


PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FLUENCIA EN FLEXIÓN DE PRISMAS FISURADOS DE SFRC

Por

SAMUEL EDUARDO ARANGO CAMPO

Junio 2010

Autor / Author: Samuel Eduardo Arango Campo		Fecha / Date: Junio 2010	
Título / Title: PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FLUENCIA EN FLEXIÓN DE PRISMAS FISURADOS DE SFRC			
Directores del trabajo / Supervisors: Dr. Pedro Serna Ros Dr. José Rocío Martí Vargas		Código / code: CST-MIH-16	Nº páginas / pages: 96
Departamento / Department: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y DE PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL MASTER OFICIAL EN INGENIERÍA DEL HORMIGÓN (MIH)			
Universidad / University: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA		 UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA	
Palabras clave / Keywords: Ensayos mecánicos, estado fisurado, fibras de acero, flexión, fluencia, hormigón, SFRC. Mechanical tests, cracked state, steel fibres, flexion, creep, concrete, SFRC.			
Código UNESCO: 3305.05 3305.32 3312.08 3312.12			

Samuel Eduardo Arango Campo
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

ÍNDICE GENERAL

	<i>Pág.</i>
1. INTRODUCCIÓN	
1.1. JUSTIFICACIÓN	1.1
1.2. OBJETIVO GENERAL	1.2
1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	1.2
 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. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL SFRC.....	2.7
2.2.3. ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL SFRC.....	2.11
2.3. FLUENCIA DEL HORMIGÓN	2.18
2.3.1. FLUENCIA A COMPRESIÓN	2.19
2.3.1.1. Tipos de fluencia.....	2.21
2.3.1.2. Mecanismos de la fluencia en el hormigón.....	2.21
2.3.1.3. Factores que influyen en la fluencia.....	2.21
2.3.2. FLUENCIA BAJO DIFERENTES TIPOS DE SOLICITACIÓN.....	2.23
2.4. FLUENCIA DEL SFRC.....	2.24
2.4.1. INTRODUCCIÓN A LAS DEFORMACIONES DIFERIDAS DEL SFRC	2.24
2.4.2. FLUENCIA A COMPRESIÓN DEL SFRC	2.25
2.4.3. FLUENCIA A FLEXIÓN DEL SFRC	2.27
2.4.3.1. Fluencia a flexión en elementos de SFRC sin fisurar	2.27
2.4.3.2. Fluencia a flexión en elementos de SFRC fisurados.....	2.28
2.4.3.2.1. Resumen de investigaciones desarrolladas.....	2.30
2.4.4. MÉTODOS DE ENSAYO DE FLUENCIA A FLEXIÓN	2.32
2.4.4.1. Swamy y Theodorakopoulos (1979)	2.33
2.4.4.2. Chanvillard y Roque (1999).....	2.33
2.4.4.3. Kurtz y Balaguru (2000)	2.34
2.4.4.4. Klinkert et al. (2002).....	2.35
2.4.4.5. Dalhousie University (Mackay (2002), Cochrane (2003), y Mackay y Trottier (2004))	2.35
2.4.4.6. Bernard (2004)	2.37
2.5. RESUMEN CRÍTICO Y CUESTIONES SIN RESOLVER	2.38
 3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	

4. PROPUESTA METODOLÓGICA DE ENSAYO DE FLUENCIA

4.1. CRITERIOS DE DISEÑO	4.1
4.2. DISEÑO DEL EQUIPO DE ENSAYO	4.3
4.2.1. BASTIDOR Y COMPONENTES.....	4.3
4.2.2. DISPOSITIVOS DE MEDIDA.....	4.7
4.2.3. EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS	4.9
4.2.4. EQUIPOS AUXILIARES.....	4.10
4.3. PROCEDIMIENTO OPERATIVO DE ENSAYO	4.12
4.3.1. AMASADO.....	4.13
4.3.2. HORMIGONADO.....	4.13
4.3.3. CONSERVACIÓN Y PREPARACIÓN	4.14
4.3.4. PREFISURACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYOS DE FLUENCIA	4.15
4.3.5. ENSAYO DE FLUENCIA	4.16
4.3.5.1. Etapa de carga	4.17
4.3.5.2. Etapa de descarga y recuperación.....	4.20
4.3.6. ROTURA POST-FLUENCIA DE LAS PROBETAS	4.22
4.4. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO	4.23
4.4.1. GRÁFICO DE ENSAYO.....	4.23
4.4.2. FICHA DE ENSAYO.....	4.24
4.5. EJEMPLO DE RESULTADOS EXPERIMENTALES	4.30

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

5.1. CONCLUSIONES	5.1
5.2. RECOMENDACIONES PARA FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	5.2

REFERENCIAS	6.1
--------------------------	-----

ANEJO 1. DESPIECE DE PERFILES Y PLANOS DE BASTIDOR DE FLUENCIA.....	A.1
---	-----

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN

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.

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 períodos 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 Tesina se pretende desarrollar una propuesta metodológica para el estudio experimental del 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 especial relevancia la realización de una investigación que defina al detalle un equipo y una metodología de ensayo.

1.2. OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de esta Tesina es el realizar una propuesta metodológica para el estudio experimental de la fluencia en flexión de prismas fisurados de hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC).

1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento se compone de 5 capítulos, el apartado de Referencias y Anejos, que se estructuran de la siguiente forma:

- Capítulo 1. Introducción.
- Capítulo 2. Estado del Arte.
- Capítulo 3. Objetivos Específicos.
- Capítulo 4. Propuesta Metodológica de Ensayo de Fluencia.
- Capítulo 5. Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación.
- Referencias.
- Anejos.

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

El Capítulo 2 contiene una 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, también se presentan los estudios realizados incluyendo las variables empleadas, así como las principales conclusiones y metodología de ensayo empleada. Para finalizar se realiza un resumen crítico, donde se exponen comentarios y cuestiones sin resolver.

En el Capítulo 3 se definen los objetivos específicos, en función de las cuestiones y necesidades identificadas en el capítulo anterior.

El Capítulo 4 presenta la metodología propuesta para el estudio experimental de la fluencia en flexión de prismas fisurados de SFRC, los fundamentos y la concepción del ensayo de fluencia, se expone una sugerencia de presentación de los resultados de los ensayos de fluencia y los criterios para su interpretación; además, se presenta un ejemplo real de resultados obtenidos de un ensayo experimental.

En el Capítulo 5 se establecen las conclusiones y las futuras líneas de investigación.

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

Y por último, se incluyen en un Anejo el despiece y los planos del bastidor de ensayo de fluencia diseñado.

(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 y la metodología de ensayo empleada.

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.

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, 2000).

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.

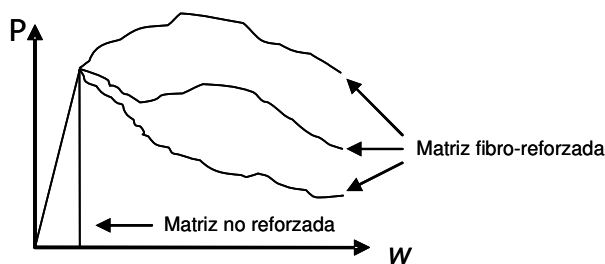


Figura 2.1. Curvas típicas carga-abertura de fisura, para matrices con y sin fibras.

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/m³. 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

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 : 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 (mm²).

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/mm²).
- 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 2.2).

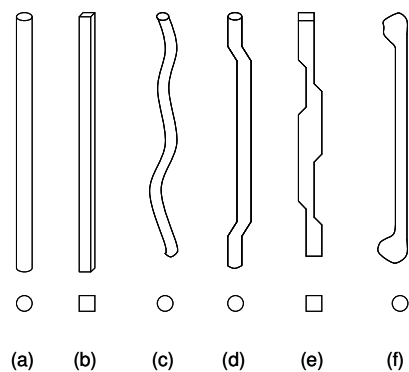


Figura 2.2. Formas de las fibras de acero: a) sección circular, b) sección rectangular, c) ondulada, d) extremos conformados, e) de extractos fundidos y f) extremos ensanchados (Hannant, 1978).

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):

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

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. 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 2.3). Se debe tener especial cuidado con estas situaciones para no generar falsos panoramas con resultados excesivamente optimistas.

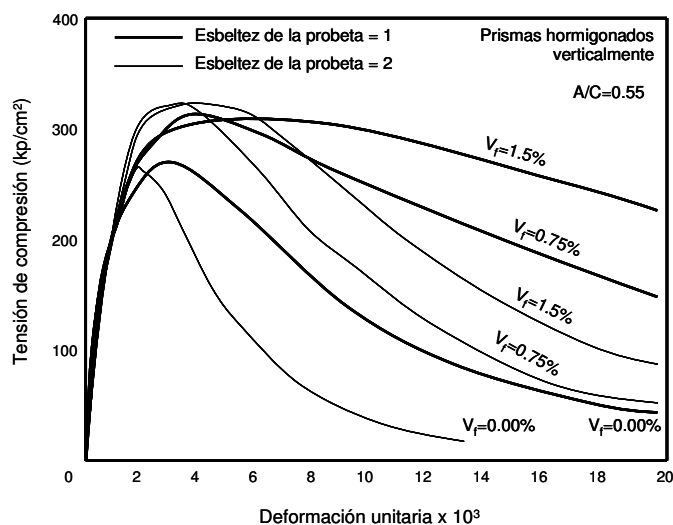


Figura 2.3. Respuesta a compresión simple de SFRC con diferentes V_f y con diferente esbeltez de probeta (ACHE, 2000).

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).

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 2.4).

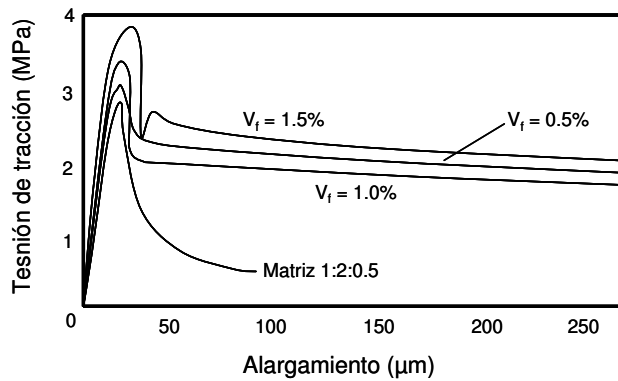


Figura 2.4. Curvas tensión de tracción-alargamiento de morteros en función del V_f a tracción directa (ACI 544.1R-96, 2009).

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, 2000).

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).

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 2.5) (Hannant, 1978).

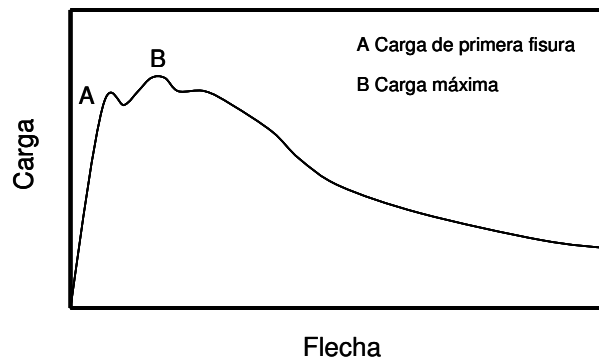


Figura 2.5. Curva carga-flecha a flexotracción para un SFRC (ACHE, 2000).

