,037
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	4,21
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	6,56
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	6,86

CURVA DE FLUENCIA (apertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,401
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,497
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,562
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,963
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,827
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,819
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,136
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,008
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,144

ANOTACIONES:

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	A 1 - Serie 3
Fecha de fabricación	01/06/2009
Fecha de desmoldeo	02/06/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	39,0
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	25800
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	21,2
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	3,93
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	5,01
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	6,32
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	6,48
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	6,24
Abertura carga max (w_{max})(mm)	2,510
Carga máxima (F_{max})(kN)	35,7
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	27,4
F_{max} / F_f	1,69
F_w / F_f	1,30
F_{max} / F_w	1,30

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.25c. Ficha de ensayo para elemento 39, II-80/50-40-20.

ELEMENTOS II-80/50-40-20

26. Elemento 40, Serie 3, Bastidor 4, Posición 3

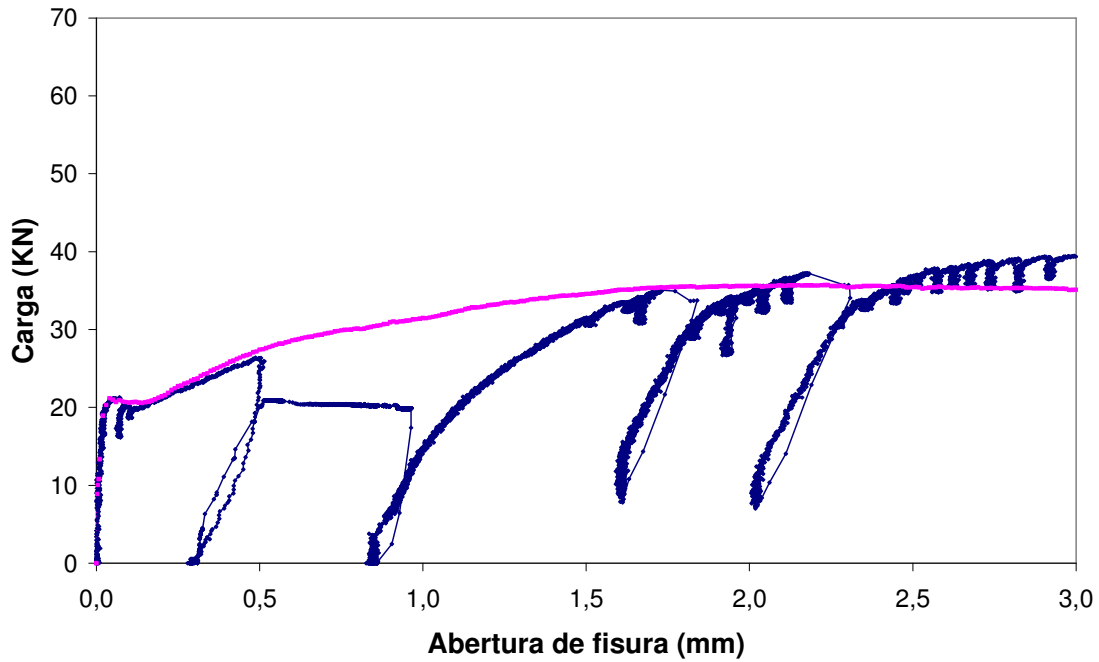


Figura A5.26a. Gráfico de ensayo para elemento 40, II-80/50-40-20.

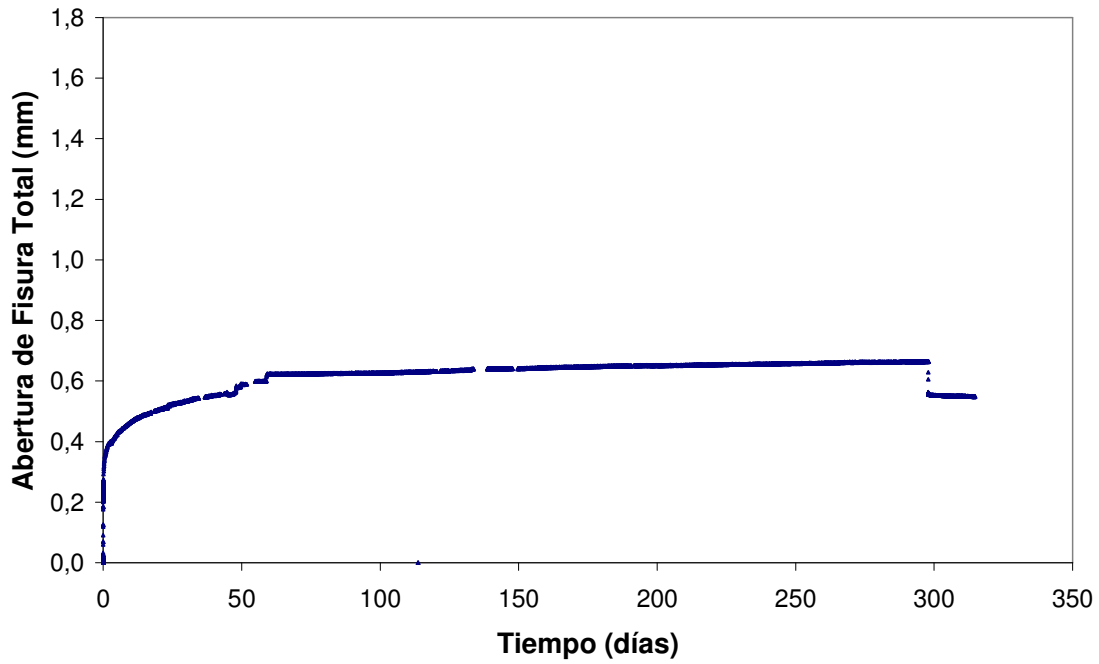


Figura A5.26b. Curva de fluencia para elemento 40, II-80/50-40-20.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	3
40	BASTIDOR	2

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-80/50-40-20
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	3

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	30/06/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	21,7
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	82,2
Fecha descarga	24/04/2010
Duración en carga (t_r)(días)	298
Fecha retiro bastidor	11/05/2010
Duración total ensayo (t_t)(días)	315
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	11/05/2010

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	23/06/2009
Fecha de prefisuración	30/06/2009
Edad de prefisuración (días)	29
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	21,0
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,03
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,515
Carga de prefisura (F_w)(kN)	26,4
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,290
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,510
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,954
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,838
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	39,6
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	3,018
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	5,91
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	6,99
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	6,81

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,220
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,406
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,444
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,664
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,559
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,548
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,105
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,011
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,116

ANOTACIONES:

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	A 1 - Serie 3
Fecha de fabricación	01/06/2009
Fecha de desmoldeo	02/06/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	39,0
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	25800
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	21,2
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	3,93
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	5,01
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	6,32
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	6,48
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	6,24
Abertura carga max (w_{max})(mm)	2,510
Carga máxima (F_{max})(kN)	35,7
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	27,4
F_{max} / F_f	1,69
F_w / F_f	1,30
F_{max} / F_w	1,30

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	0,780
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	0,318
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva general (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	0,469
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	1,268
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	1,534
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	2,003
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	1,721
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	1,679
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	0,282
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	0,042
Recuperación total (ϵ_{cut})	0,324

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.26c. Ficha de ensayo para elemento 40, II-80/50-40-20.

ELEMENTOS II-65/40-40-20

27. Elemento 10, Serie 1, Bastidor 4, Posición 1

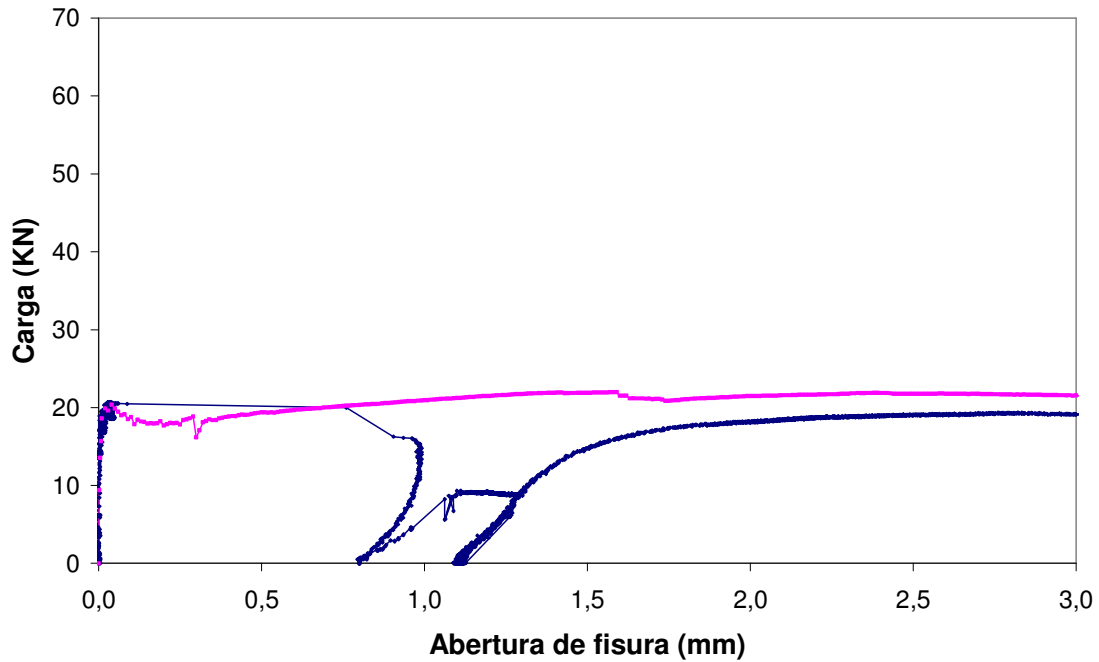


Figura A5.27a. Gráfico de ensayo para elemento 10, II-65/40-40-20.

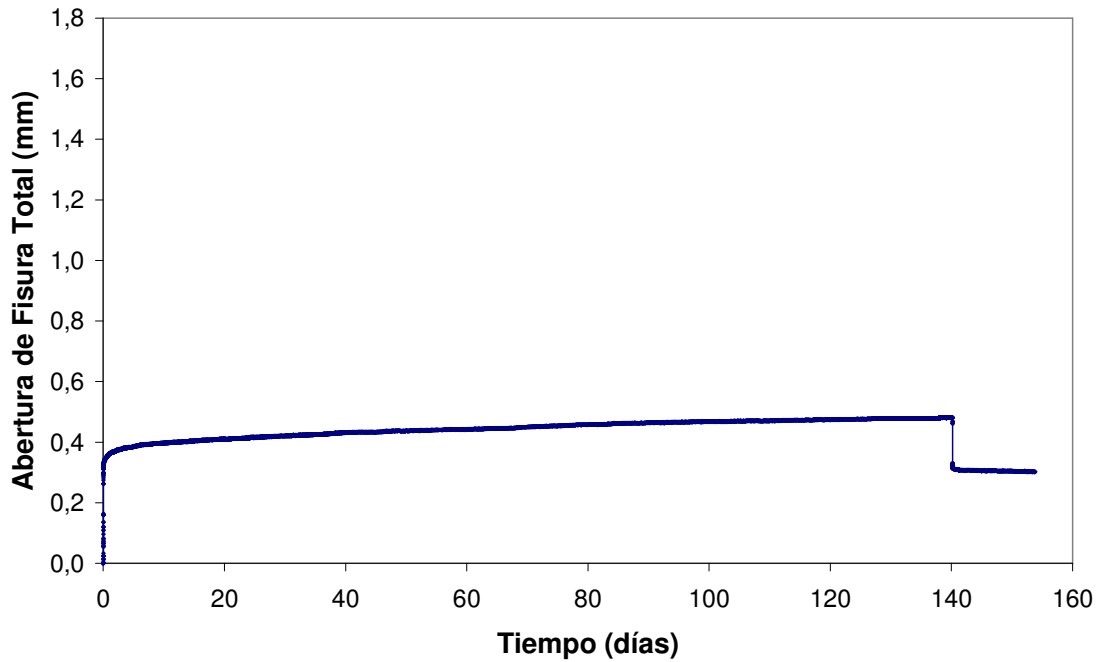


Figura A5.27b. Curva de fluencia para elemento 10, II-65/40-40-20.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	1
10	BASTIDOR	4

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-65/40-40-20
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	60
Posición en bastidor	1

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	18/09/2008
Carga aplicada (F_a)(kN)	9,0
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	56,2
Fecha descarga	05/02/2009
Duración en carga (t_r)(días)	140
Fecha retiro bastidor	19/02/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	154
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	19/02/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	11/09/2008
Fecha de prefisuración	18/09/2008
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	20,7
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	3,98
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,992
Carga de prefisura (F_w)(kN)	15,9
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,801
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	1,113
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,282
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,103
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	19,4
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	2,821
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	2,84
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	3,66
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	3,64

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,312
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,153
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,169
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,481
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,325
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,302
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,156
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,023
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,179

ANOTACIONES: la intención de abertura de prefisura de 0.5 mm no se cumple, se llega a un valor de 0.992 mm.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 1 - A 3
Fecha de fabricación	21/08/2008
Fecha de desmoldeo	22/08/2008

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	29,4
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	28250
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	20,3
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,03
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	3,72
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	3,72
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	3,79
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	3,65
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,570
Carga máxima (F_{max})(kN)	22,0
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	19,4
F_{max} / F_f	1,08
F_w / F_f	0,95
F_{max} / F_w	1,13

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.27c. Ficha de ensayo para elemento 10, II-65/40-40-20.

ELEMENTOS II-65/40-40-20

28. Elemento 11, Serie 1, Bastidor 4, Posición 2

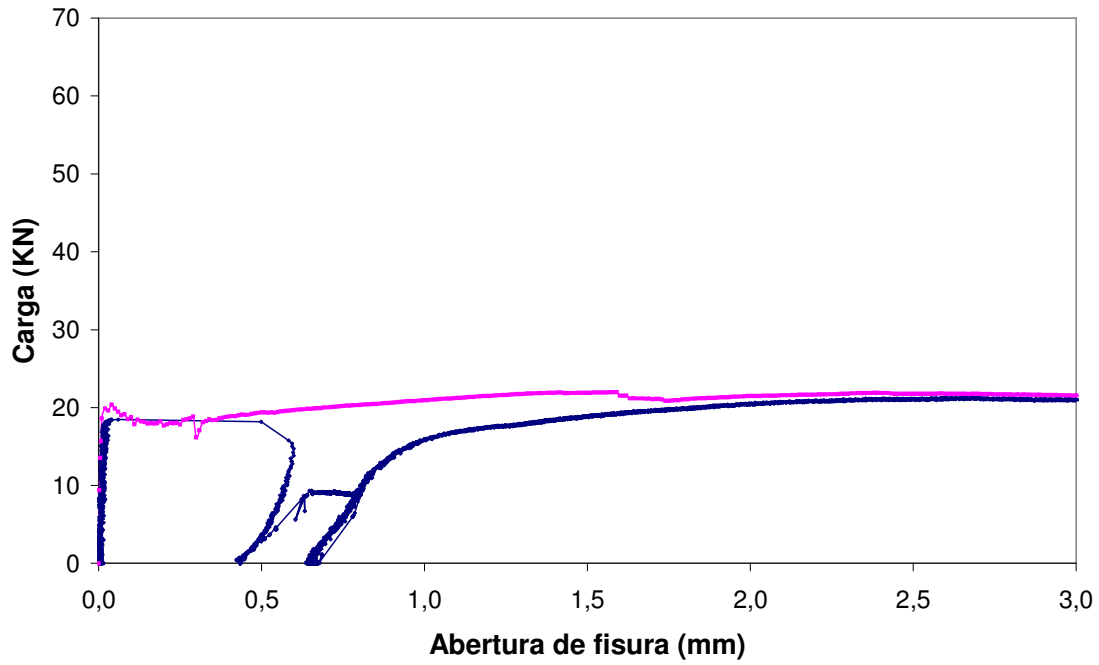


Figura A5.28a. Gráfico de ensayo para elemento 11, II-65/40-40-20.