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_t 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).

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).

2.2.3. ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL 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 2.6), 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).

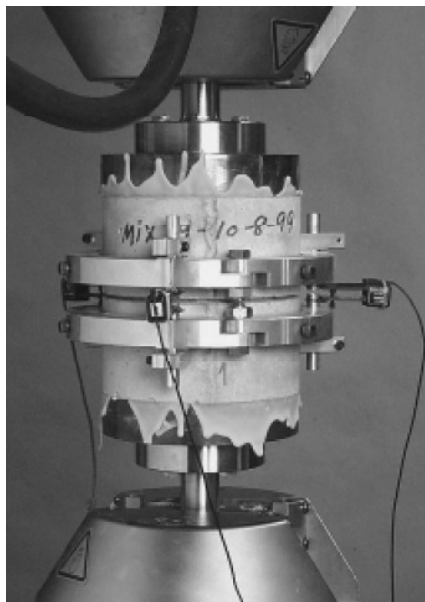


Figura 2.6. Ensayo a tracción uniaxial (Stang et al., 2000).

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 2.7) 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.

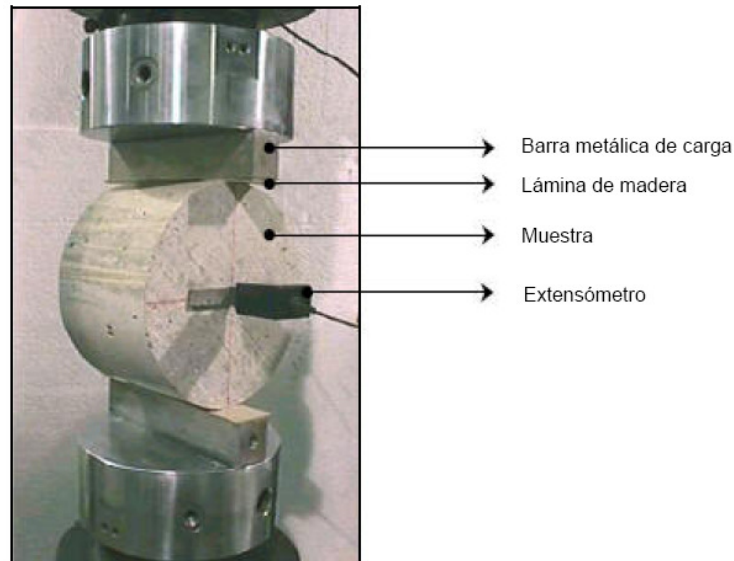


Figura 2.7. Ensayo a tracción indirecta para SFRC (Barragán, 2002).

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.

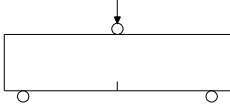
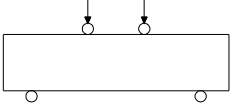
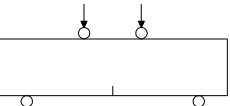
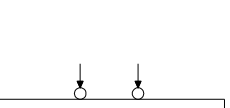
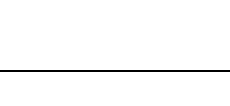

Los principales parámetros que varían entre los diferentes procedimientos son:

- 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 2.8.

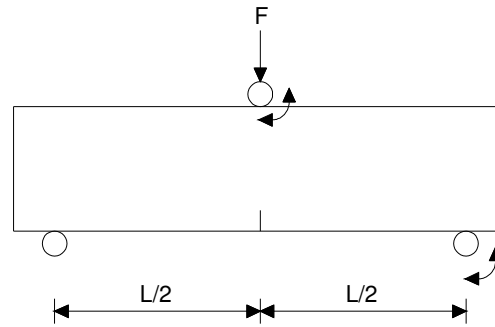


Figura 2.8. Montaje de ensayo a flexotracción según UNE-EN 14651.

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 2.9 y 2.10).

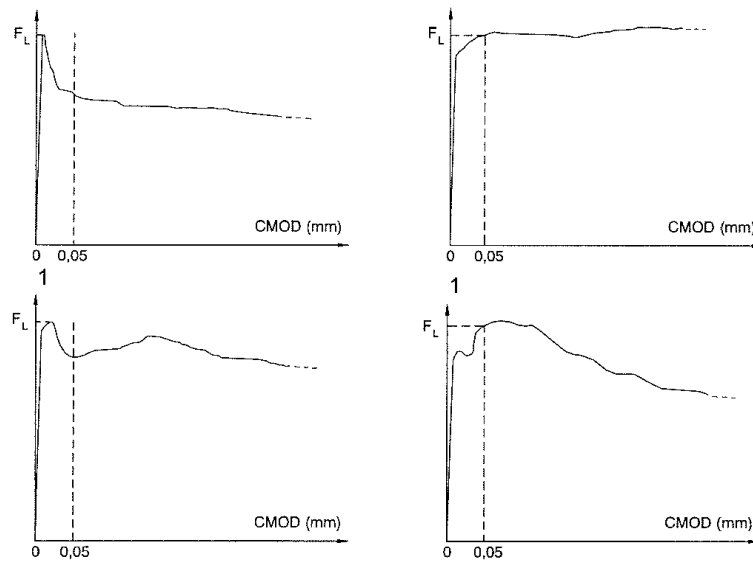


Figura 2.9. Curvas carga-CMOD, obtención de F_L según UNE-EN 14651.

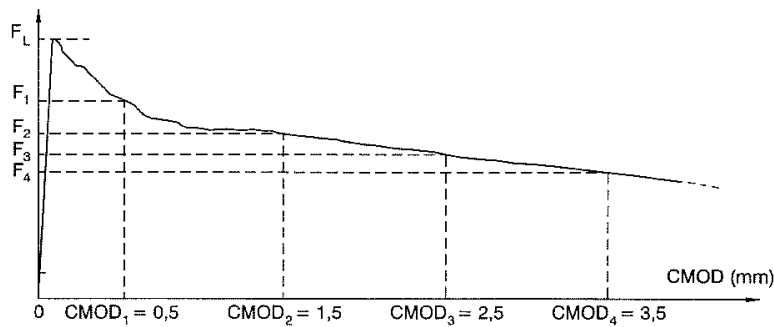


Figura 2.10. Curva carga-CMOD, indicando $CMOD_{1,2,3,4}$ según UNE-EN 14651.

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 2.10).

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 2.11), 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.

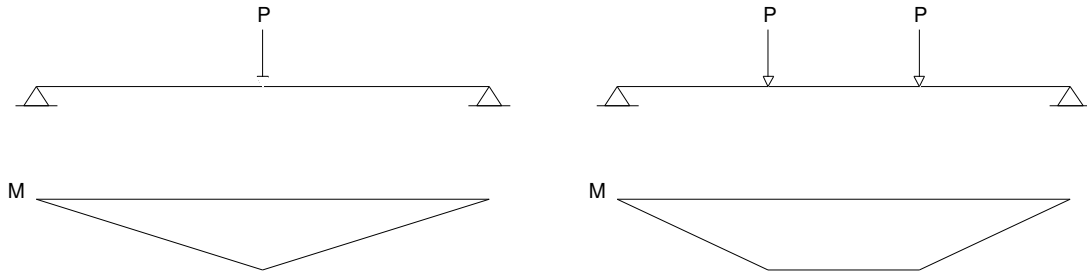


Figura 2.11. Esquemas de carga en ensayo de flexotracción.

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 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_{cl}^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, 2000).

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).

2.3. FLUENCIA DEL HORMIGÓN

Las deformaciones en el hormigón a lo largo del tiempo se representan en la Figura 2.12 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).

Como se puede ver en la Figura 2.12, 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).

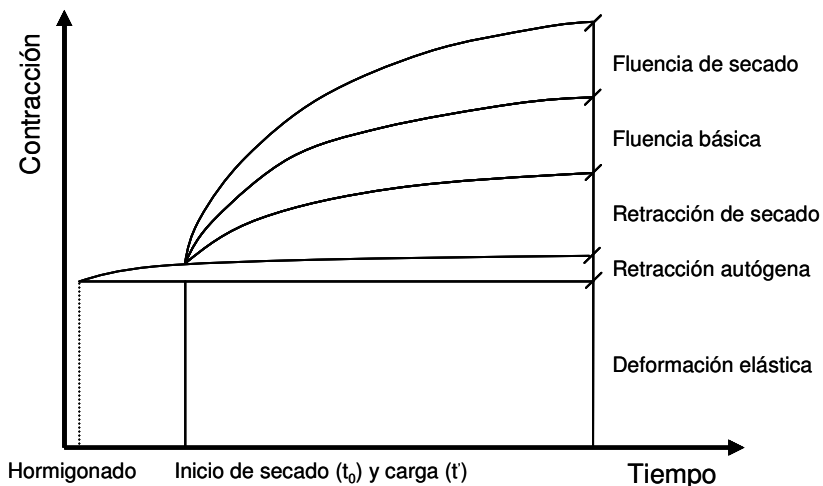


Figura 2.12. Deformaciones en el hormigón a lo largo del tiempo (López, 2005).

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 2.13.

- 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.

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).

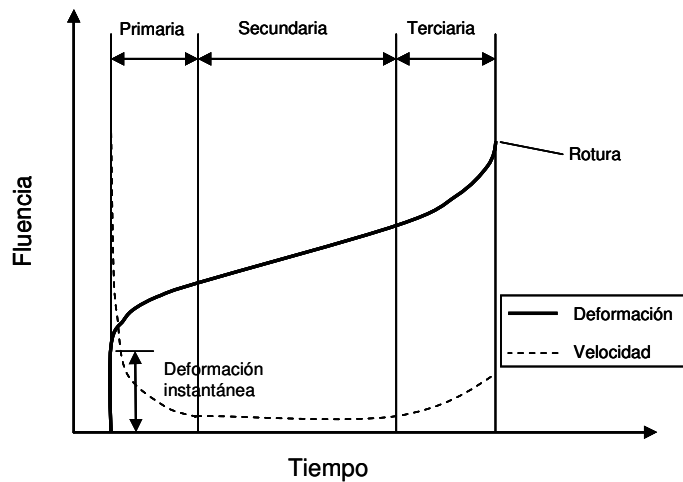


Figura 2.13. Representación de etapas del fenómeno de fluencia (López, 2005) (Neville et al., 1983).

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 2.14). 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.

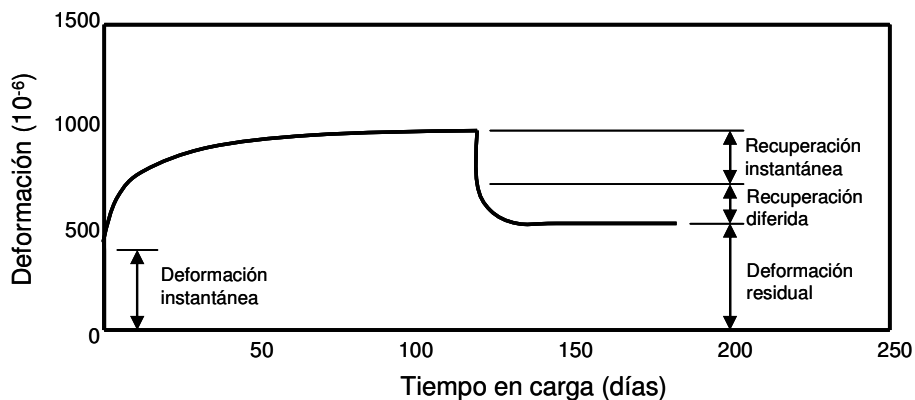


Figura 2.14. Deformación instantánea y recuperación al descargar (Neville et al., 1983).

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

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 2.15.

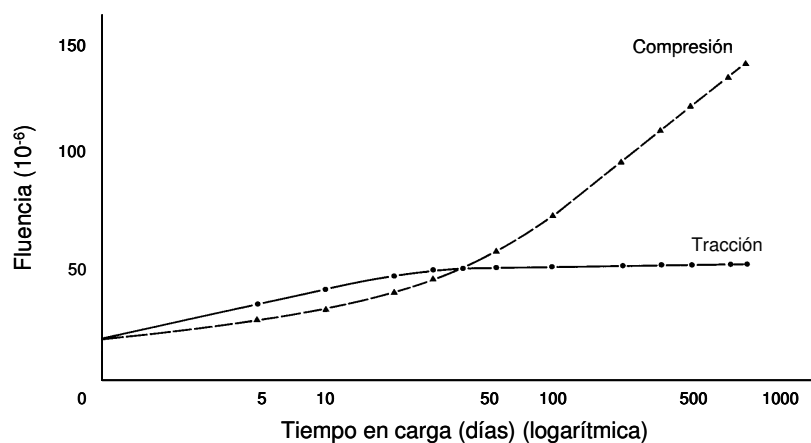


Figura 2.15. Fluencia del hormigón simple a flexión (Neville et al., 1983).

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 Committee 544.4R-88, 1988). 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 Committee 544.4R-88, 1988) 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 y ²) 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, 1988).

Los estudios realizados se han centrado principalmente en el comportamiento bajo carga a lo largo del tiempo de elementos sometidos a solicitaciones 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, 1988).

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., 1994²) (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.

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 2.16).

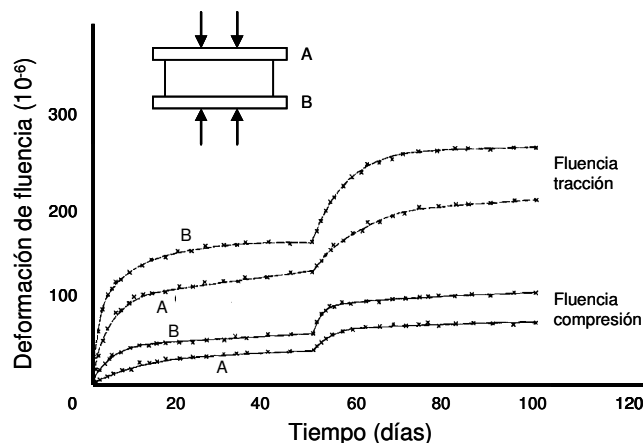


Figura 2.16. Deformaciones de fluencia en probetas de SFRC con 1% de fibras (Swamy y Theodorakopoulos, 1979).

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 2.17) 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) y Barragán y Zerbino (2008)).

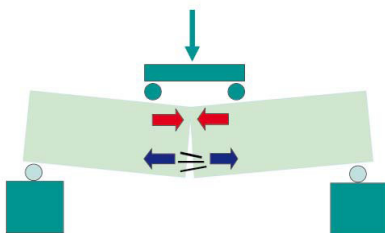


Figura 2.17. Fluencia a flexión del SFRC en estado fisurado.

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 2.16) (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 2.18).

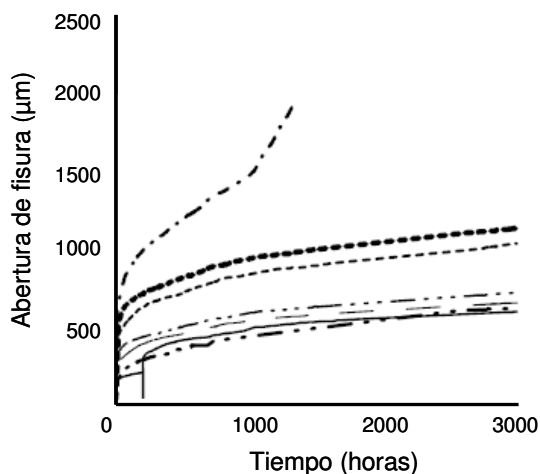


Figura 2.18. Rotura por fluencia (fluencia primaria, secundaria y terciaria) (Barragán y Zerbino, 2008).

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 (°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°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.
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:	$d = 1.75$ 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:	-

2.4.4. 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) y Bernard (2004).

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 2.19.

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.

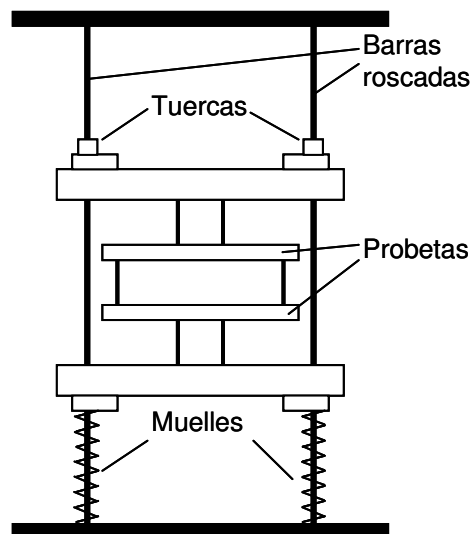


Figura 2.19. Mecanismo de ensayo Swamy y Theodorakopoulos (1979).

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 2.20.

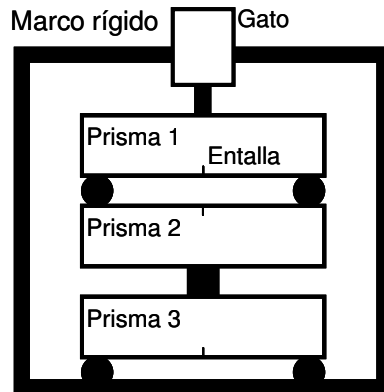


Figura 2.20. Marco de ensayo empleado por Chanvillard y Roque (1999).

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 2.21 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.

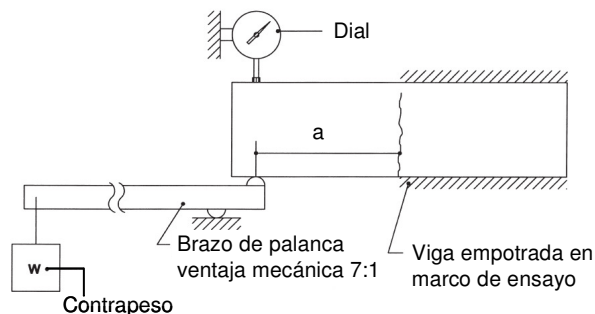


Figura 2.21. Mecanismo de ensayo planteado por Kurtz y Balaguru (2000).

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 2.22 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.

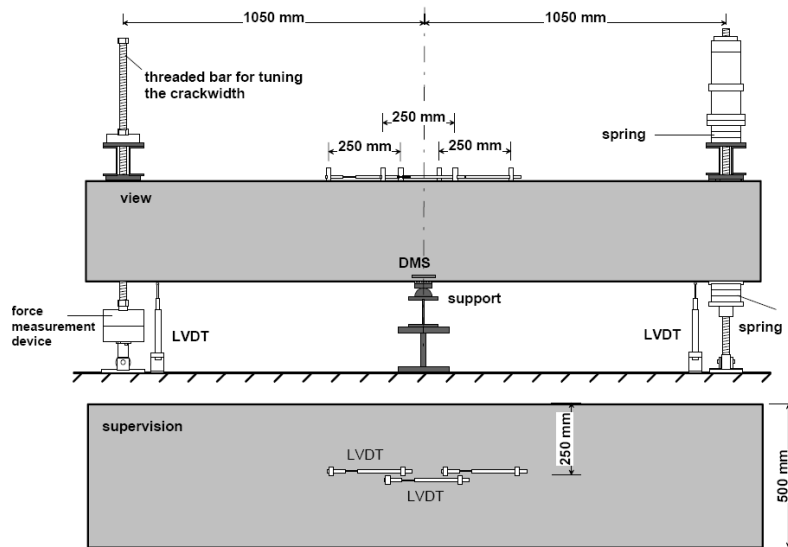


Figura 2.22. Esquema ensayo de relajación (Klinkert et al., 2002).

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 2.23 y 2.24, respectivamente.

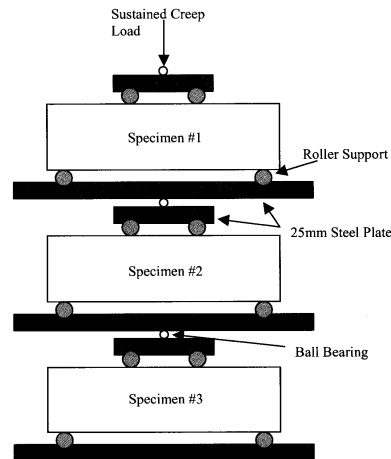


Figura 2.23. Columna de probetas en bastidor de fluencia (Mackay (2002), Cochrane (2003), y Mackay y Trottier (2004)).

El diseño del bastidor permite ensayar tres probetas en columna (Figuras 2.23 y 2.24), 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 2.24) 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).

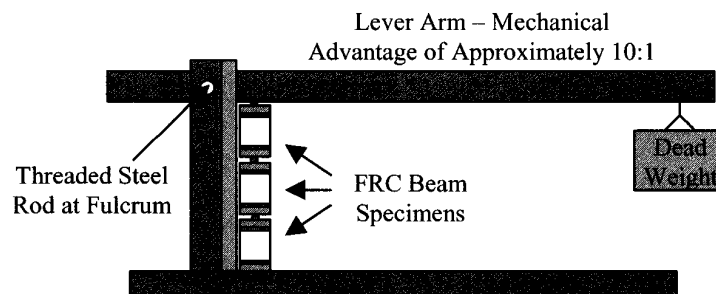


Figura 2.24. Bastidor de fluencia empleado (Mackay (2002) y Cochrane (2003)).

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 SFRS. 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 2.25 se presenta el bastidor de ensayo empleado por Bernard.