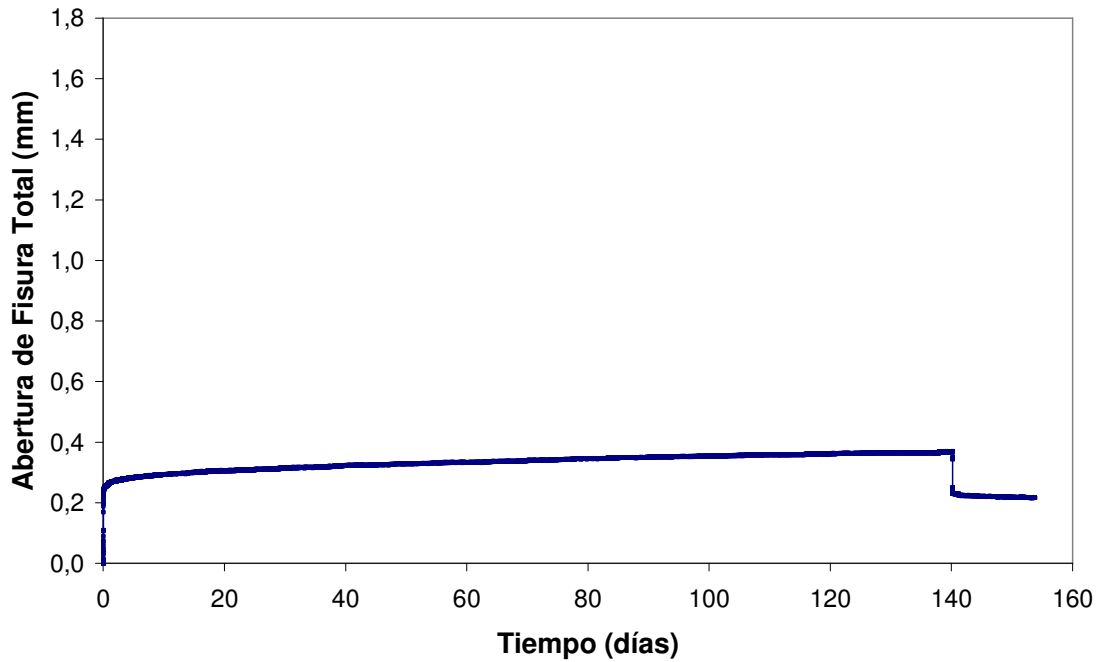


Figura A5.28b. Curva de fluencia para elemento 11, II-65/40-40-20.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	1
11	BASTIDOR	4

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-65/40-40-20
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	60
Posición en bastidor	2

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	18/09/2008
Carga aplicada (F_a)(kN)	9,5
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	60,4
Fecha descarga	05/02/2009
Duración en carga (t_r)(días)	140
Fecha retiro bastidor	19/02/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	154
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	19/02/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	11/09/2008
Fecha de prefisuración	18/09/2008
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	18,4
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	3,54
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,599
Carga de prefisura (F_w)(kN)	15,8
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,43
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,651
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,798
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,647
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	21,3
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	2,702
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	3,63
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	4,06
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	4,03

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,221
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,129
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,147
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,368
Abertura res. inicial (w_{cti})(mm)	0,241
Abertura res. final (w_{ct}^{df})(mm)	0,217
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,127
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,024
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,151

ANOTACIONES:

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 1 - A 3
Fecha de fabricación	21/08/2008
Fecha de desmoldeo	22/08/2008

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	29,4
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	28250
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	20,3
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,03
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	3,72
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	3,72
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	3,79
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	3,65
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,570
Carga máxima (F_{max})(kN)	22,0
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	19,4
F_{max} / F_f	1,08
F_w / F_f	0,95
F_{max} / F_w	1,13

CURVA COMPLETA (deformaciones)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cti})	-
Def. residual final (ϵ_{ct}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.28c. Ficha de ensayo para elemento 11, II-65/40-40-20.

ELEMENTOS II-65/40-40-20

29. Elemento 12, Serie 1, Bastidor 4, Posición 3

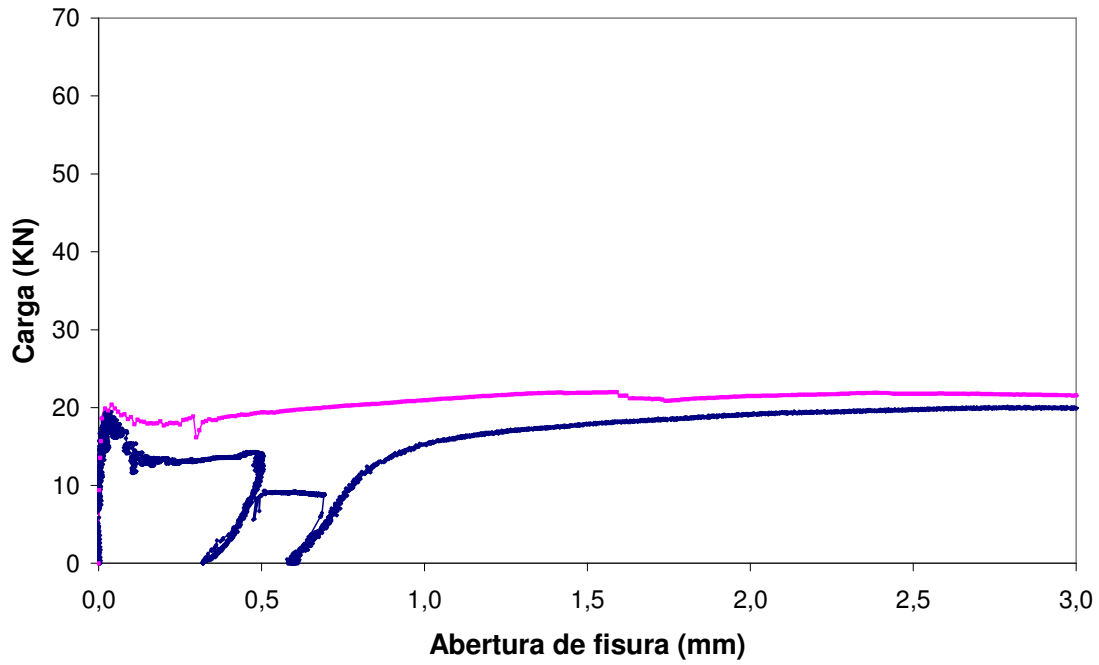


Figura A5.29a. Gráfico de ensayo para elemento 12, II-65/40-40-20.

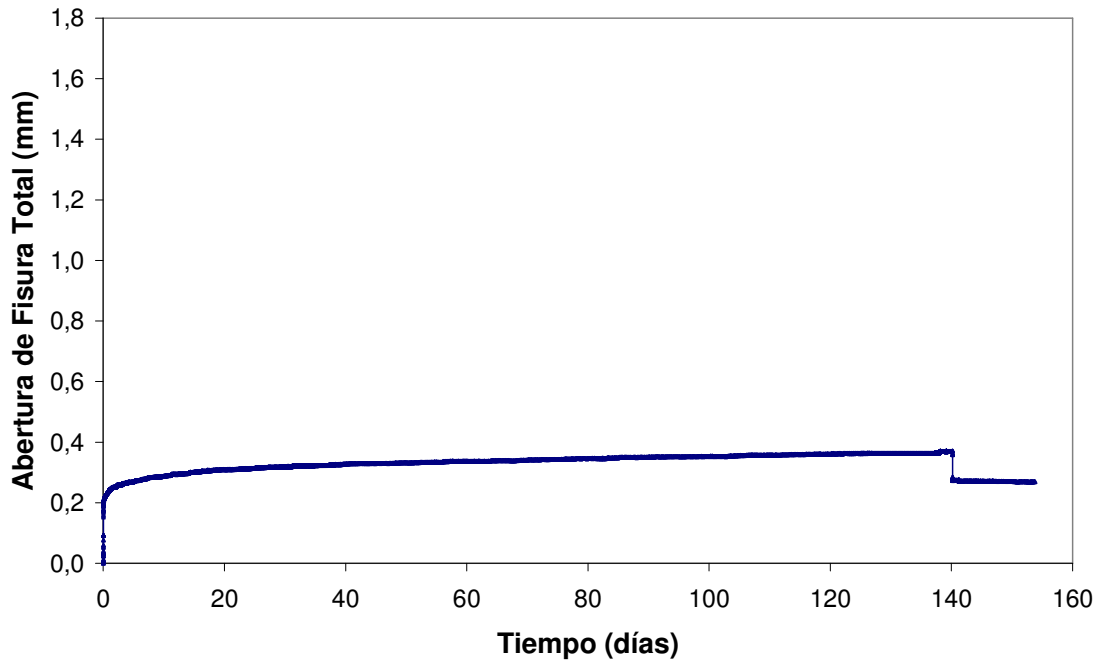


Figura A5.29b. Curva de fluencia para elemento 12, II-65/40-40-20.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	1
12	BASTIDOR	4

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-65/40-40-20
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	60
Posición en bastidor	3

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	18/09/2008
Carga aplicada (F_a)(kN)	10,1
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	70,8
Fecha descarga	05/02/2009
Duración en carga (t_r)(días)	140
Fecha retiro bastidor	19/02/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	154
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	19/02/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	11/09/2008
Fecha de prefisuración	18/09/2008
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	19,5
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	3,75
Carga de prefisura (F_w)(kN)	0,507
Carga de prefisura (F_{wp})(kN)	14,3
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,330
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,521
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,701
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,599
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	20,1
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	2,789
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	3,44
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	3,79
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	3,72

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,191
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,160
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,179
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,371
Abertura res. inicial (w_{cti})(mm)	0,281
Abertura res. final (w_{ct}^{df})(mm)	0,269
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,089
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,012
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,102

ANOTACIONES:

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 1 - A 3
Fecha de fabricación	21/08/2008
Fecha de desmoldeo	22/08/2008

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	29,4
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	28250
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	20,3
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,03
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	3,72
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	3,72
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	3,79
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	3,65
Abertura carga max (w_{max})(mm)	1,570
Carga máxima (F_{max})(kN)	22,0
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	19,4
F_{max} / F_f	1,08
F_w / F_f	0,95
F_{max} / F_w	1,13

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cti})	-
Def. residual final (ϵ_{ct}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.29c. Ficha de ensayo para elemento 12, II-65/40-40-20.

ELEMENTOS II-45/50-40-20

30. Elemento 32, Serie 2, Bastidor 5, Posición 1

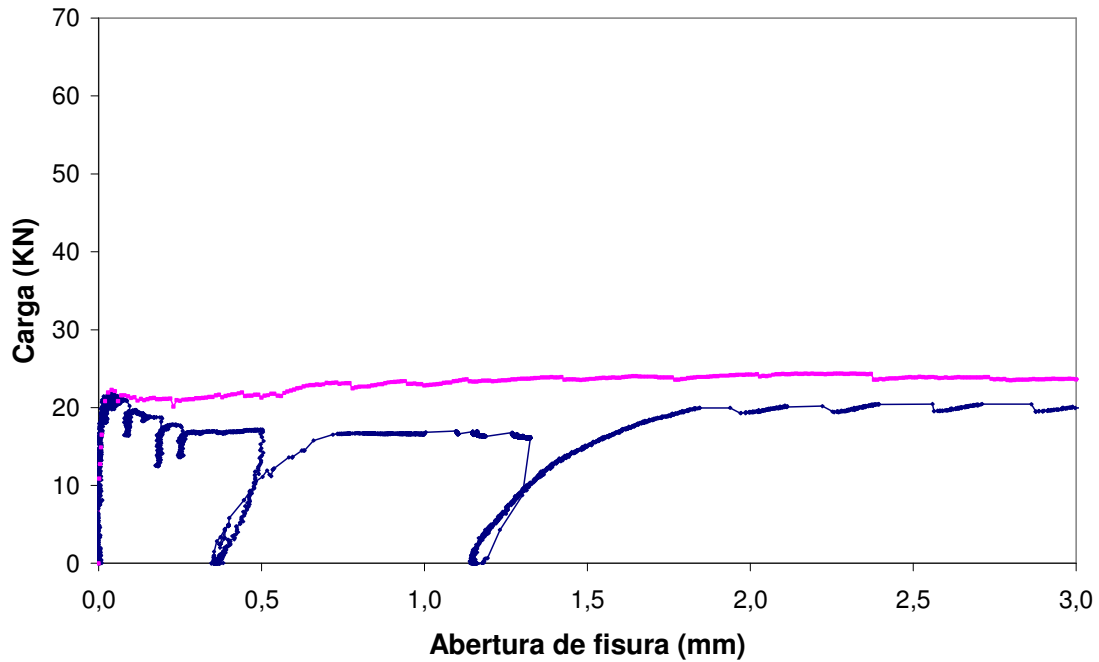


Figura A5.30a. Gráfico de ensayo para elemento 32, II-45/50-40-20.