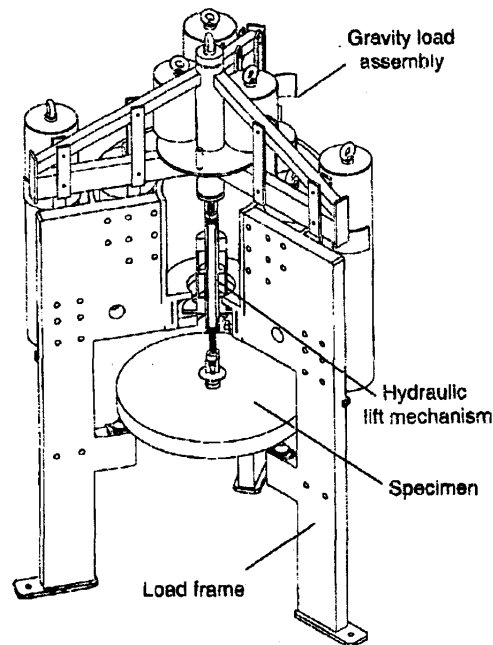


Figura 2.25. Bastidor de ensayo empleado por Bernard (2004).

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).

2.5. 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, a su comportamiento a fluencia en flexión en estado fisurado, a las variables empleadas y la metodología y equipos empleados en los estudios; 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: Swamy y Theodorakopoulos (1979), Chanvillard y Roque (1999), Kurtz y Balaguru (2000), Klinkert (2002), Mackay (2002), Cochrane (2003), Mackay y Trottier (2004) y Bernard (2004), de las que cabe destacar:

- En sus estudios experimentales han empleado diferentes metodologías y equipos de ensayo.
- 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. Por lo tanto, un estudio que establezca y defina una metodología de ensayo y equipos adecuados 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.

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).

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

CAPÍTULO 3

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

En este capítulo se definen los objetivos específicos para el desarrollo de la Propuesta Metodológica para el Estudio Experimental de la Fluencia en Flexión de Prismas Fisurados de SFRC, que se desarrollan como consecuencia de la revisión del estado del arte presentada en el Capítulo 2 y en congruencia con el objetivo general definido en el Capítulo 1. 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, se pretende diseñar y poner en marcha los equipos necesarios y una metodología experimental para estudiar el comportamiento del SFRC ante el fenómeno mencionado.
- Definir paso a paso la metodología de ensayo, describiendo detalladamente los procedimientos en el proceso de prefisuración, fluencia (etapas de carga, descarga y recuperación), y rotura post-fluencia.
- En función de la metodología definida, realizar una propuesta de presentación de resultados de los ensayos y de los criterios para su interpretación.
- 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.

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

CAPÍTULO 4

PROPUESTA METODOLÓGICA DE 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 una propuesta metodológica para el análisis experimental de la fluencia en flexión de prismas fisurados de SFRC y el diseño del equipo de ensayo es necesario.

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.

4.1. 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) y Bernard (2004)) 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 4.1):

- 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).

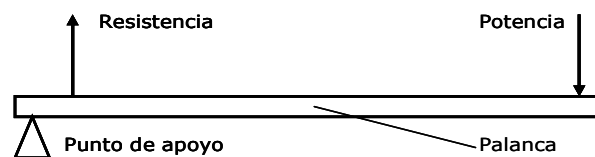


Figura 4.1. Esquema de palanca de segundo género.

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).

4.2. 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 4.2.

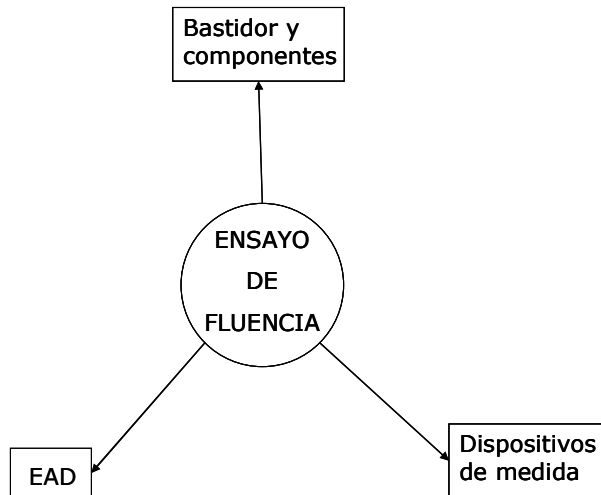


Figura 4.2. Partes del equipo del ensayo de fluencia.

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.

4.2.1. BASTIDOR Y COMPONENTES

El bastidor está conformado por perfiles metálicos y se puede descomponer en las siguientes partes (Figura 4.3):

- 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)

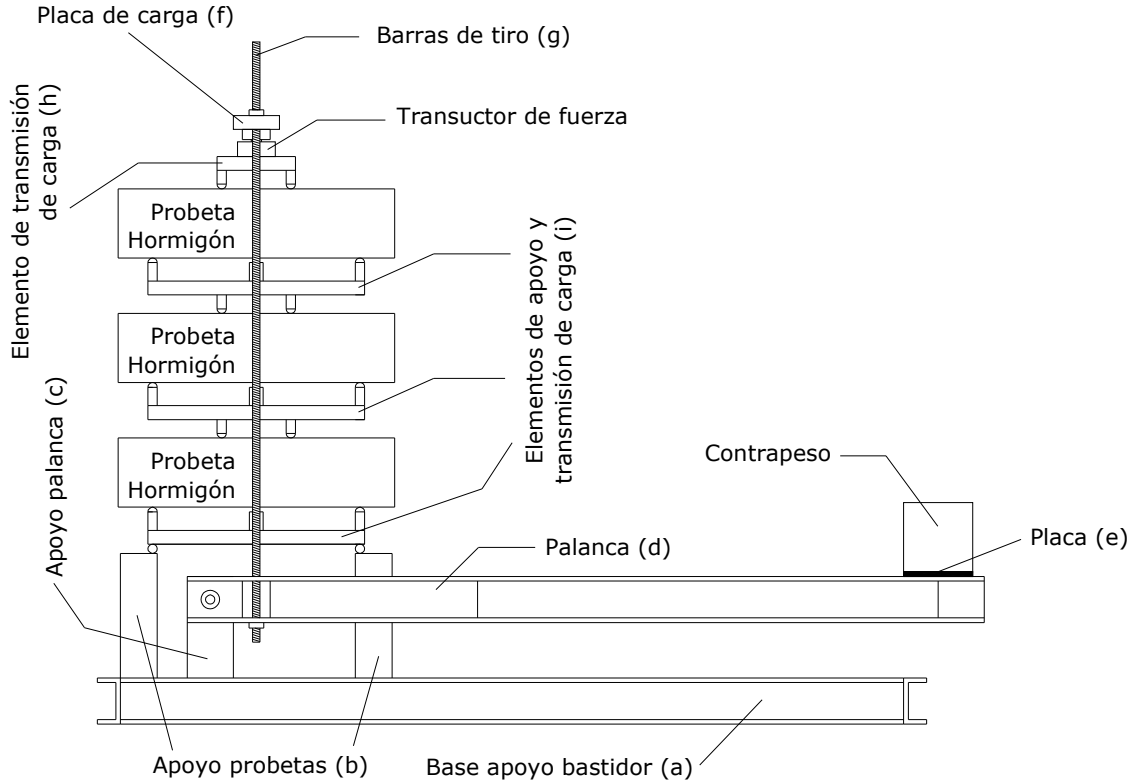


Figura 4.3. Esquema del bastidor.

En la Figura 4.4 se presenta la imagen del bastidor en funcionamiento.

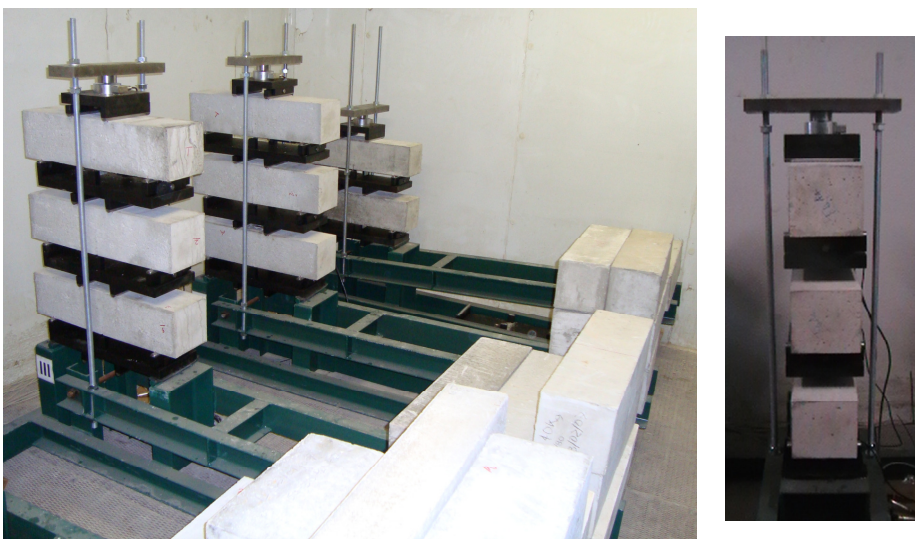


Figura 4.4. Bastidores en funcionamiento (vista general y detalle de columna de probetas).

La base de apoyo (a) está compuesta por cuatro perfiles en planta (dos longitudinales principales y dos más cortos en dirección ortogonal) (Figura 4.5).

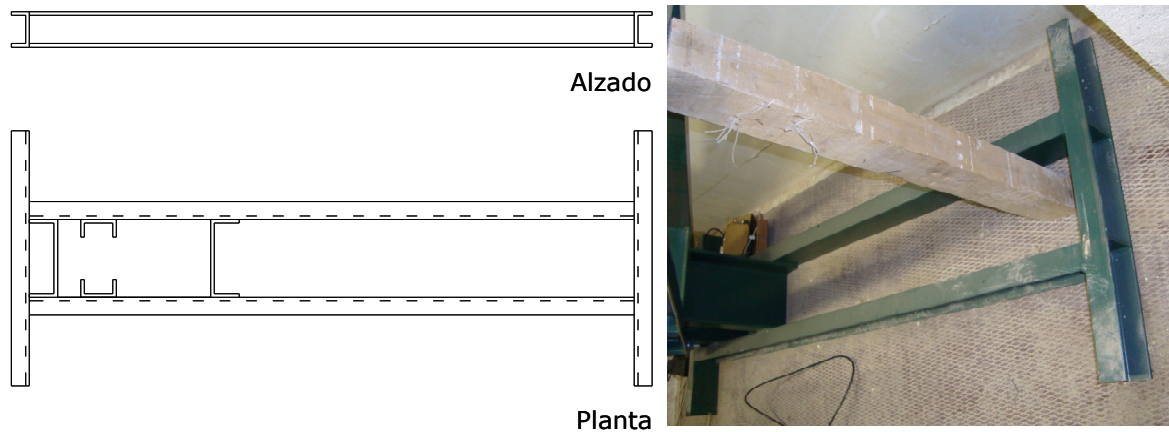


Figura 4.5. Base de apoyo del bastidor (esquema y foto).

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 4.6).

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 4.6. 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.