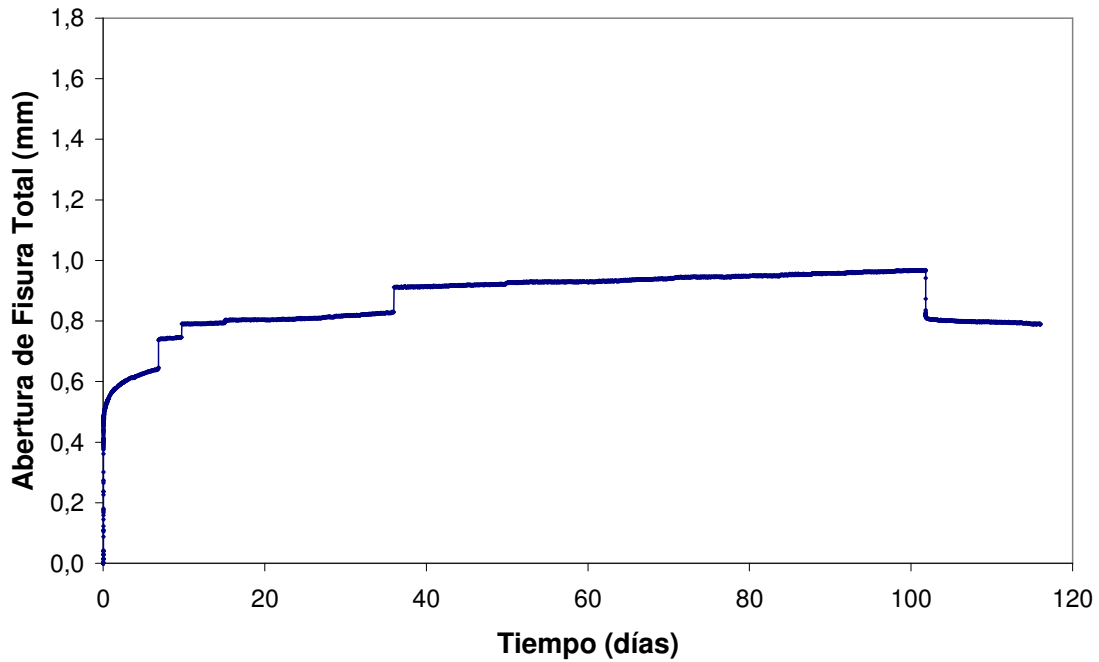


Figura A5.30b. Curva de fluencia para elemento 32, II-45/50-40-20.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	2
32	BASTIDOR	5

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-45/50-40-20
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	1

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	02/03/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	16,5
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	97,2
Fecha descarga	12/06/2009
Duración en carga (t_r)(días)	102
Fecha retiro bastidor	26/06/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	116
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	26/06/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	23/02/2009
Fecha de prefisuración	02/03/2009
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	21,8
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,07
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,507
Carga de prefisura (F_w)(kN)	17,0
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,356
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,760
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,323
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,146
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	20,5
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	2,711
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	2,94
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	3,81
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	3,65

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,404
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,553
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,563
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,967
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,819
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,790
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,148
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,029
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,177

ANOTACIONES: se incrementos súbitos en los valores de apertura de fisura en la curva de fluencia, que pueden ser debidos a fenómenos (accidentales) al ensayo (en serie 3, bastidor 1 se realiza un ensayo de corroboración). La galga se empleó en la probeta en la posición 3 (probeta 34).

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 2 - A 1
Fecha de fabricación	02/02/2009
Fecha de desmoldeo	03/02/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	39,1
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	26750
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	22,3
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,27
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	4,09
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	4,53
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	4,58
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	4,49
Abertura carga max (w_{max})(mm)	2,270
Carga máxima (F_{max})(kN)	24,4
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	21,3
F_{max} / F_f	1,09
F_w / F_f	0,96
F_{max} / F_w	1,14

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.30c. Ficha de ensayo para elemento 32, II-45/50-40-20.

ELEMENTOS II-45/50-40-20

31. Elemento 33, Serie 2, Bastidor 5, Posición 2

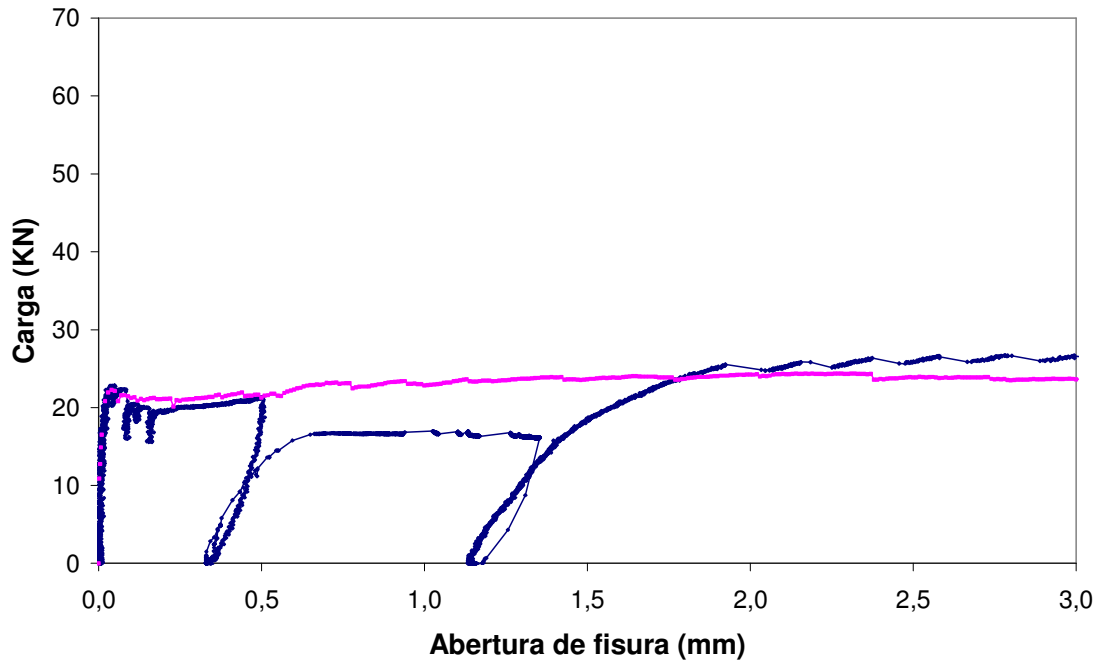


Figura A5.31a. Gráfico de ensayo para elemento 33, II-45/50-40-20.

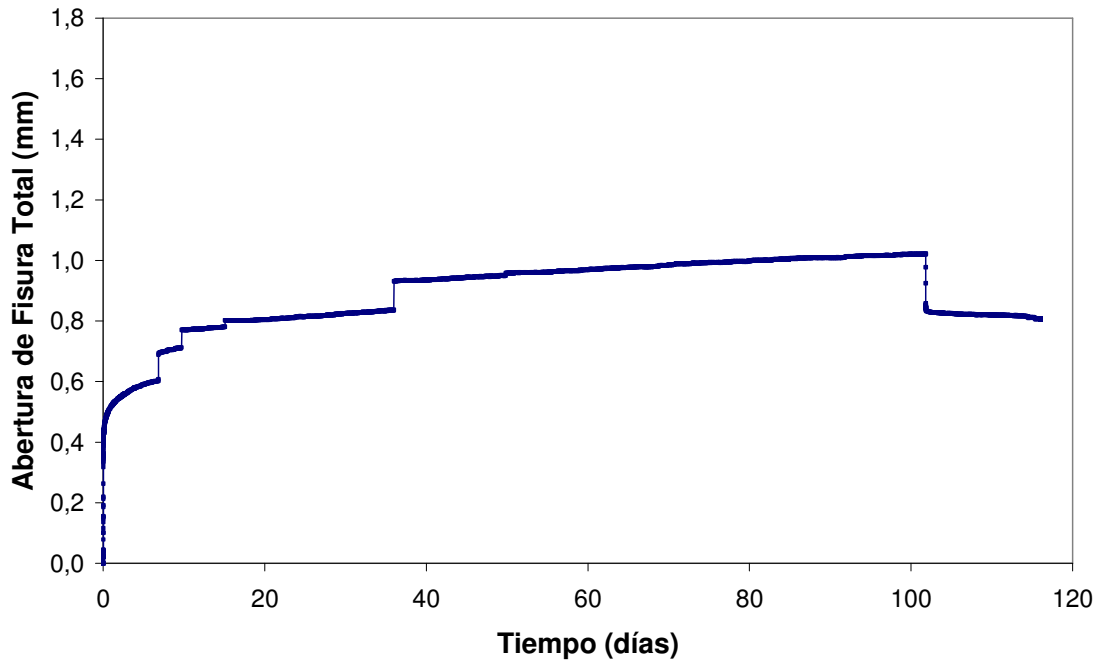


Figura A5.31b. Curva de fluencia para elemento 33, II-45/50-40-20.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	2
33	BASTIDOR	5

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-45/50-40-20
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	2

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	02/03/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	17,1
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	80,2
Fecha descarga	12/06/2009
Duración en carga (t_r)(días)	102
Fecha retiro bastidor	26/06/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	116
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	26/06/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	23/02/2009
Fecha de prefisuración	02/03/2009
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	22,8
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,23
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,510
Carga de prefisura (F_w)(kN)	21,3
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,356
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,713
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,377
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,163
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	27,0
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	3,254
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	3,46
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	4,80
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	4,88

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,357
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,652
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,664
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	1,021
Abertura res. inicial (w_{cti})(mm)	0,844
Abertura res. final (w_{ctf}^{df})(mm)	0,807
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,177
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,037
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,214

ANOTACIONES: se incrementos súbitos en los valores de abertura de fisura en la curva de fluencia, que pueden ser debidos a fenómenos (accidentales) al ensayo (en serie 3, bastidor 1 se realiza un ensayo de corroboración). La galga se empleó en la probeta en la posición 3 (probeta 34).

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 2 - A 1
Fecha de fabricación	02/02/2009
Fecha de desmoldeo	03/02/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	39,1
Módulo deformación (E_{cs})(Mpa)	26750
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	22,3
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,27
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	4,09
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	4,53
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	4,58
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	4,49
Abertura carga max (w_{max})(mm)	2,270
Carga máxima (F_{max})(kN)	24,4
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	21,3
F_{max} / F_f	1,09
F_w / F_f	0,96
F_{max} / F_w	1,14

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva general (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cti})	-
Def. residual final (ϵ_{ctf}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.31c. Ficha de ensayo para elemento 33, II-45/50-40-20.

ELEMENTOS II-45/50-40-20

32. Elemento 34, Serie 2, Bastidor 5, Posición 3

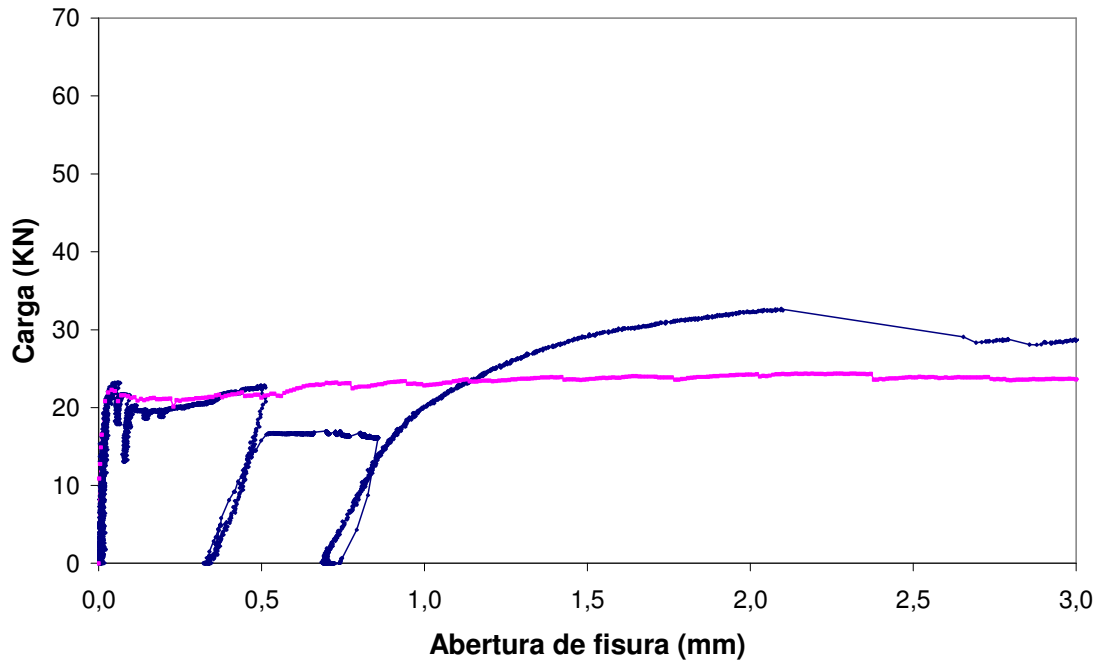


Figura A5.32a. Gráfico de ensayo para elemento 34, II-45/50-40-20.

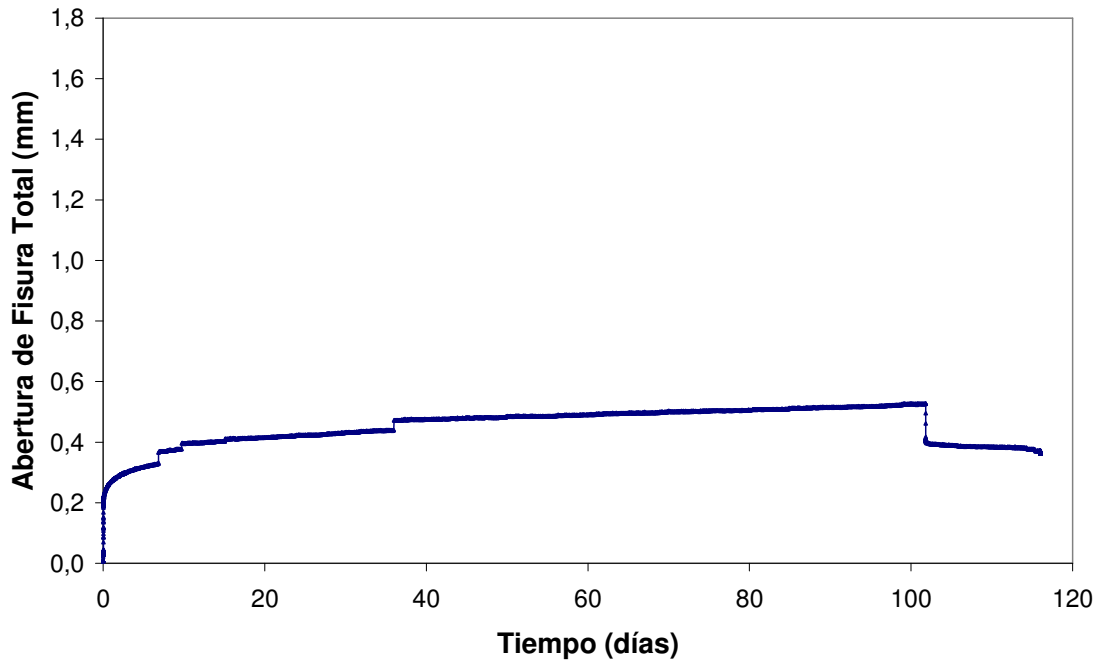


Figura A5.32b. Curva de fluencia para elemento 34, II-45/50-40-20.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	2
34	BASTIDOR	5

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-45/50-40-20
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	3

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	02/03/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	17,7
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	78,3
Fecha descarga	12/06/2009
Duración en carga (t_r)(días)	102
Fecha retiro bastidor	26/06/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	116
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	26/06/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	23/02/2009
Fecha de prefisuración	02/03/2009
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	23,2
Resist. primera fisura (f_{cf1})(MPa)	4,30
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,513
Carga de prefisura (F_w)(kN)	22,6
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,332
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,527
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,859
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,696
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	32,7
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	2,095
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	5,41
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	5,57
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,19

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,195
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,320
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,332
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,527
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,407
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,364
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,120
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,043
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,163

ANOTACIONES: se incrementos súbitos en los valores de abertura de fisura en la curva de fluencia, que pueden ser debidos a fenómenos (accidentales) al ensayo (en serie 3, bastidor 1 se realiza un ensayo de corroboración). La galga se empleó en la probeta en la posición 3 (probeta 34).