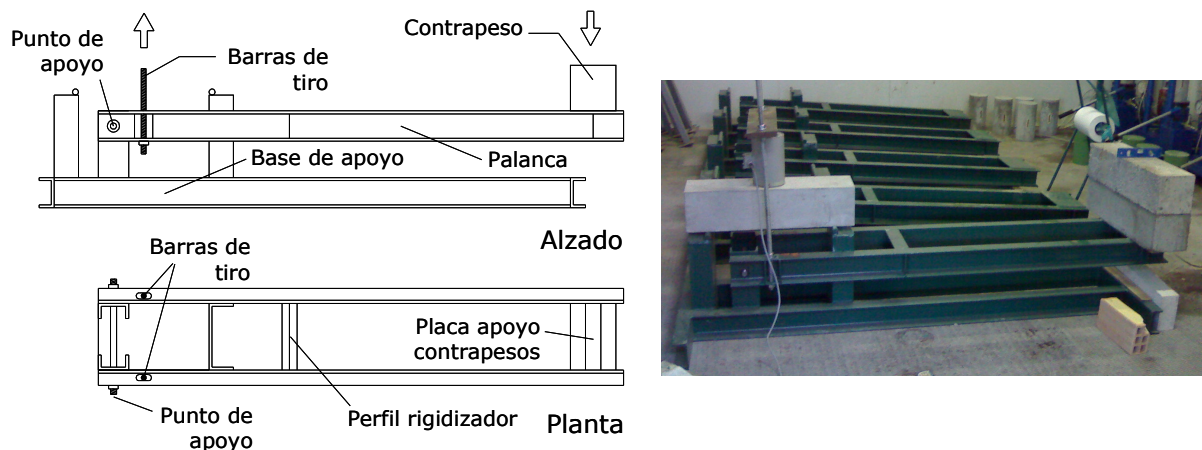


Figura 4.6. Palanca transmisora de carga (esquema y foto).

Adicionalmente se han diseñado elementos para realizar funciones de apoyo y de transmisión de carga entre las probetas (Figuras 4.7 y 4.8).

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 4.7).

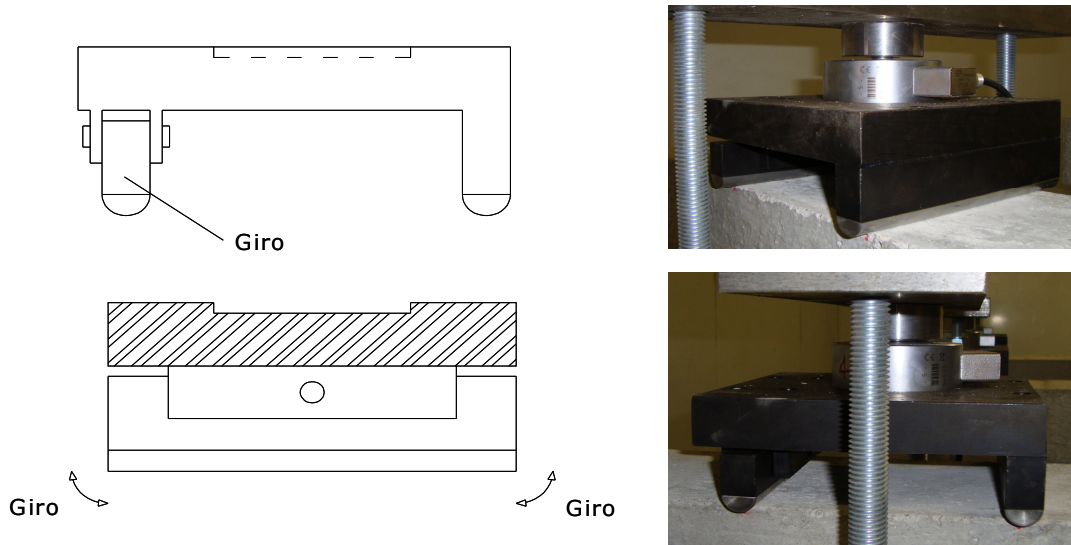


Figura 4.7. Elemento de transmisión de carga (h) a probeta superior (esquema y fotos).

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 4.8).

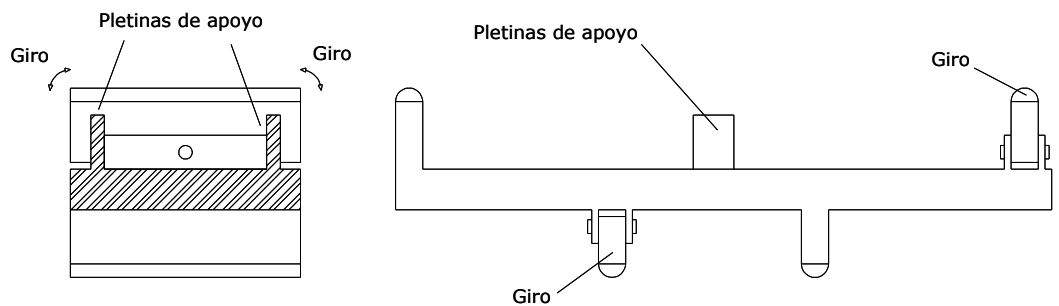


Figura 4.8. Elemento de apoyo y transmisión de carga (i) (esquema y foto).

4.2.2. 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 4.9 se presenta la probeta instrumentada.

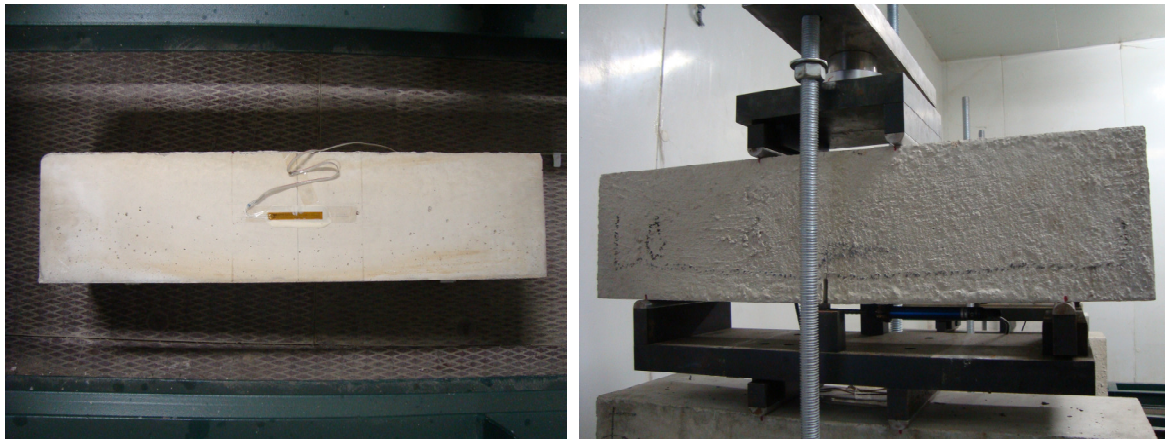


Figura 4.9. Probeta instrumentada, con banda extensométrica en cara superior (izquierda) y transductor de desplazamiento en cara inferior (derecha).

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 4.10). Se dispone entre la placa de carga (f) y el elemento de transmisión de carga a probeta superior (h).

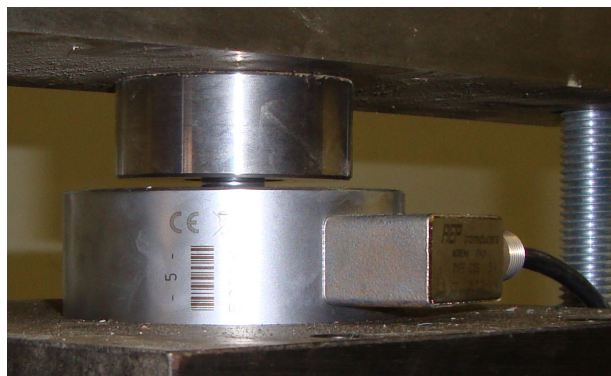


Figura 4.10. Transductor de fuerza.

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 4.11).

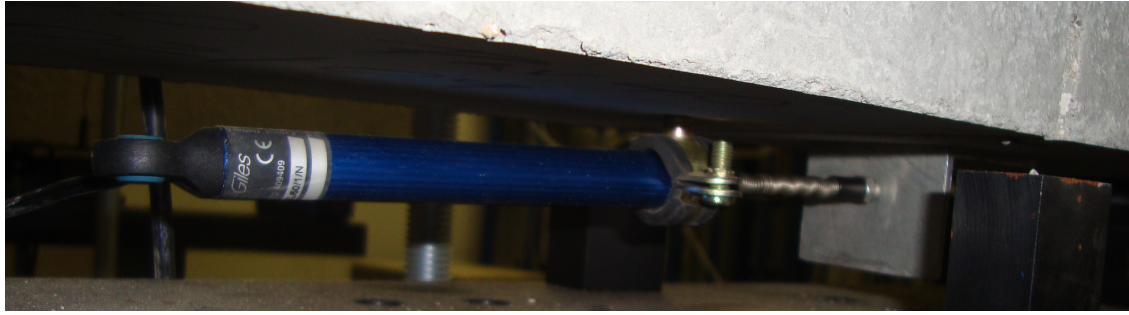


Figura 4.11. Transductor de desplazamiento empleado en la probeta.

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 4.12).



Figura 4.12. 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 4.13), 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 4.13. 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 4.14).



Figura 4.14. Transductor humedad y temperatura Comet T0210.

4.2.3. EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El Equipo de Adquisición de Datos (EAD) se presenta en la Figura 4.15. 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 4.15. 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.

4.2.4. 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 4.16). 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 4.16). Capacidad: 150 litros. Empleada para fabricar los hormigones de las Series 2 y 3.



Figura 4.16. 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 4.17).



Figura 4.17. Moldes empleados.

- Mesa vibrante. Las probetas fabricadas se han compactado mediante vibración externa empleando una mesa vibrante como la presentada en la Figura 4.18.



Figura 4.18. 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 4.19).



Figura 4.19. Cámara húmeda para curado de probetas.

- Sierra de corte húmedo, con la que se ha realizado la entalla a las probetas prismáticas (Figura 4.20).



Figura 4.20. 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 4.21).



Figura 4.21. 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 4.13).

4.3. 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 4.22.

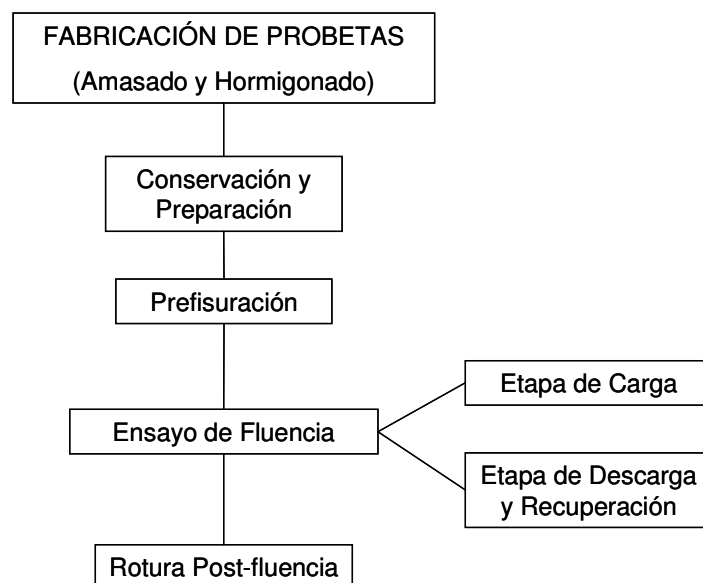


Figura 4.22. Esquema procedimiento operativo de ensayo.