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 2 - A 1
Fecha de fabricación	02/02/2009
Fecha de desmoldeo	03/02/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	39,1
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	26750
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	22,3
Resist. primera fisura (f_{cf})(MPa)	4,27
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	4,09
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	4,53
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	4,58
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	4,49
Abertura carga max (w_{max})(mm)	2,270
Carga máxima (F_{max})(kN)	24,4
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	21,3
F_{max} / F_f	1,09
F_w / F_f	0,96
F_{max} / F_w	1,14

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	0,363
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	1,082
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	1,109
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	1,473
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	1,248
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	1,191
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	0,224
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	0,057
Recuperación total (ϵ_{cut})	0,282

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.32c. Ficha de ensayo para elemento 34, II-45/50-40-20.

ELEMENTOS II-45/50-40-20

33. Elemento 35, Serie 3, Bastidor 1, Posición 1

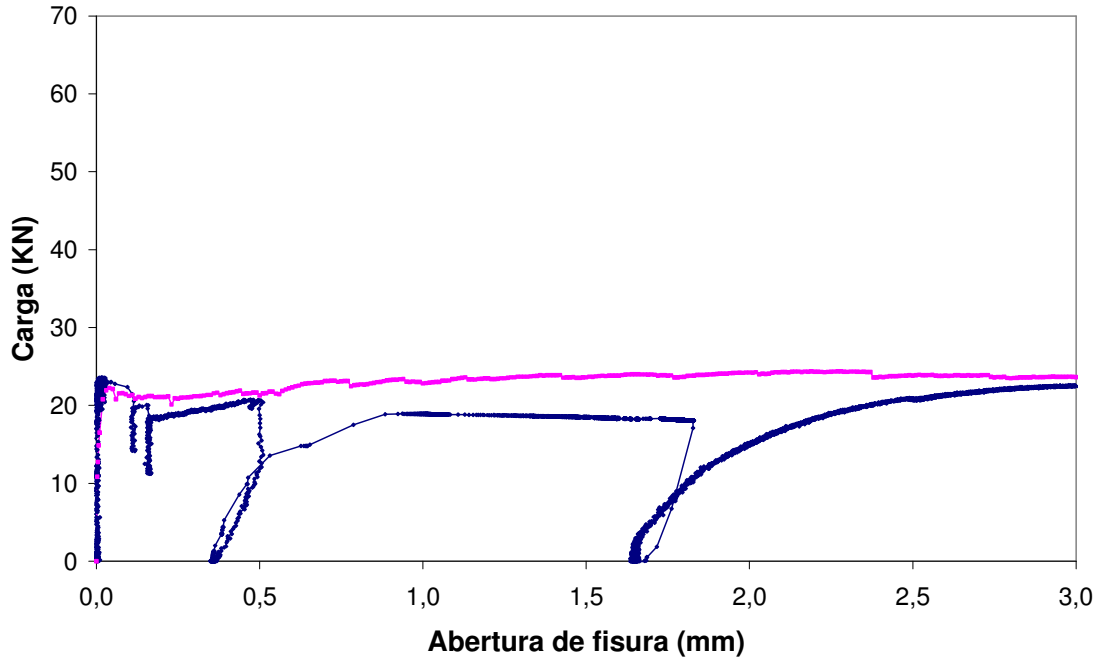


Figura A5.33a. Gráfico de ensayo para elemento 35, II-45/50-40-20.

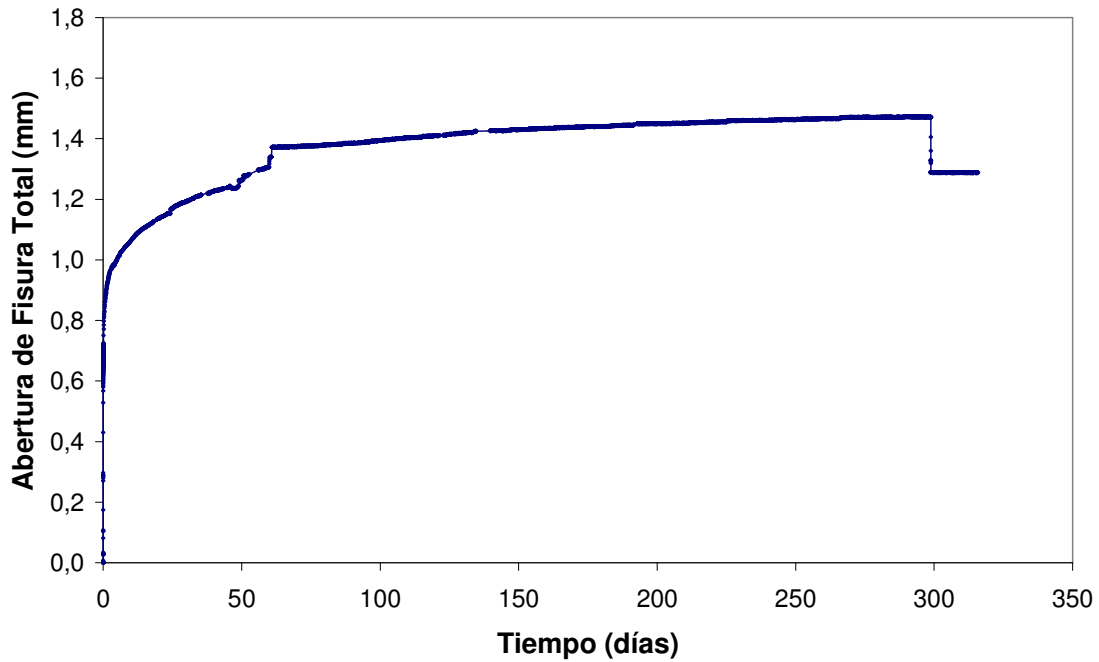


Figura A5.33b. Curva de fluencia para elemento 35, II-45/50-40-20.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	3
35	BASTIDOR	1

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-45/50-40-20
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	1

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	29/06/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	18,7
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	90,9
Fecha descarga	24/04/2010
Duración en carga (t_r)(días)	299
Fecha retiro bastidor	11/05/2010
Duración total ensayo (t_t)(días)	316
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	11/05/2010

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	22/06/2009
Fecha de prefisuración	29/06/2009
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	23,6
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,53
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,511
Carga de prefisura (F_w)(kN)	20,5
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,357
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,972
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,828
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,645
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	22,2
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	4,000
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	-
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	3,99
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	4,23

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,615
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,770
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,856
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	1,471
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	1,289
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	1,288
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,182
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,001
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,183

ANOTACIONES:

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	A 1 - Serie 3
Fecha de fabricación	01/06/2009
Fecha de desmoldeo	02/06/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	39,1
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	26750
Carga a primera fisura (F_{f1})(kN)	22,3
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,27
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	4,09
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	4,53
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	4,58
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	4,49
Abertura carga max (w_{max})(mm)	2,270
Carga máxima (F_{max})(kN)	24,4
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	21,3
F_{max} / F_f	1,09
F_w / F_f	0,96
F_{max} / F_w	1,14

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.33c. Ficha de ensayo para elemento 35, II-45/50-40-20.

ELEMENTOS II-45/50-40-20

34. Elemento 36, Serie 3, Bastidor 1, Posición 2

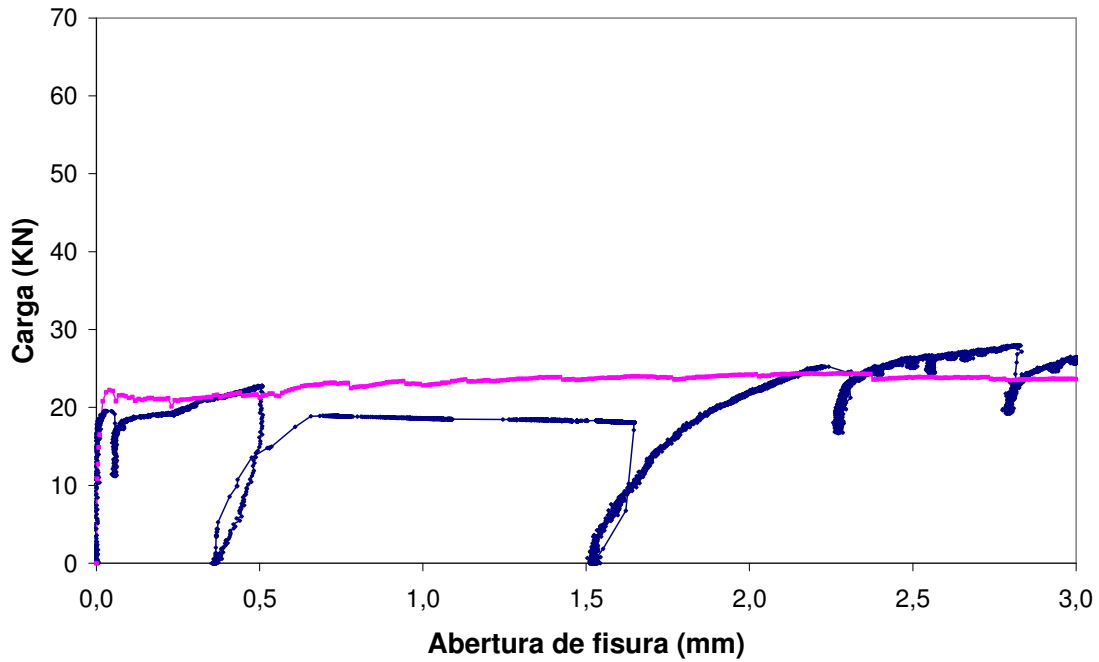


Figura A5.34a. Gráfico de ensayo para elemento 36, II-45/50-40-20.

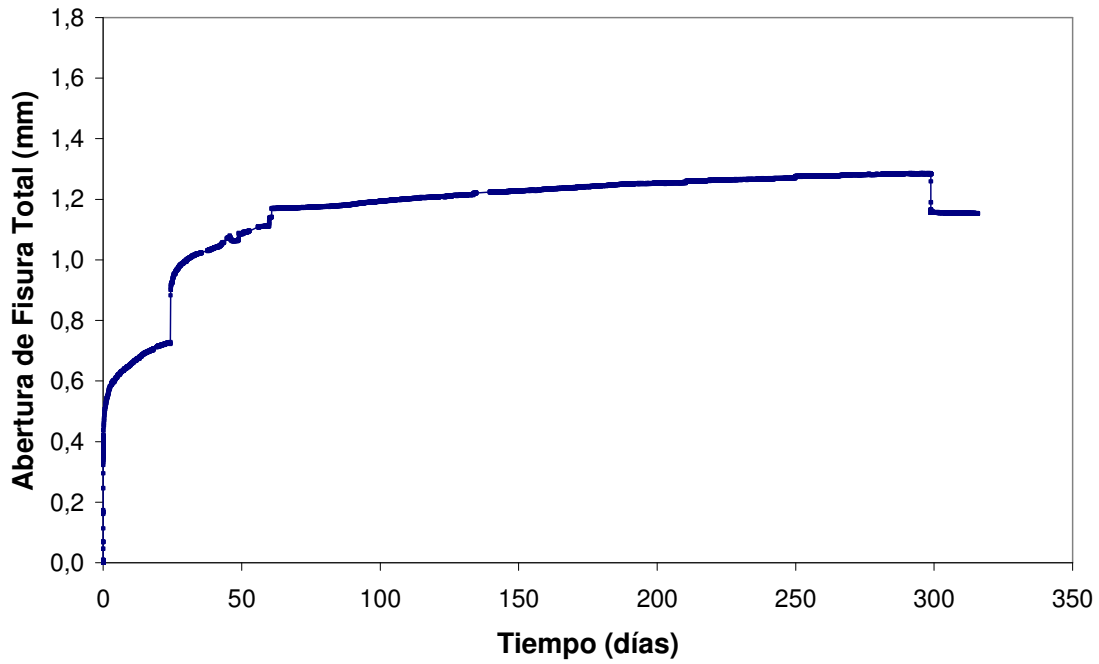


Figura A5.34b. Curva de fluencia para elemento 36, II-45/50-40-20.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	3
36	BASTIDOR	1

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-45/50-40-20
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	2

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	29/06/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	19,2
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	84,4
Fecha descarga	24/04/2010
Duración en carga (t_r)(días)	299
Fecha retiro bastidor	11/05/2010
Duración total ensayo (t_t)(días)	316
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	11/05/2010

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	22/06/2009
Fecha de prefisuración	29/06/2009
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	19,6
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	3,76
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,511
Carga de prefisura (F_w)(kN)	22,8
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,361
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,714
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,645
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,514
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	29,0
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	4,000
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	-
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	5,01
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,41

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,353
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,830
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,931
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	1,284
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	1,157
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	1,153
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,127
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,004
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,131

ANOTACIONES: aumento súbito y posterior estabilización en la velocidad de apertura de fisura a los 24 días.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	A 1 - Serie 3
Fecha de fabricación	01/06/2009
Fecha de desmoldeo	02/06/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	39,1
Módulo deformación (E_{cs})(Mpa)	26750
Carga a primera fisura (F_{f1})(kN)	22,3
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,27
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	4,09
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	4,53
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	4,58
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	4,49
Abertura carga max (w_{max})(mm)	2,270
Carga máxima (F_{max})(kN)	24,4
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	21,3
F_{max} / F_f	1,09
F_w / F_f	0,96
F_{max} / F_w	1,14

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.34c. Ficha de ensayo para elemento 36, II-45/50-40-20.

ELEMENTOS II-45/50-40-20

35. Elemento 37, Serie 3, Bastidor 1, Posición 3

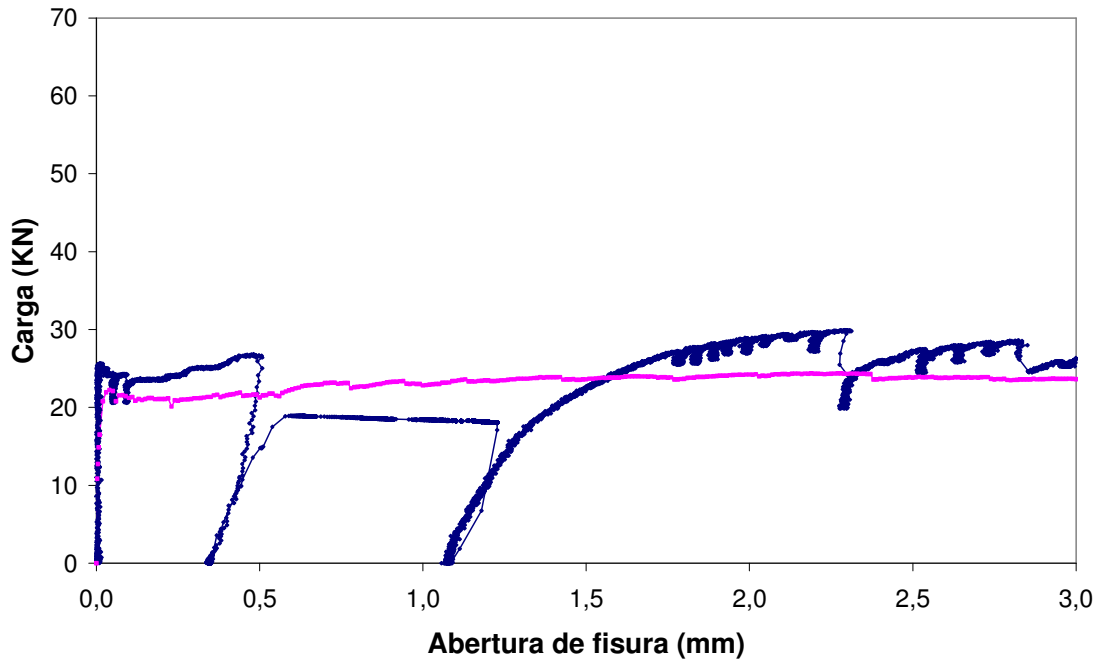


Figura A5.35a. Gráfico de ensayo para elemento 37, II-45/50-40-20.