4.3.1. 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).

4.3.2. 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 4.23):

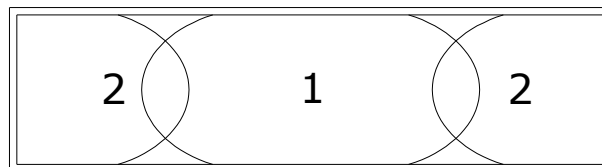


Figura 4.23. Secuencia de llenado del molde (UNE-EN 14651:2007 + A1:2008).

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 4.18).
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.

4.3.3. 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 4.24.
- 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 6.2.1.3 (Figura 4.25 imagen derecha y Figura 4.26).

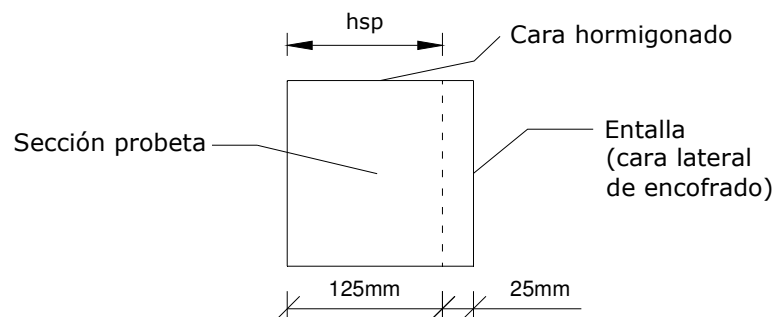


Figura 4.24. Detalle posición entalla respecto de hormigonado.

4.3.4. PREFISURACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYOS DE FLUENCIA

La prefisuración de las probetas se ha realizado siguiendo la metodología para el ensayo de flexotracción (Tabla 4.1 y Figuras 4.25 y 4.26), 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 4.1 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 4.1. 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 4.25 ilustra sendos esquemas de ensayo según UNE-EN 14651:2007 + A1:2008 y según la adaptación realizada para este estudio.

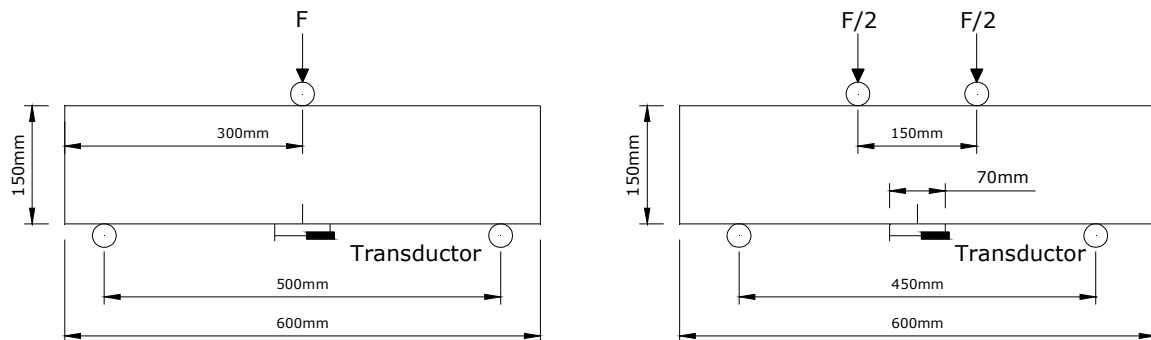


Figura 4.25. Esquema de ensayo a flexotracción según UNE 14651 (izquierda) y según adaptación realizada (derecha).

La Figura 4.26 presenta una imagen del montaje empleado en un ensayo real.



Figura 4.26. Montaje de ensayo a flexotracción empleado en el estudio.

En la Figura 4.27 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 .

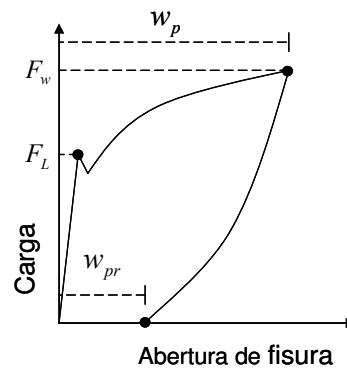


Figura 4.27. Parámetros del proceso de prefisuración.

4.3.5. 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 4.28), 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.

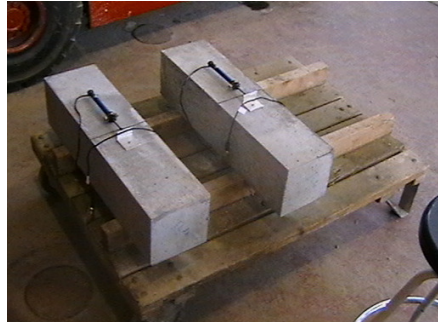


Figura 4.28. Probetas prefisuradas preparadas para ser llevadas a la cámara.

4.3.5.1. 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 4.29).
2. Se ubica el primer dispositivo de apoyo sobre unos neoprenos para mejorar el nivel y la estabilidad sobre los perfiles del bastidor (Figura 4.30).
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 4.31).
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 4.31 y 4.32). Una vez posicionada la tercera probeta (Figura 4.33) 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 4.34).
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 4.35).
13. Se retira el apoyo provisional de madera.
14. Se colocan los contrapesos requeridos para aplicar la carga definida para el ensayo (Figura 4.36). 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.

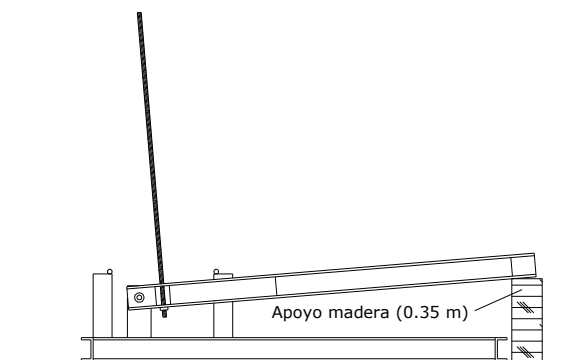


Figura 4.29. Posicionamiento del brazo de la palanca.

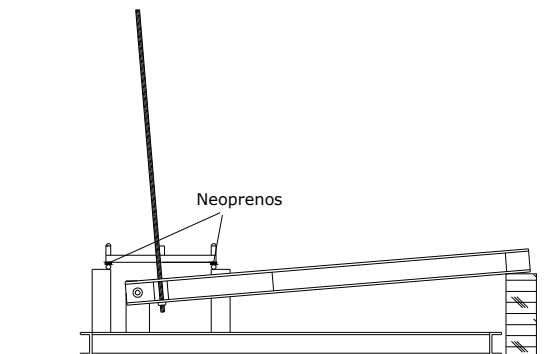


Figura 4.30. Colocación de neoprenos y primer apoyo.

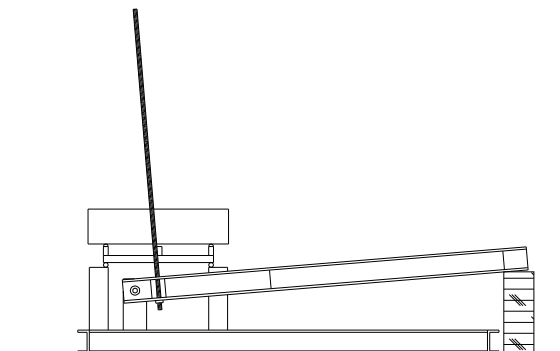


Figura 4.31. Colocación de primera probeta.

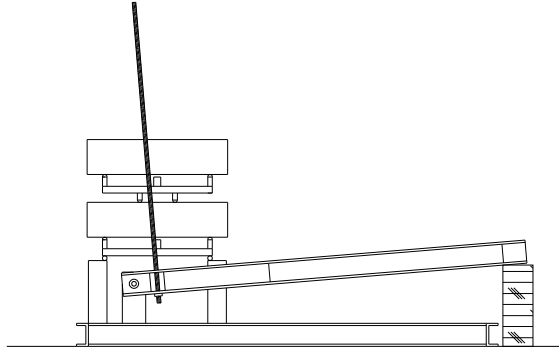


Figura 4.32. Colocación de segunda probeta.

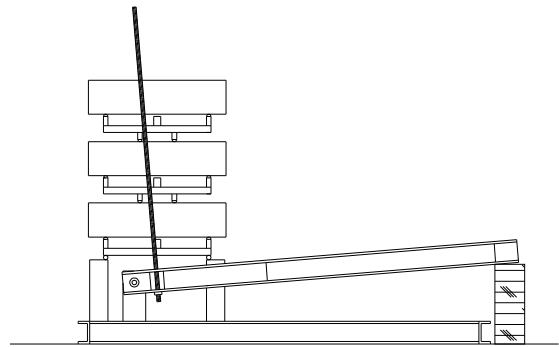


Figura 4.33. Colocación de tercera probeta.

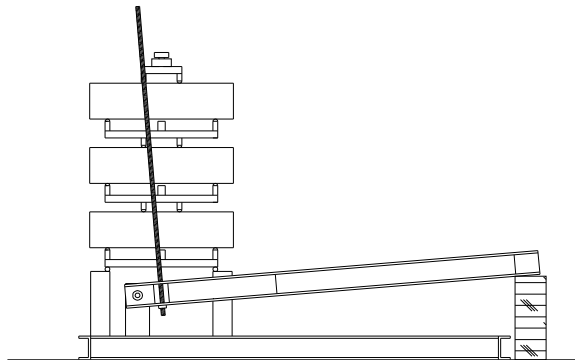


Figura 4.34. Colocación de elemento de carga y célula.

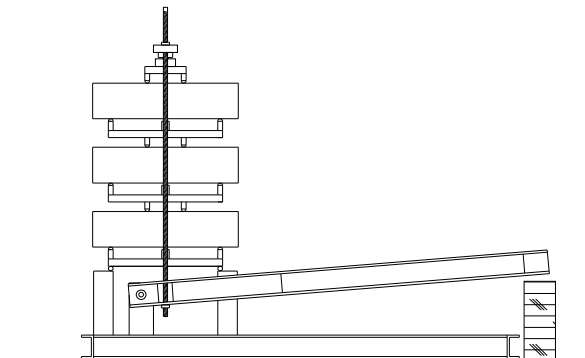


Figura 4.35. Brazo de palanca levantado (por aproximación de las tuercas superiores).

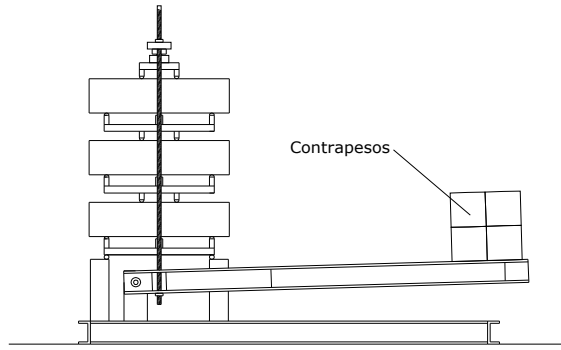


Figura 4.36. Bastidor con contrapesos (en funcionamiento).

En la Figura 4.37 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:

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

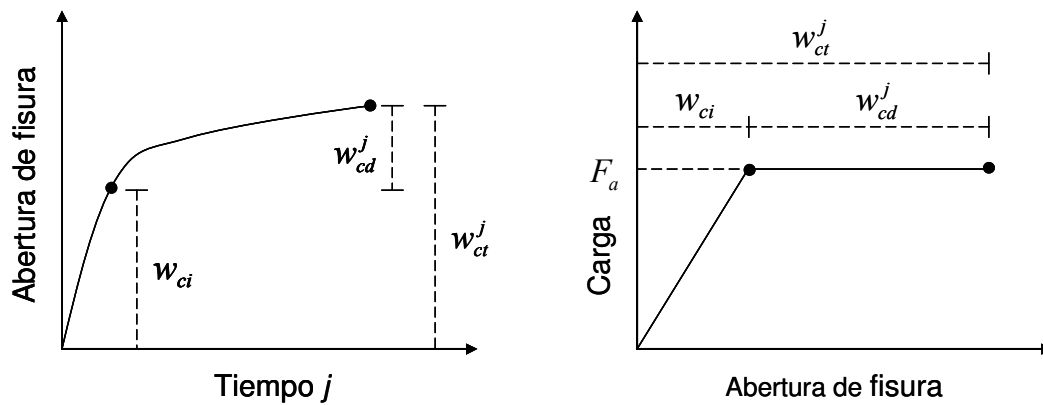


Figura 4.37. Descomposición de parámetros de abertura de fisura en curvas abertura de fisura vs. tiempo y carga vs. abertura de fisura. Etapa de carga.

4.3.5.2. 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 4.38).
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 4.39).
6. Se retiran las probetas del bastidor y se procede a la rotura final de las probetas.

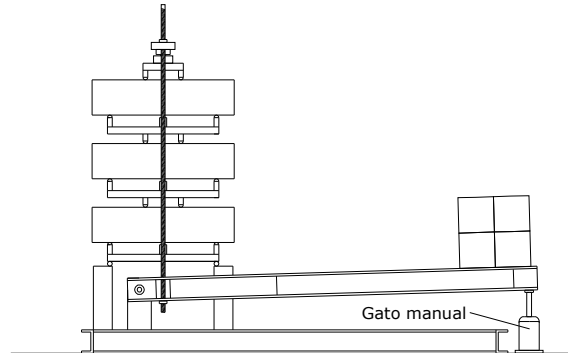


Figura 4.38. Proceso de descarga con gato.

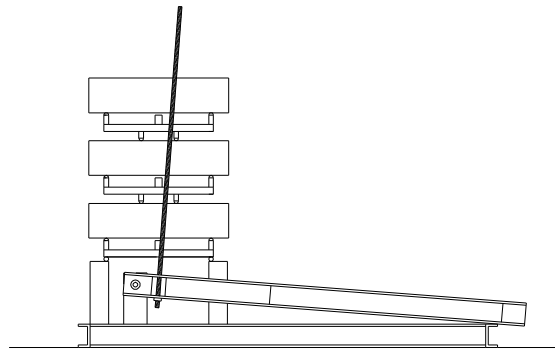


Figura 4.39. Bastidor descargado.

En la Figura 4.40 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.

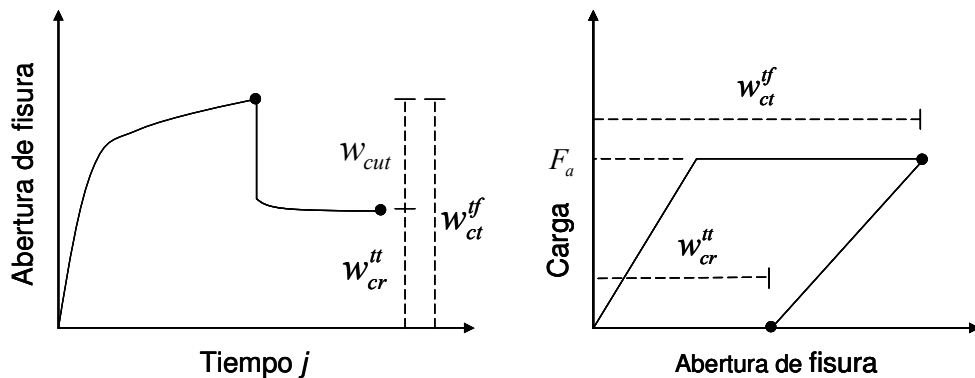


Figura 4.40. Descomposición de parámetros de recuperación de abertura de fisura en curvas abertura de fisura vs. tiempo y carga vs. abertura de fisura. Etapa de descarga y recuperación.

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}^{tt} : abertura de fisura residual al final del ensayo de fluencia (tiempo t_t), 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 4.41):

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

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).

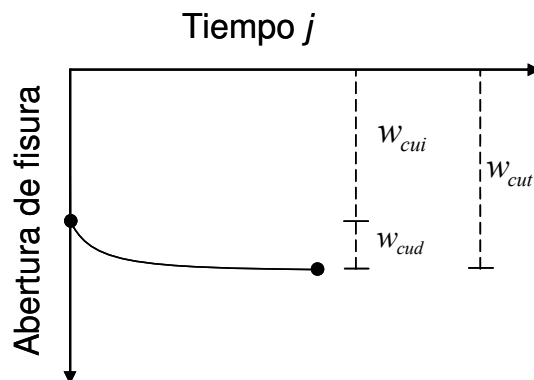


Figura 4.41. Descomposición de parámetros de recuperación de abertura de fisura en curva abertura de fisura vs. tiempo. Etapa de descarga y recuperación exclusivamente.

4.3.6. 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 4.3.4 hasta alcanzar valores de abertura de fisura mayores que 4 mm.

4.4. 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.

4.4.1. 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 conceptualizados en las fases anteriores se elabora un gráfico carga aplicada-abertura de fisura en el que se representa esta evolución (Figura 4.42), de modo que los valores de abertura de fisura pueden referenciarse a origen.

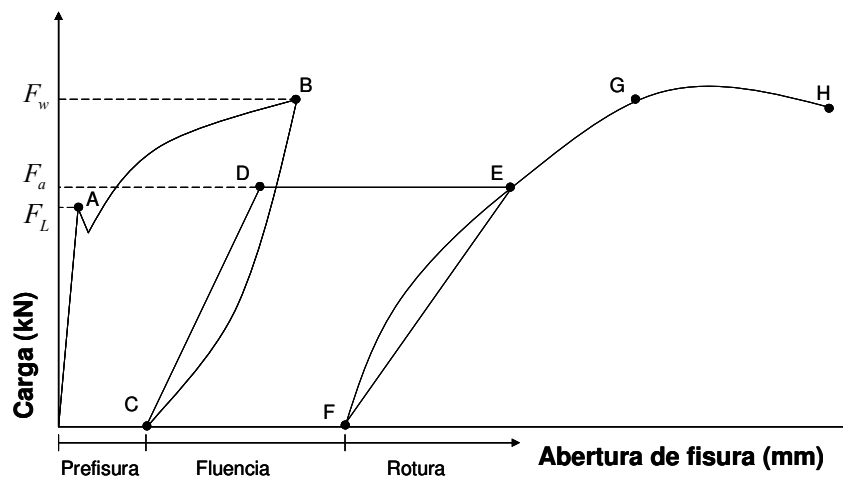


Figura 4.42. Representación gráfica conceptual de resultados de ensayo.

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).

4.4.2. 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 4.43, 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_r .
- 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}^{tf} .

- 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}^{tt} .

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 4.42; 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_{wp} .
- 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 4.42) w_{pci} .
- Abertura de fisura final a origen (abertura para el punto E, Figura 4.42) w_{pc} .
- Abertura de fisura residual a origen (abertura para el punto F, Figura 4.42) 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}^{tf} .
- Deformación total a tiempo final ε_{ct}^{tf} .
- 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}^{tt} .

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	-	
-	BASTIDOR	-	

INFORMACIÓN BÁSICA-ENSAYO DE FLUENCIA	
Hormigón	-
Abertura fisura nominal (w_n)(mm)	-
Nivel de carga teórico (IF_n)(% F_w)	-
Posición en bastidor	-

ENSAYO DE FLUENCIA	
Fecha de puesta en carga	-
Carga aplicada (F_a)(kN)	-
Nivel de carga aplicada (IF_a)(%)	-
Fecha descarga	-
Duración en carga (t_f)(días)	-
Fecha retiro bastidor	-
Duración total ensayo (t_t)(días)	-
Roturas en bastidor	-
Probeta llega a rotura en bastidor	-
Fecha ensayo rotura	-

CURVA COMPLETA (abertura de fisura)	
Zona de Prefisura	
Fecha de entalla	-
Fecha de prefisuración	-
Edad de prefisuración (días)	-
Carga de primera fisura (F_L)(kN)	-
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	-
Abertura de prefisura (w_p)(mm)	-
Carga de prefisura (F_w)(kN)	-
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)	-
Abertura dif. 90 días (w_{cd}^{90})(mm)	-
Abertura dif. final (w_{cd}^{ff})(mm)	-
Abertura total final (w_{ct}^{ff})(mm)	-
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	-
Abertura res. final (w_{cr}^{ff})(mm)	-
Curva de Descarga y Recuperación	
Recuperación inicial (w_{cui})(mm)	-
Recuperación diferida (w_{cud})(mm)	-
Recuperación total (w_{cut})(mm)	-

FABRICACIÓN (Hormigonado)	
Referencia de amasada	-
Fecha de fabricación	-
Fecha de desmoldeo	-

DATOS DE CARACTERIZACIÓN	
Resist. a compresión (f_c)(MPa)	-
Módulo deformación (E_{28})(MPa)	-
Carga a primera fisura (F_L)(kN)	-
Resist. primera fisura (f_{ct})(MPa)	-
Residual a 0.5 mm (f_{r1})(MPa)	-
Residual a 1.5 mm (f_{r2})(MPa)	-
Residual a 2.5 mm (f_{r3})(MPa)	-
Residual a 3.5 mm (f_{r4})(MPa)	-
Abertura carga max (w_{max})(mm)	-
Carga máxima (F_{max})(kN)	-
Carga a nivel prefisura (F_w)(kN)	-
F_{max} / F_L	-
F_w / F_L	-
F_{max} / F_w	-

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	-
Recarga número	-

ANOTACIONES: -

Figura 4.43. Modelo de ficha de ensayo.

4.5. EJEMPLO DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se muestra una propuesta de presentación de resultados que contiene los resultados del proceso de prefisuración (Figuras 4.44 y 4.45), etapas de carga y de descarga y recuperación en ensayos de fluencia (Figuras 4.46 y 4.47), y rotura post-fluencia a flexotracción (Figuras 4.48 y 4.49). Además, se incluyen sendos gráficos carga-abertura de fisura y carga-deformación en compresión con las curvas de ensayo completas obtenidas mediante el ensamblado secuencial de las distintas fases de ensayo (Figuras 4.50 y 4.51), así como una ficha con los resultados de un ensayo (Figura 4.52).