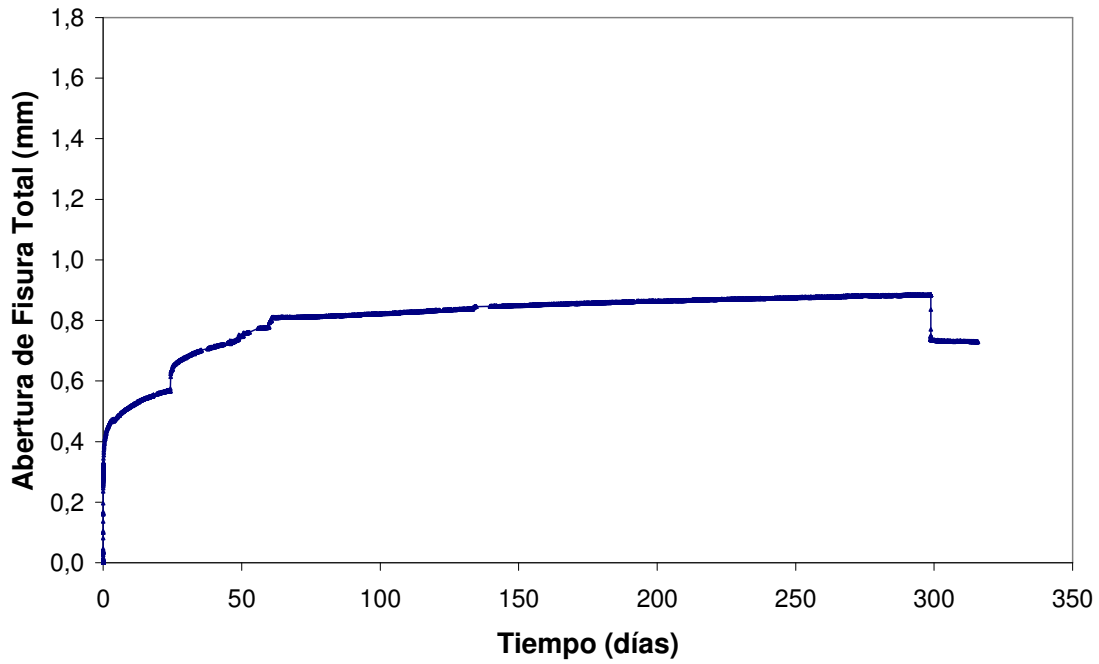


Figura A5.35b. Curva de fluencia para elemento 37, II-45/50-40-20.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	3
37	BASTIDOR	1

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-45/50-40-20
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	3

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	29/06/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	19,8
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	75,1
Fecha descarga	24/04/2010
Duración en carga (t_r)(días)	299
Fecha retiro bastidor	11/05/2010
Duración total ensayo (t_t)(días)	316
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	11/05/2010

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	22/06/2009
Fecha de prefisuración	29/06/2009
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	25,7
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,93
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,508
Carga de prefisura (F_w)(kN)	26,4
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,342
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,610
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,226
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,071
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	29,9
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	2,293
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	4,35
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	5,23
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	5,37

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,268
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,550
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,616
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,884
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,738
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,729
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,146
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,009
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,155

ANOTACIONES: aumento súbito y posterior estabilización en la velocidad de apertura de fisura a los 24 días.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	A 1 - Serie 3
Fecha de fabricación	01/06/2009
Fecha de desmoldeo	02/06/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	39,1
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	26750
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	22,3
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,27
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	4,09
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	4,53
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	4,58
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	4,49
Abertura carga max (w_{max})(mm)	2,270
Carga máxima (F_{max})(kN)	24,4
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	21,3
F_{max} / F_f	1,09
F_w / F_f	0,96
F_{max} / F_w	1,14

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	0,436
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	1,107
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	1,317
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	1,753
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	1,513
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	1,474
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	0,240
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	0,039
Recuperación total (ϵ_{cut})	0,279

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.35c. Ficha de ensayo para elemento 37, II-45/50-40-20.

ELEMENTOS II-50/30-40-10

36. Elemento 13, Serie 1, Bastidor 5, Posición 1

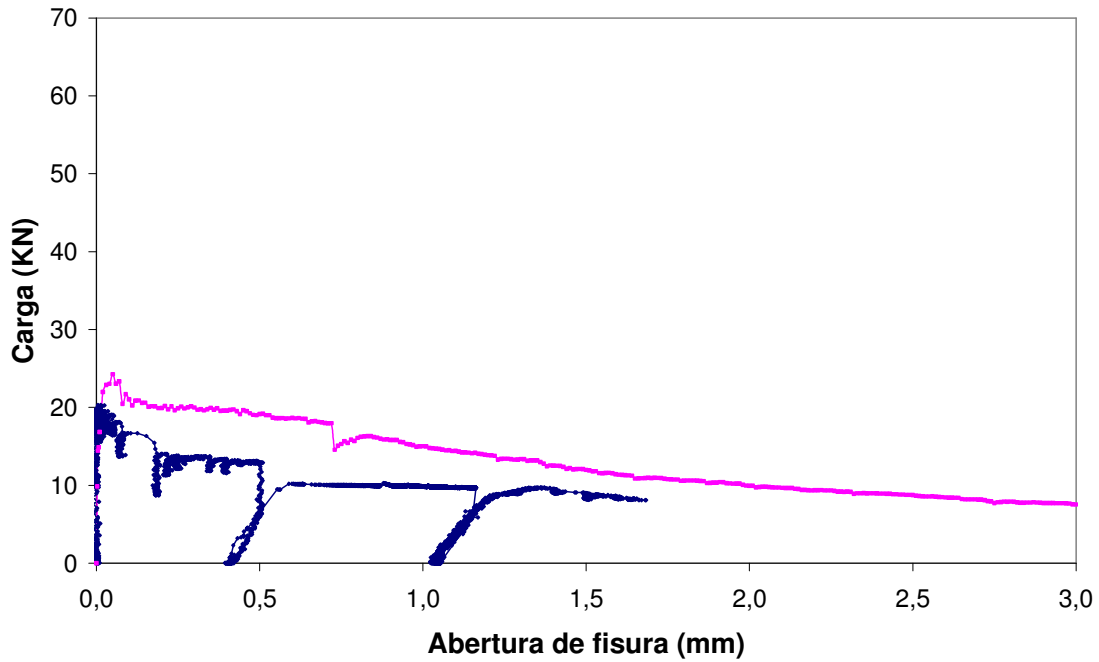


Figura A5.36a. Gráfico de ensayo para elemento 13, II-50/30-40-10.

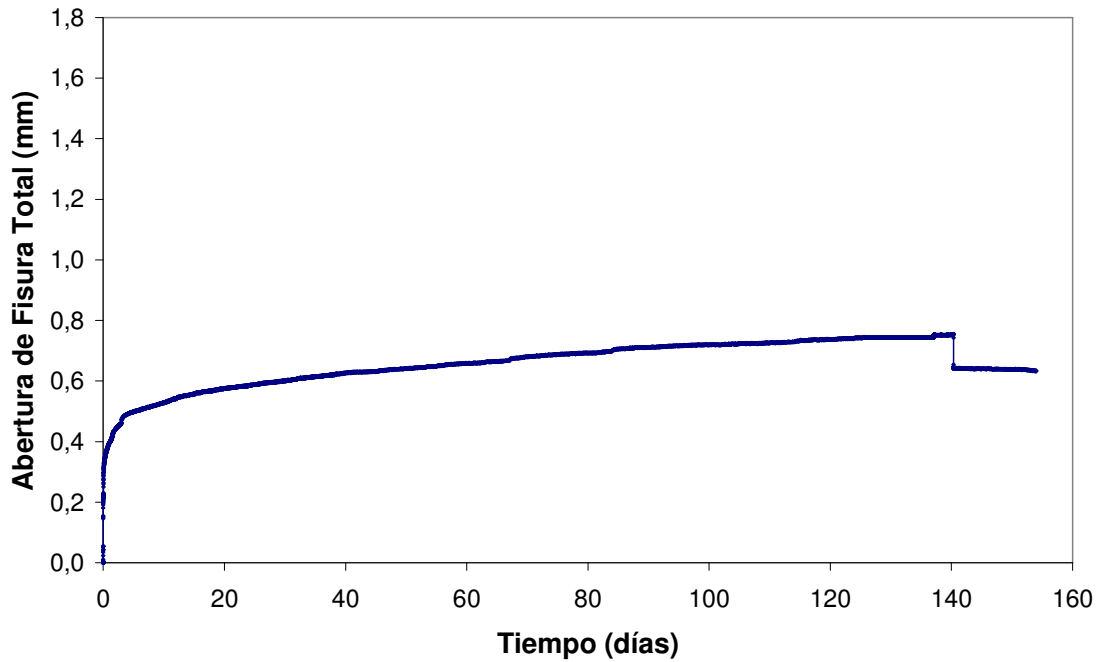


Figura A5.36b. Curva de fluencia para elemento 13, II-50/30-40-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	1
13	BASTIDOR	5

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-50/30-40-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	60
Posición en bastidor	1

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	19/09/2008
Carga aplicada (F_a)(kN)	9,8
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	76,3
Fecha descarga	06/02/2009
Duración en carga (t_r)(días)	140
Fecha retiro bastidor	20/02/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	154
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	20/02/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	12/09/2008
Fecha de prefisuración	19/09/2008
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	20,3
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	3,90
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,510
Carga de prefisura (F_w)(kN)	12,9
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,402
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,614
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,156
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,036
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	9,8
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	1,360
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	1,73
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	-
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	-

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,212
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,499
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,542
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,754
Abertura res. inicial (w_{cti})(mm)	0,643
Abertura res. final (w_{ct}^{df})(mm)	0,634
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,111
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,009
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,120

ANOTACIONES:

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 1 - A 3
Fecha de fabricación	22/08/2008
Fecha de desmoldeo	23/08/2008

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	41,3
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	28000
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	24,2
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,68
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	3,69
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	2,29
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	1,63
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	1,28
Abertura carga max (w_{max})(mm)	0,050
Carga máxima (F_{max})(kN)	24,2
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	19,3
F_{max} / F_f	1,00
F_w / F_f	0,80
F_{max} / F_w	1,25

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva general (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cti})	-
Def. residual final (ϵ_{ct}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.36c. Ficha de ensayo para elemento 13, II-50/30-40-10.

ELEMENTOS II-50/30-40-10

37. Elemento 14, Serie 1, Bastidor 5, Posición 2

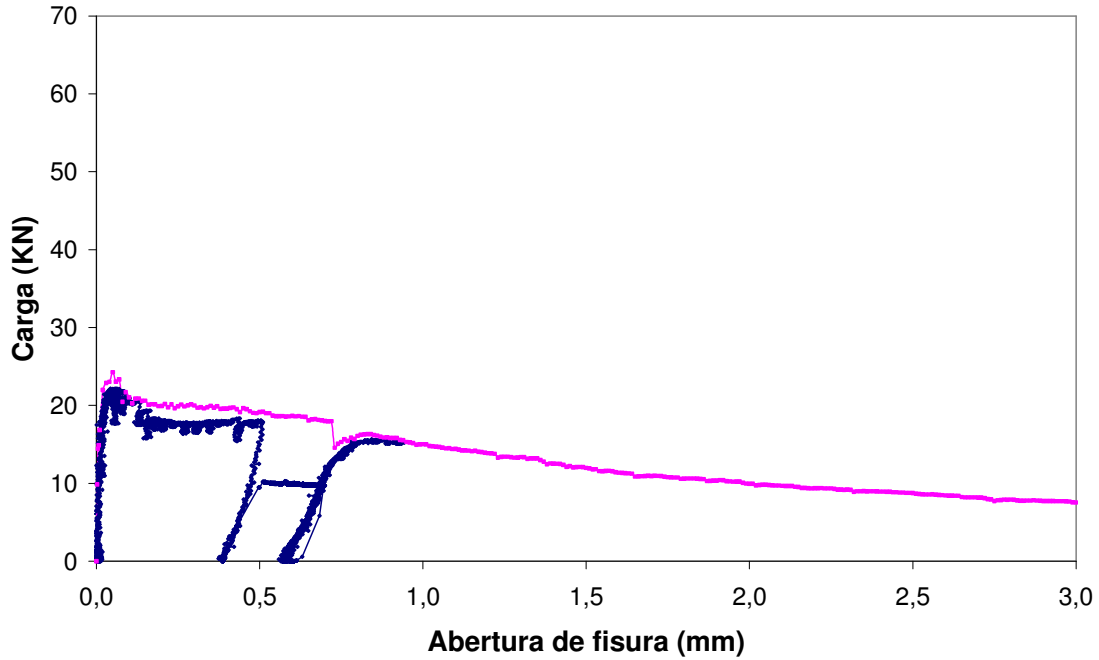


Figura A5.37a. Gráfico de ensayo para elemento 14, II-50/30-40-10.

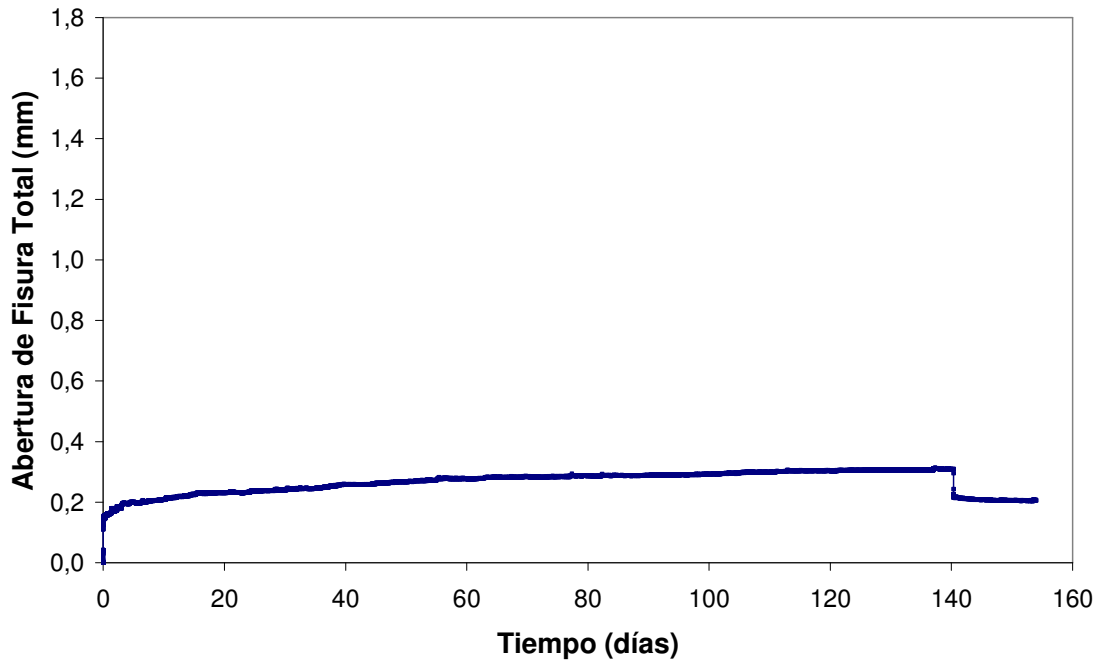


Figura A5.37b. Curva de fluencia para elemento 14, II-50/30-40-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	1
14	BASTIDOR	5

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-50/30-40-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	60
Posición en bastidor	2

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	19/09/2008
Carga aplicada (F_a)(kN)	10,4
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	57,7
Fecha descarga	06/02/2009
Duración en carga (t_r)(días)	140
Fecha retiro bastidor	20/02/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	154
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	20/02/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	12/09/2008
Fecha de prefisuración	19/09/2008
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	22,1
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,25
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,510
Carga de prefisura (F_w)(kN)	18,1
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,383
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,510
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,692
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,574
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	15,6
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	0,843
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	-
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	-
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	-

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,127
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,162
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,182
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,309
Abertura res. inicial (w_{cti})(mm)	0,223
Abertura res. final (w_{ct}^{df})(mm)	0,191
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,086
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,032
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,118

ANOTACIONES:

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 1 - A 3
Fecha de fabricación	22/08/2008
Fecha de desmoldeo	23/08/2008

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	41,3
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	28000
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	24,2
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,68
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	3,69
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	2,29
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	1,63
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	1,28
Abertura carga max (w_{max})(mm)	0,050
Carga máxima (F_{max})(kN)	24,2
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	19,3
F_{max} / F_f	1,00
F_w / F_f	0,80
F_{max} / F_w	1,25

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cti})	-
Def. residual final (ϵ_{ct}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.37c. Ficha de ensayo para elemento 14, II-50/30-40-10.

ELEMENTOS II-50/30-40-10

38. Elemento 15, Serie 1, Bastidor 5, Posición 3

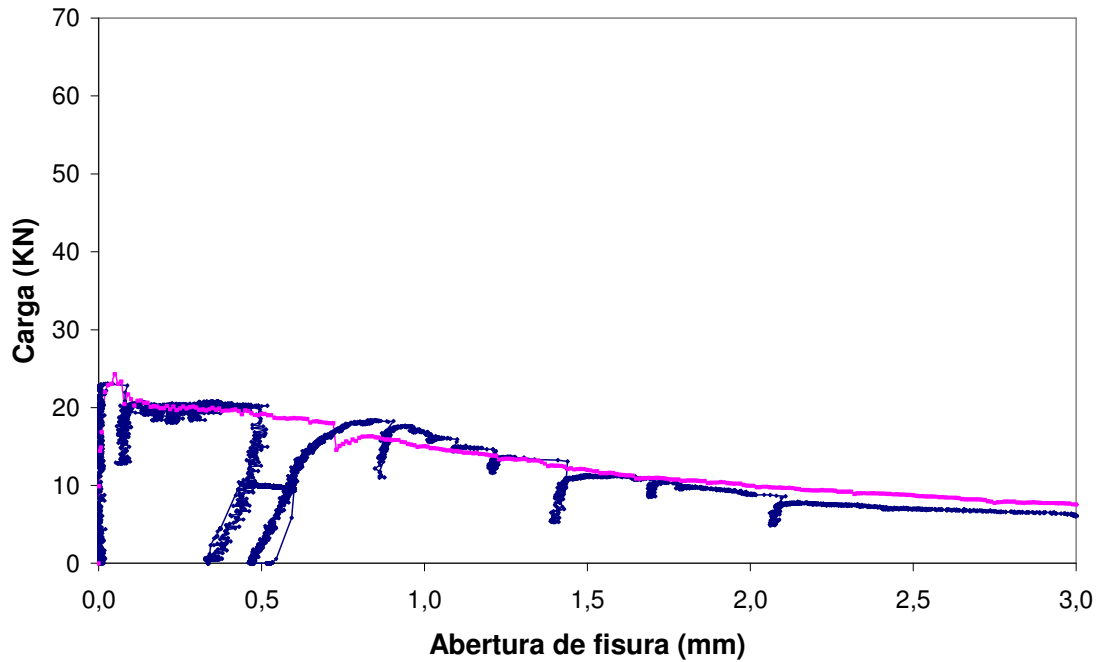


Figura A5.38a. Gráfico de ensayo para elemento 15, II-50/30-40-10.

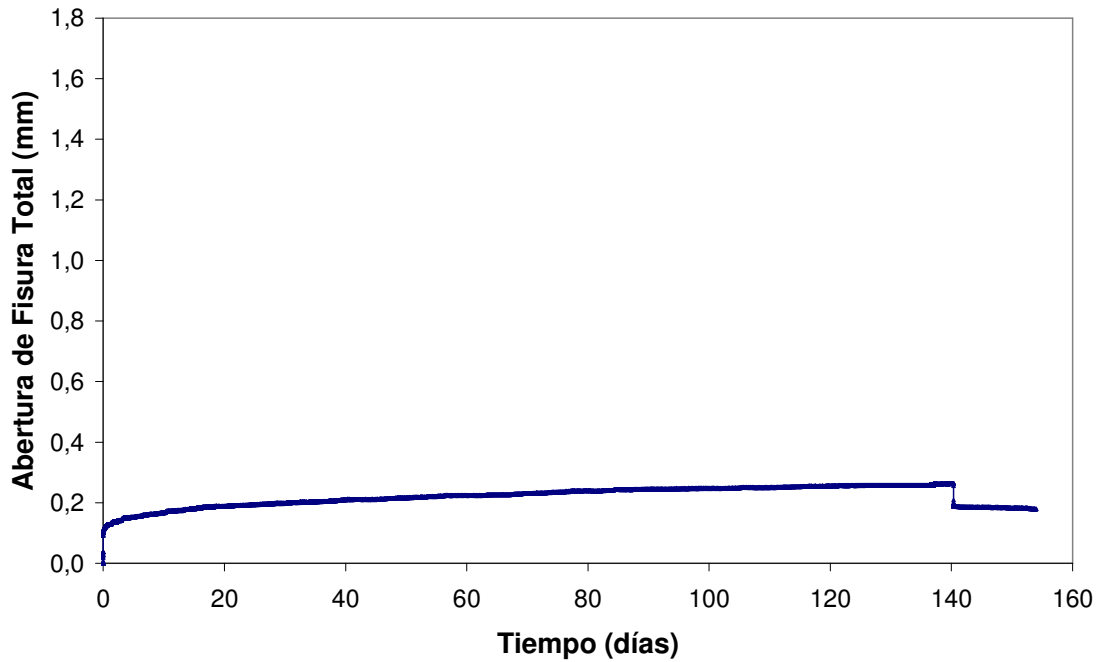


Figura A5.38b. Curva de fluencia para elemento 15, II-50/30-40-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	1
15	BASTIDOR	5

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-50/30-40-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	60
Posición en bastidor	3

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	19/09/2008
Carga aplicada (F_a)(kN)	11,0
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	54,4
Fecha descarga	06/02/2009
Duración en carga (t_r)(días)	140
Fecha retiro bastidor	20/02/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	154
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	20/02/2009

CURVA COMPLETA (apertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	12/09/2008
Fecha de prefisuración	19/09/2008
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_L)(kN)	23,1
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,44
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,518
Carga de prefisura (F_w)(kN)	20,2
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,346
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,448
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,609
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,526
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura ($F_{p,max}$)(kN)	18,4
Abertura carga max ($w_{p,max}$)(mm)	0,849
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(MPa)	2,15
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(MPa)	1,34
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(MPa)	1,03

CURVA DE FLUENCIA (apertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,102
Abertura dif. 90 días (w_{ci}^{90})(mm)	0,143
Abertura dif. final (w_{ci}^{df})(mm)	0,161
Abertura total final (w_{ci}^{tf})(mm)	0,263
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,195
Abertura res. final (w_{cr}^{tf})(mm)	0,18
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,068
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,015
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,083

ANOTACIONES:

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 1 - A 3
Fecha de fabricación	22/08/2008
Fecha de desmoldeo	23/08/2008

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(MPa)	41,3
Módulo deformación (E_{28})(MPa)	28000
Carga a primera fisura (F_L)(kN)	24,2
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	4,68
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(MPa)	3,69
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(MPa)	2,29
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(MPa)	1,63
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(MPa)	1,28
Abertura carga max (w_{max})(mm)	0,050
Carga máxima (F_{max})(kN)	24,2
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	19,3
F_{max} / F_L	1,00
F_w / F_L	0,80
F_{max} / F_w	1,25

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max ($\epsilon_{p,max}$)	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{ci}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{ci}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ci}^{tf})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{tf})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.38c. Ficha de ensayo para elemento 15, II-50/30-40-10.

ELEMENTOS II-50/30-40-10

39. Elemento 20, Serie 2, Bastidor 1, Posición 2

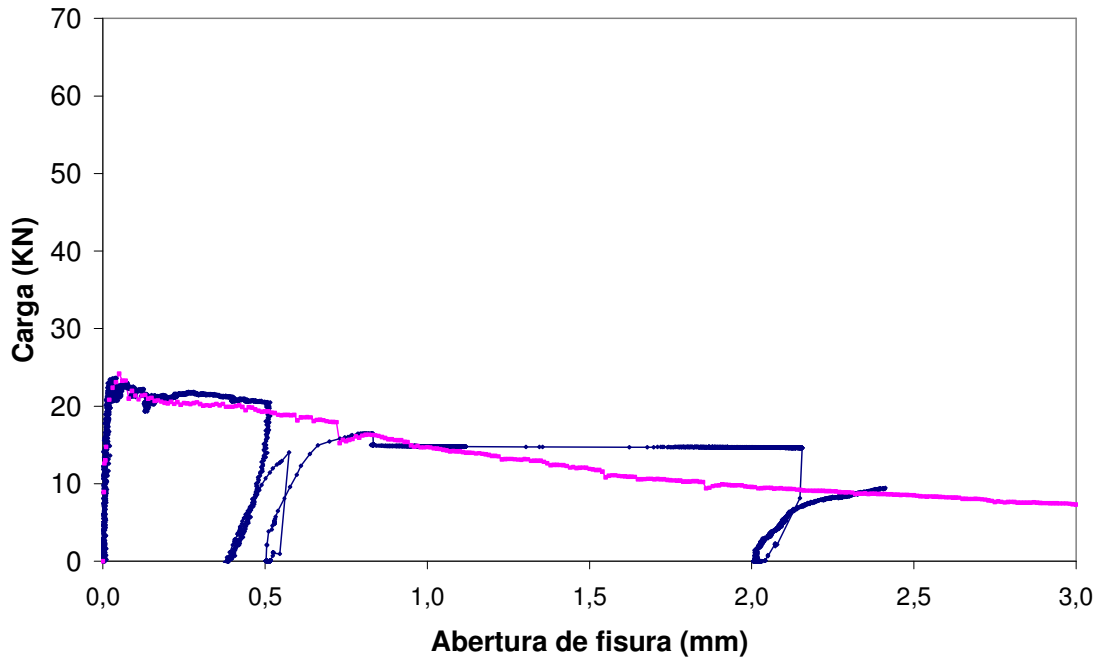


Figura A5.39a. Gráfico de ensayo para elemento 20, II-50/30-40-10.

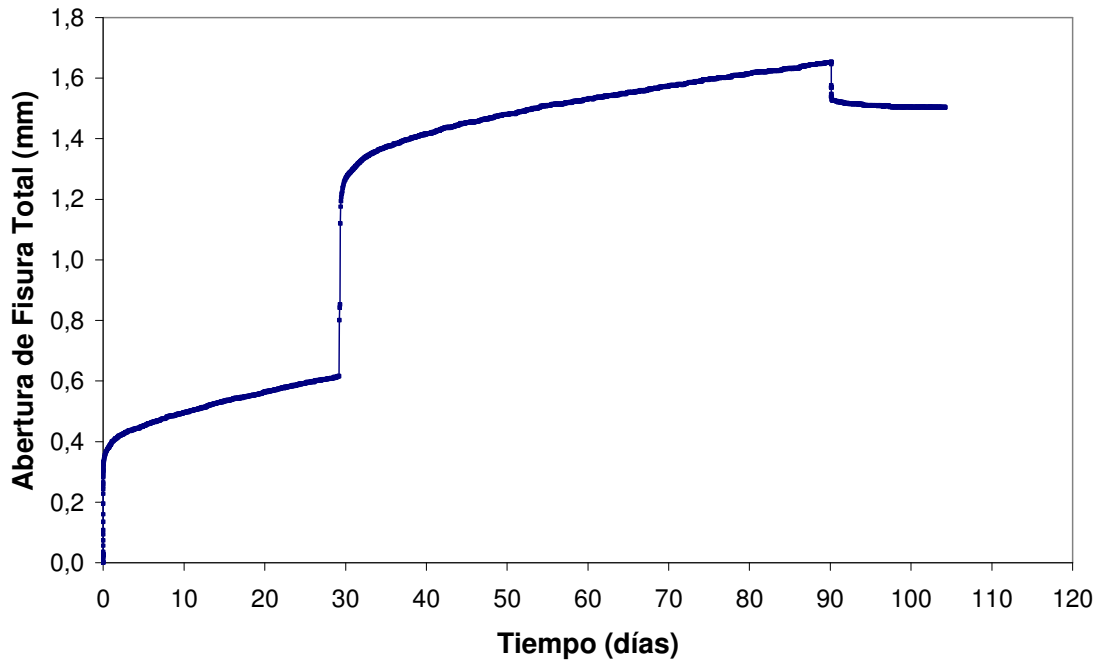


Figura A5.39b. Curva de fluencia para elemento 20, II-50/30-40-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	2
20	BASTIDOR	1

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-50/30-40-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	2

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	10/03/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	14,9
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	72,9
Fecha descarga	08/06/2009
Duración en carga (t_r)(días)	90
Fecha retiro bastidor	22/06/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	104
Roturas en bastidor	Si
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	22/06/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	16/02/2009
Fecha de prefisuración	09/03/2009
Edad de prefisuración (días)	42
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	23,6
Resist. primera fisura (f_{cf1})(MPa)	4,40
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,516
Carga de prefisura (F_w)(kN)	20,5
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,386
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,715
Abertura final (w_{pc})(mm)	2,038
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	1,890
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	-
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	-
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	-
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	-
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	-

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,329
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	1,323
Abertura dif. final (w_{cd}^{ff})(mm)	1,323
Abertura total final (w_{ct}^{ff})(mm)	1,652
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	1,538
Abertura res. final (w_{cr}^{ff})(mm)	1,504
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,114
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,034
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,148

ANOTACIONES: este elemento ha sufrido un proceso de recarga, debido a la rotura de un elemento en este bastidor y a la necesidad de retirarlo para continuar el ensayo. Los valores arrojados por la curva completa (especialmente los de la zona de fluencia se deben tomar con cuidado ya que estos elementos han sufrido procesos de carga-descarga-recarga). En la curva de fluencia alrededor del día 29 se aprecia un movimiento brusco, un incremento en la velocidad de abertura de fisura importante que luego se estabiliza.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 2 - A 1
Fecha de fabricación	26/01/2009
Fecha de desmoldeo	27/01/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	41,3
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	28000
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	24,2
Resist. primera fisura (f_{cf})(MPa)	4,68
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	3,69
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	2,29
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	1,63
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	1,28
Abertura carga max (w_{max})(mm)	0,050
Carga máxima (F_{max})(kN)	24,2
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	19,3
F_{max} / F_f	1,00
F_w / F_f	0,80
F_{max} / F_w	1,25

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{ff})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{ff})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{ff})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	1
Recarga número	1

Figura A5.39c. Ficha de ensayo para elemento 20, II-50/30-40-10.

ELEMENTOS II-50/30-40-10

40. Elemento 18, Serie 2, Bastidor 1, Posición 3

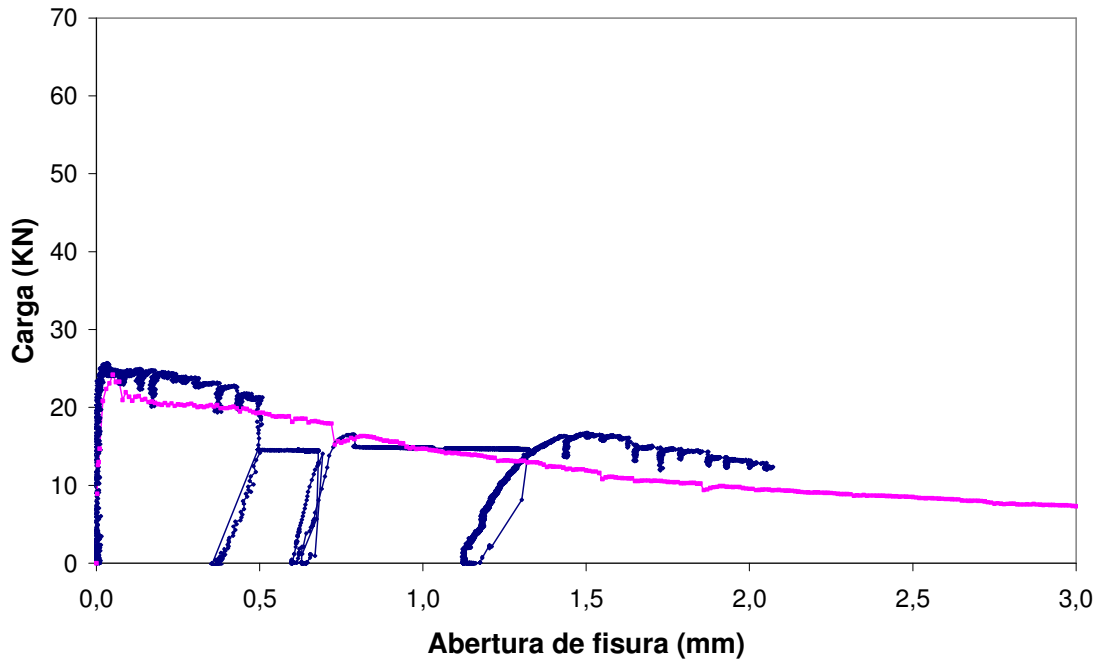


Figura A5.40a. Gráfico de ensayo para elemento 18, II-50/30-40-10.

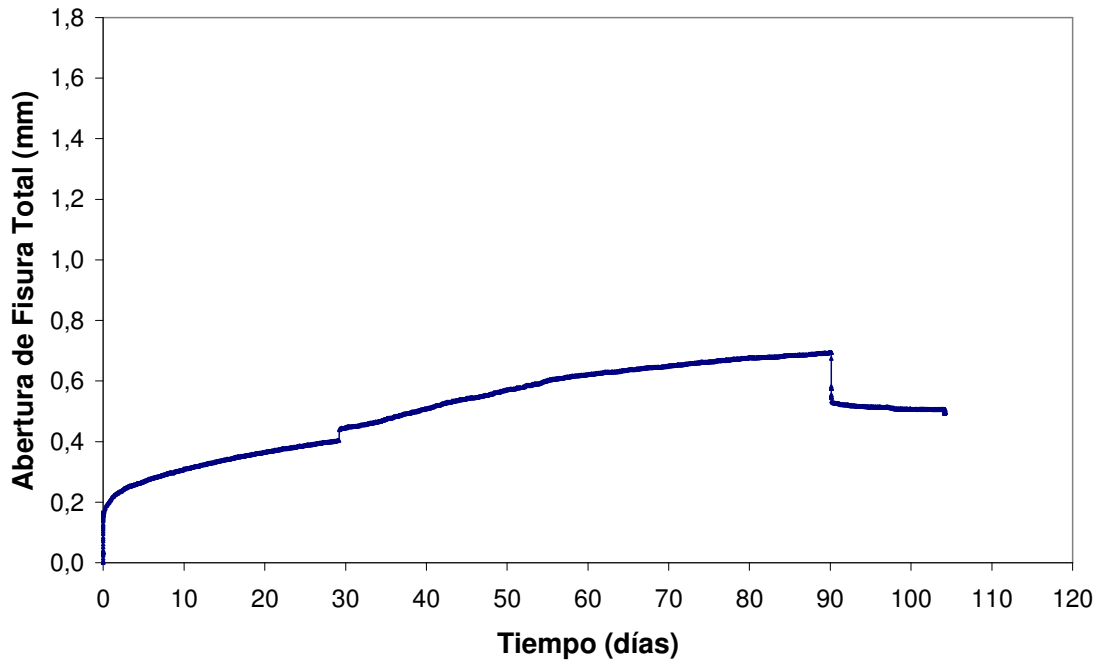


Figura A5.40b. Curva de fluencia para elemento 18, II-50/30-40-10.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	2
18	BASTIDOR	1

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	I-50/30-40-10
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	3

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	10/03/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	15,4
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	72,4
Fecha descarga	08/06/2009
Duración en carga (t_f)(días)	90
Fecha retiro bastidor	22/06/2009
Duración total ensayo (t_t)(días)	104
Roturas en bastidor	Si
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	22/06/2009

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	16/02/2009
Fecha de prefisuración	24/02/2009
Edad de prefisuración (días)	29
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	25,7
Resist. primera fisura (f_{cf1})(MPa)	4,88
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,509
Carga de prefisura (F_w)(kN)	21,3
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,364
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,525
Abertura final (w_{pc})(mm)	1,058
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,858
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	16,7
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	1,505
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	3,49
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	-
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	-

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,161
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,533
Abertura dif. final (w_{cd}^{ff})(mm)	0,533
Abertura total final (w_{ct}^{ff})(mm)	0,694
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,547
Abertura res. final (w_{cr}^{ff})(mm)	0,494
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,147
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,052
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,200

ANOTACIONES: este elemento ha sufrido 3 procesos de recarga, debido a la rotura de un elemento en este bastidor y a la necesidad de retirarlo para continuar el ensayo. Los valores arrojados por la curva completa (especialmente los de la zona de fluencia se deben tomar con cuidado ya que estos elementos han sufrido procesos de carga-descarga-recarga). En la curva de fluencia alrededor del día 29 se aprecia un movimiento brusco, reflejo de un incremento súbito de apertura de fisura en el elemento 20.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	Serie 2 - A 1
Fecha de fabricación	26/01/2009
Fecha de desmoldeo	27/01/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	41,3
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	28000
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	24,2
Resist. primera fisura (f_{cf})(MPa)	4,68
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	3,69
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	2,29
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	1,63
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	1,28
Abertura carga max (w_{max})(mm)	0,050
Carga máxima (F_{max})(kN)	24,2
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	19,3
F_{max} / F_f	1,00
F_w / F_f	0,80
F_{max} / F_w	1,25

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{ff})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{ff})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{ff})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	3
Recarga número	3

Figura A5.40c. Ficha de ensayo para elemento 18, II-50/30-40-10.

ELEMENTOS II-2φ6-20

41. Elemento 43, Serie 3, Bastidor 4, Posición 1

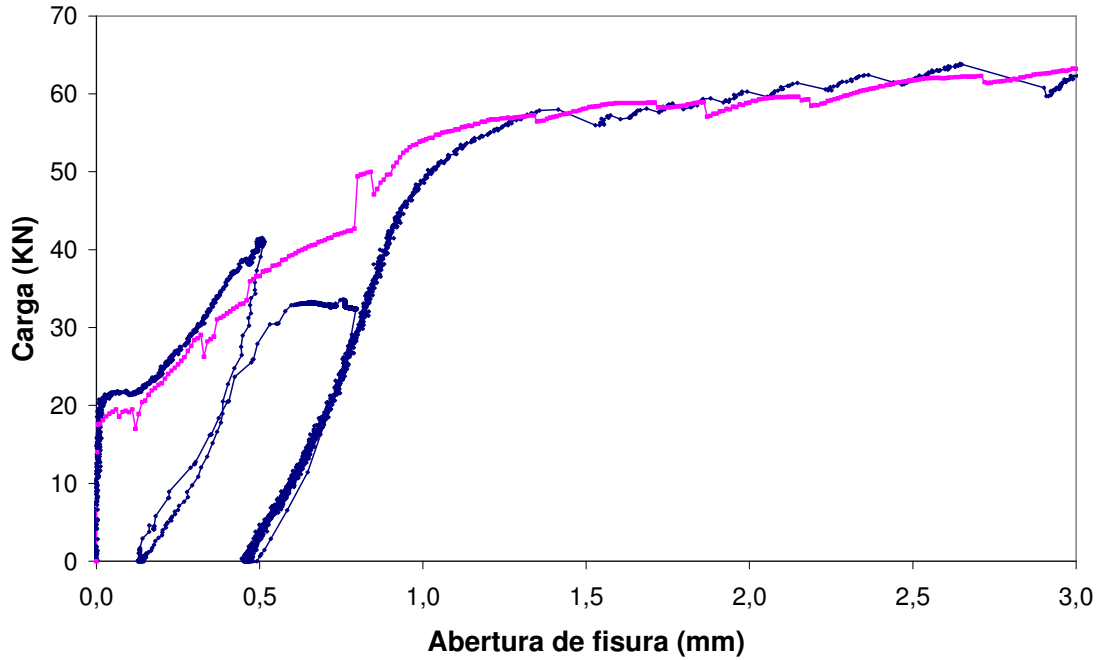


Figura A5.41a. Gráfico de ensayo para elemento 43, II-2φ6-20.

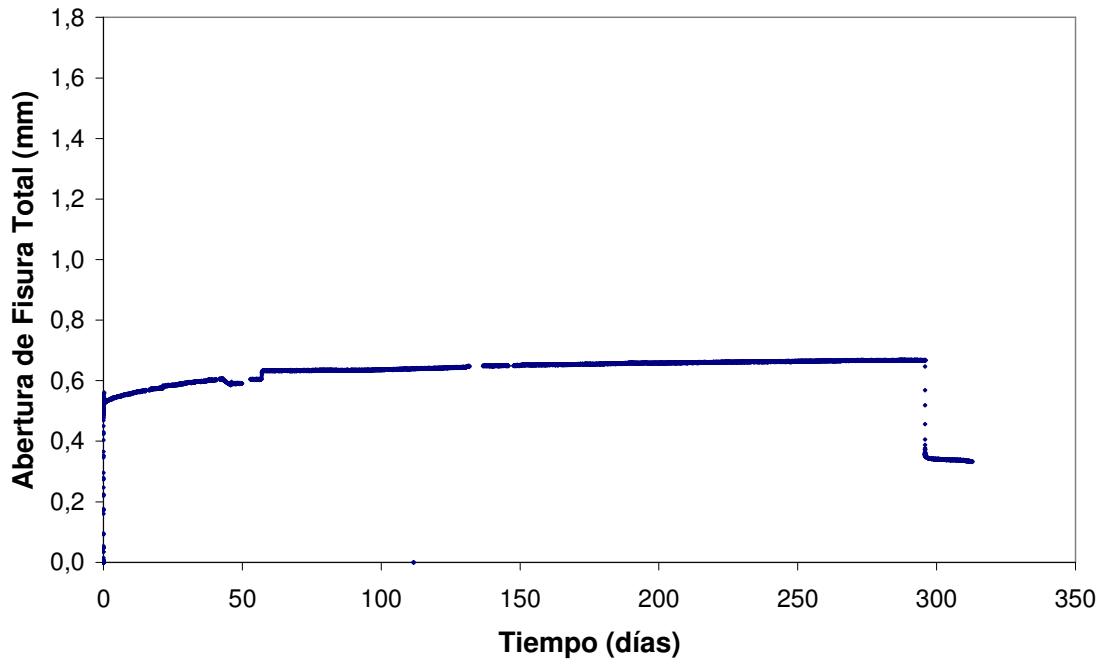


Figura A5.41b. Curva de fluencia para elemento 43, II-2φ6-20.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	3
43	BASTIDOR	4

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-2φ6-20
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	1

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	02/07/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	33,1
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	79,8
Fecha descarga	24/04/2010
Duración en carga (t_r)(días)	296
Fecha retiro bastidor	11/05/2010
Duración total ensayo (t_t)(días)	313
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	11/05/2010

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	25/06/2009
Fecha de prefisuración	02/07/2009
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	21,7
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,16
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,515
Carga de prefisura (F_w)(kN)	41,5
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,134
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,629
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,801
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,468
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	65,0
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	4,000
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	11,13
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	11,85
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	12,38

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,495
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,140
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,172
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,667
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,357
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,334
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,310
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,023
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,333

ANOTACIONES: caídas en las aberturas de fisura en probetas 1 y 2, probablemente causadas por fisuras generadas bajo los puntos de carga.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	A 4 - Serie 3
Fecha de fabricación	04/06/2009
Fecha de desmoldeo	05/06/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	36,4
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	26500
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	19,2
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	3,68
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	7,03
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	11,16
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	11,85
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	12,34
Abertura carga max (w_{max})(mm)	4,000
Carga máxima (F_{max})(kN)	64,3
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	36,6
F_{max} / F_f	3,35
F_w / F_f	1,91
F_{max} / F_w	1,76

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cut})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.41c. Ficha de ensayo para elemento 43, II-2φ6-20.

ELEMENTOS II-2φ6-20

42. Elemento 44, Serie 3, Bastidor 4, Posición 2

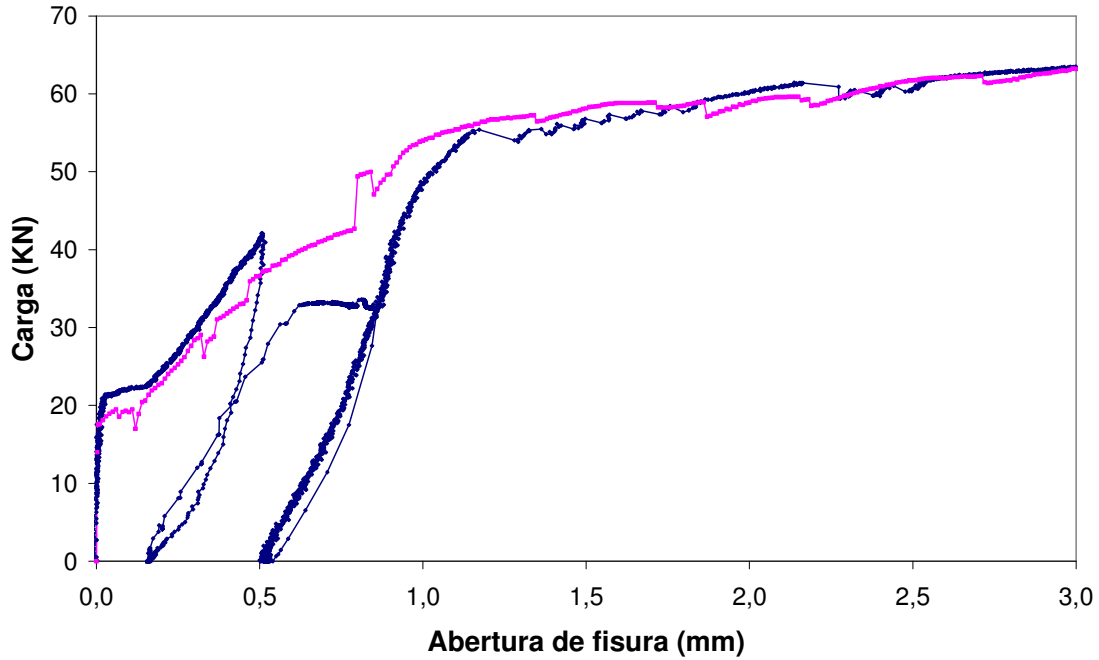


Figura A5.42a. Gráfico de ensayo para elemento 44, II-2φ6-20.

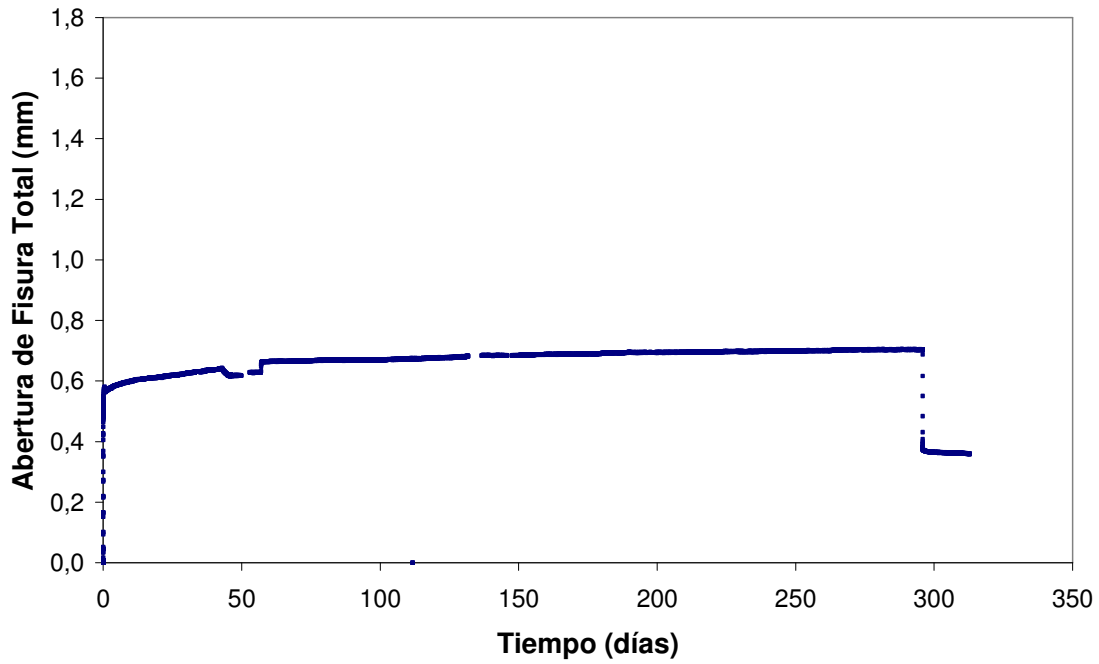


Figura A5.42b. Curva de fluencia para elemento 44, II-2φ6-20.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	3
44	BASTIDOR	4

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-2ϕ6-20
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	2

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	02/07/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	33,7
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	80,0
Fecha descarga	24/04/2010
Duración en carga (t_r)(días)	296
Fecha retiro bastidor	11/05/2010
Duración total ensayo (t_t)(días)	313
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	11/05/2010

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	25/06/2009
Fecha de prefisuración	02/07/2009
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	21,5
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,12
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,517
Carga de prefisura (F_w)(kN)	42,1
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,157
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,646
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,860
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,516
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	65,1
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	4,000
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	10,90
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	11,65
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	12,16

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,489
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,180
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,214
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,703
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,379
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,359
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,324
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,020
Recuperación total (w_{cu})(mm)	0,344

ANOTACIONES: en el ensayo de prefisuración no se registró abertura de fisura ni carga en la célula, se toman los datos del ordenador que registra la galga. Caidas en las aberturas de fisura en probetas 1 y 2, probablemente causadas por fisuras generadas bajo los puntos de carga.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	A 4 - Serie 3
Fecha de fabricación	04/06/2009
Fecha de desmoldeo	05/06/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	36,4
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	26500
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	19,2
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	3,68
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	7,03
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	11,16
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	11,85
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	12,34
Abertura carga max (w_{max})(mm)	4,000
Carga máxima (F_{max})(kN)	64,3
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	36,6
F_{max} / F_f	3,35
F_w / F_f	1,91
F_{max} / F_w	1,76

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	-
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	-
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	-
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	-
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	-
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	-
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	-
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	-
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	-
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	-
Recuperación total (ϵ_{cu})	-

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.42c. Ficha de ensayo para elemento 44, II-2ϕ6-20.

ELEMENTOS II-2φ6-20

43. Elemento 45, Serie 3, Bastidor 4, Posición 3

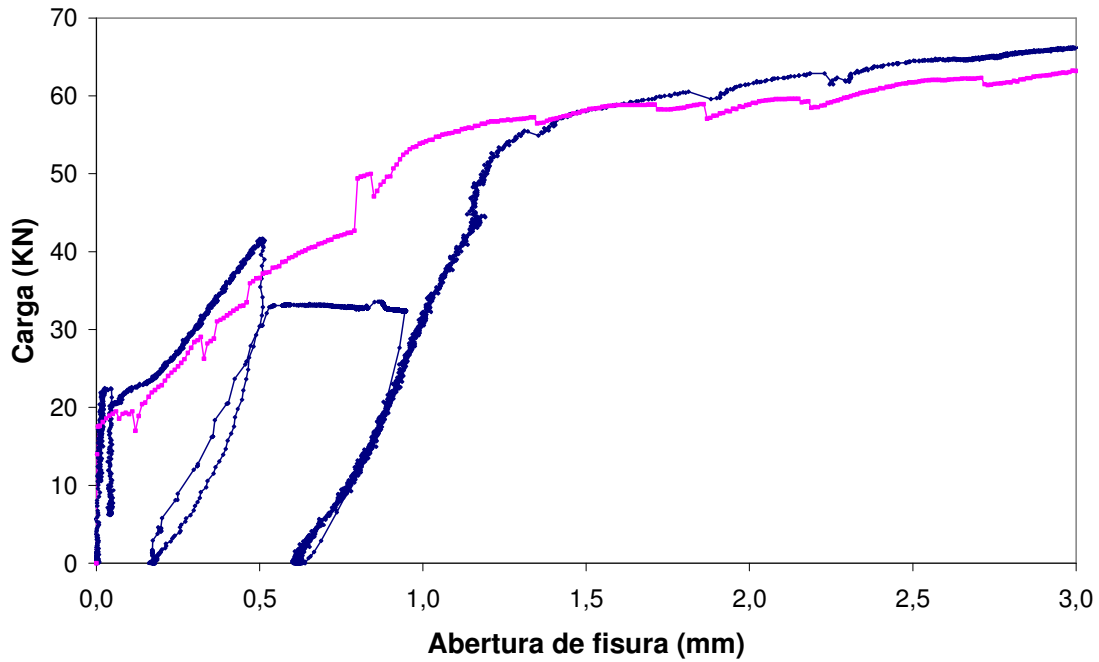


Figura A5.43a. Gráfico de ensayo para elemento 45, II-2φ6-20.

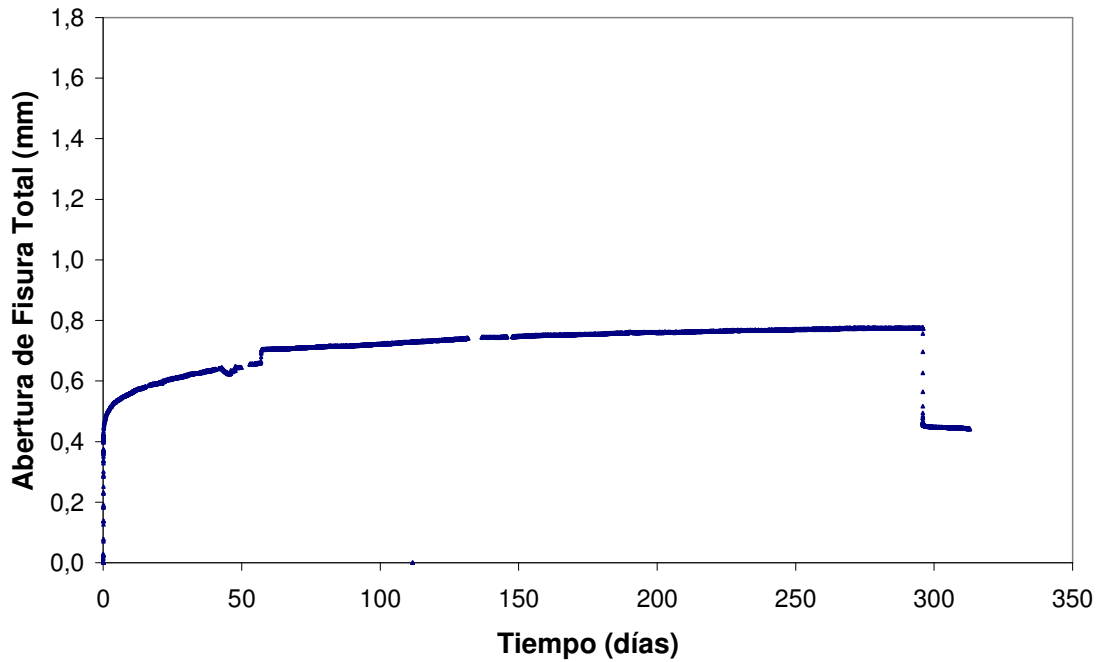


Figura A5.43b. Curva de fluencia para elemento 45, II-2φ6-20.

FICHA DE ENSAYO

PROBETA	SERIE	3
45	BASTIDOR	4

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	II-2ϕ6-20
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	0,50
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	80
Posición en bastidor	3

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	02/07/2009
Carga aplicada (F_a)(kN)	34,3
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	82,2
Fecha descarga	24/04/2010
Duración en carga (t_r)(días)	296
Fecha retiro bastidor	11/05/2010
Duración total ensayo (t_t)(días)	313
Roturas en bastidor	No
Probeta llega a rotura en bastidor	No
Fecha ensayo rotura	11/05/2010

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	25/06/2009
Fecha de prefisuración	02/07/2009
Edad de prefisuración (días)	28
Carga de primera fisura (F_{f1})(kN)	22,5
Resist. primera fisura (f_{ct1})(MPa)	4,31
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	0,515
Carga de prefisura (F_w)(kN)	41,7
Abertura residual (w_{pr})(mm)	0,170
Zona de Fluencia	
Abertura inicial (w_{pci})(mm)	0,540
Abertura final (w_{pc})(mm)	0,944
Abertura residual (w_{pcr})(mm)	0,613
Zona de Rotura	
Carga máxima rotura (F_{pmax})(kN)	68,9
Abertura carga max (w_{pmax})(mm)	4,000
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	11,16
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	12,38
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	12,98

CURVA DE FLUENCIA (abertura de fisura)	
Curva General (completa de fluencia)	
Abertura inicial (w_{ci})(mm)	0,370
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	0,346
Abertura dif. final (w_{cd}^{df})(mm)	0,404
Abertura total final (w_{ct}^{df})(mm)	0,774
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,464
Abertura res. final (w_{cr}^{df})(mm)	0,443
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	0,310
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	0,021
Recuperación total (w_{cut})(mm)	0,331

ANOTACIONES: caídas en las aberturas de fisura en probetas 1 y 2, probablemente causadas por fisuras generadas bajo los puntos de carga. No se tienen de abertura de fisura en el proceso de prefisuración, debido a problemas con el sistema de adquisición de datos.

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	A 4 - Serie 3
Fecha de fabricación	04/06/2009
Fecha de desmoldeo	05/06/2009

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(Mpa)	36,4
Módulo deformación (E_{28})(Mpa)	26500
Carga a primera fisura (F_f)(kN)	19,2
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	3,68
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(Mpa)	7,03
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(Mpa)	11,16
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(Mpa)	11,85
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(Mpa)	12,34
Abertura carga max (w_{max})(mm)	4,000
Carga máxima (F_{max})(kN)	64,3
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	36,6
F_{max} / F_f	3,35
F_w / F_f	1,91
F_{max} / F_w	1,76

CURVA COMPLETA (def. a compresión)	
Zona de Prefisura	
Def. de prefisura (ϵ_p)	0,756
Def. prefisura residual (ϵ_{pr})	0,121
Zona de Fluencia	
Def. inicial (ϵ_{pci})	-
Def. final (ϵ_{pc})	-
Def. residual (ϵ_{pcr})	-
Zona de Rotura	
Def. carga max (ϵ_{pmax})	-

CURVA DE FLUENCIA (def. a compresión)	
Curva General (completa de fluencia)	
Def. inicial (ϵ_{ci})	0,650
Def. diferida 90 días (ϵ_{cd}^{90})	1,094
Def. diferida final (ϵ_{cd}^{df})	1,339
Def. total final (ϵ_{ct}^{df})	1,989
Def. residual inicial (ϵ_{cri})	1,485
Def. residual final (ϵ_{cr}^{df})	1,432
Curva de Descarga	
Recuperación inicial (ϵ_{cui})	0,504
Recuperación diferida (ϵ_{cud})	0,053
Recuperación total (ϵ_{cut})	0,557

PROCESOS CARGA-DESCARGA-RECARGA	
Número de recargas	0
Recarga número	-

Figura A5.43c. Ficha de ensayo para elemento 45, II-2ϕ6-20.

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)