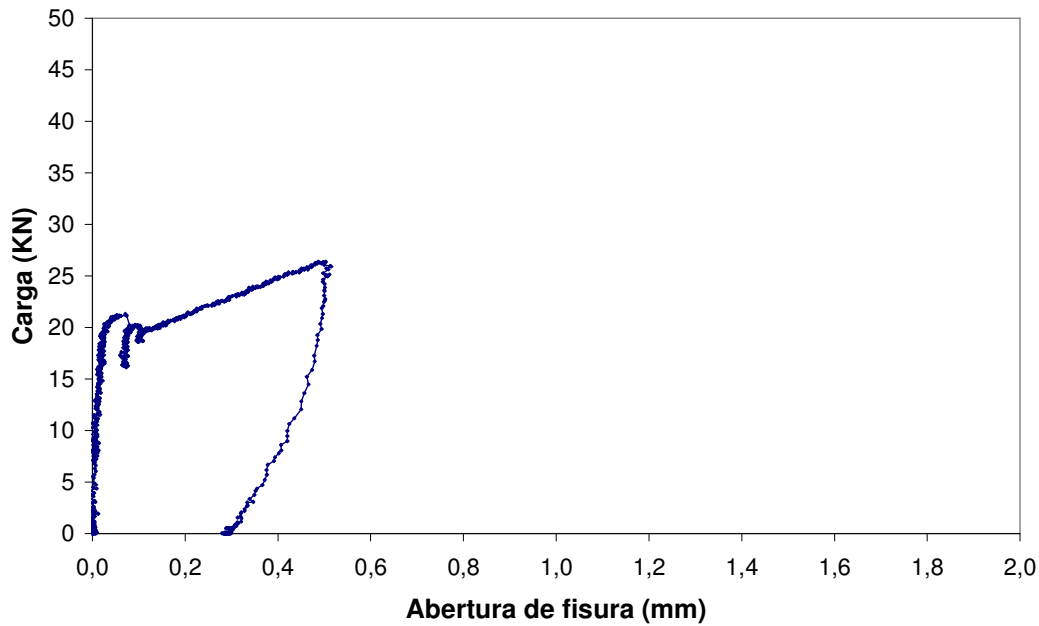


Figura 4.44. Carga-abertura de fisura en proceso de prefisuración.

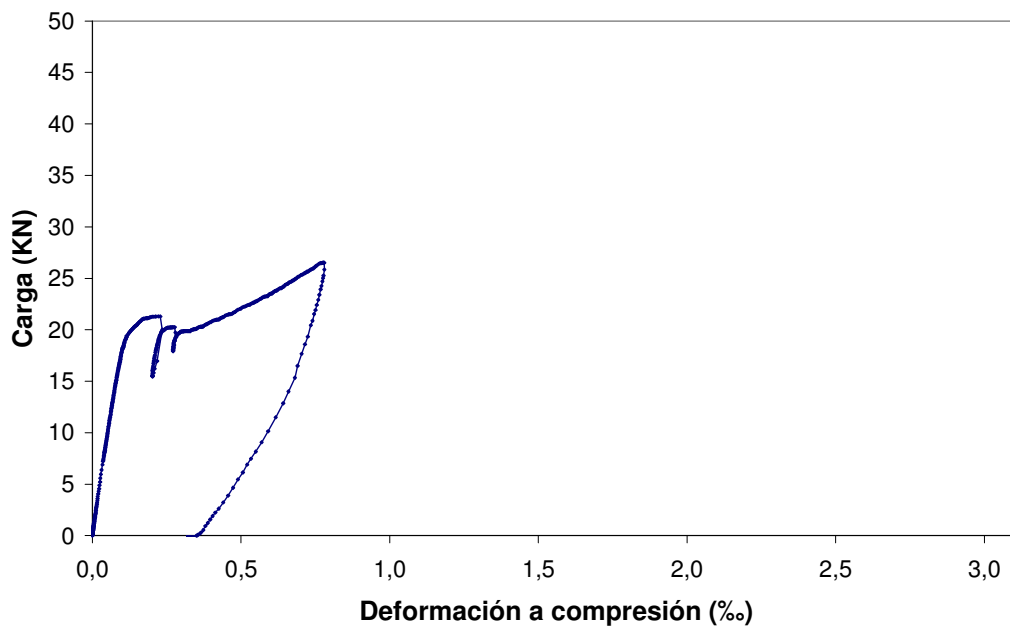


Figura 4.45. Carga-deformación a compresión en proceso de prefisuración.

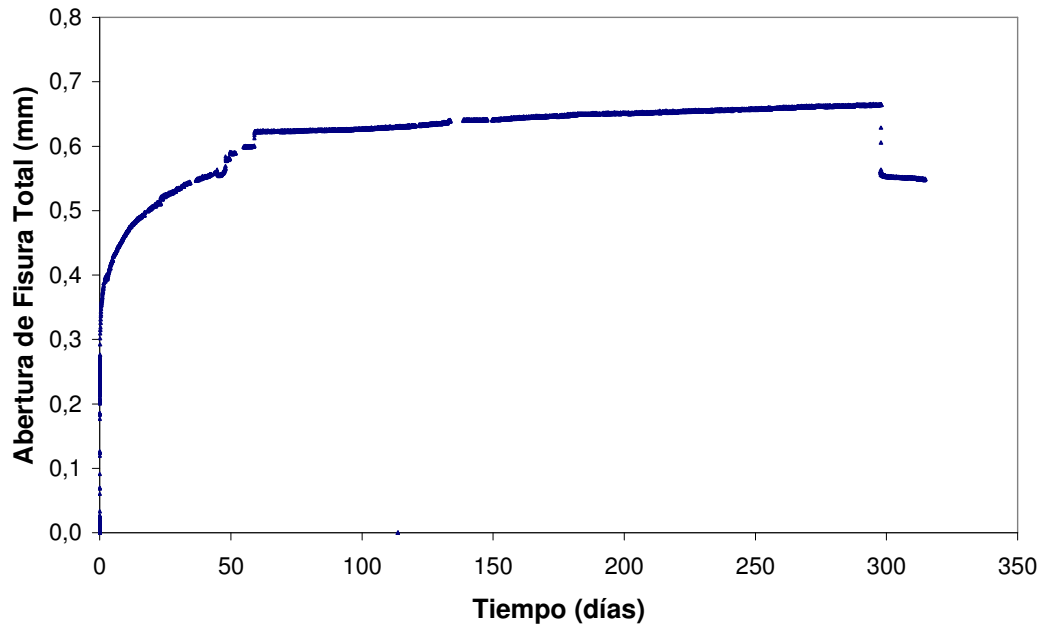


Figura 4.46. Abertura de fisura-Tiempo en ensayo de fluencia.

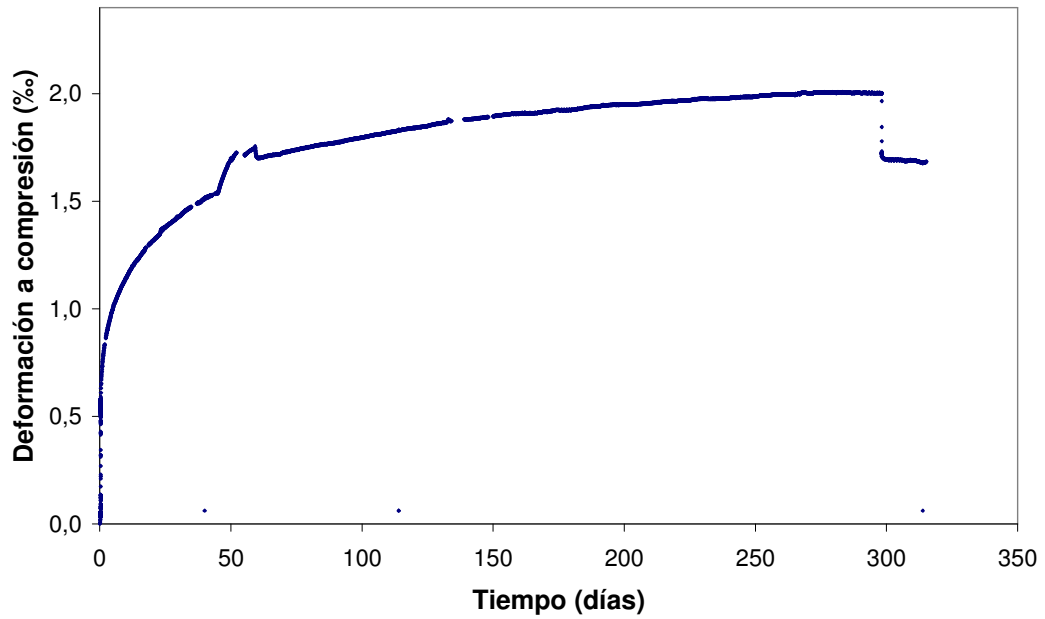


Figura 4.47. Deformación a compresión-Tiempo en ensayo de fluencia.

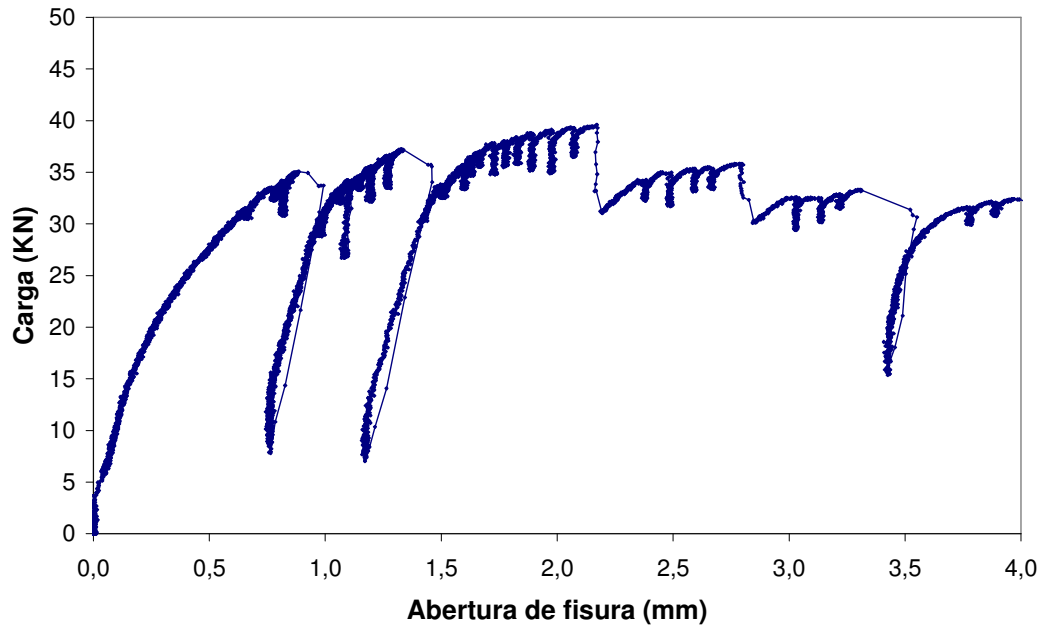


Figura 4.48. Carga-Abertura de fisura en ensayo de rotura post-fluencia.

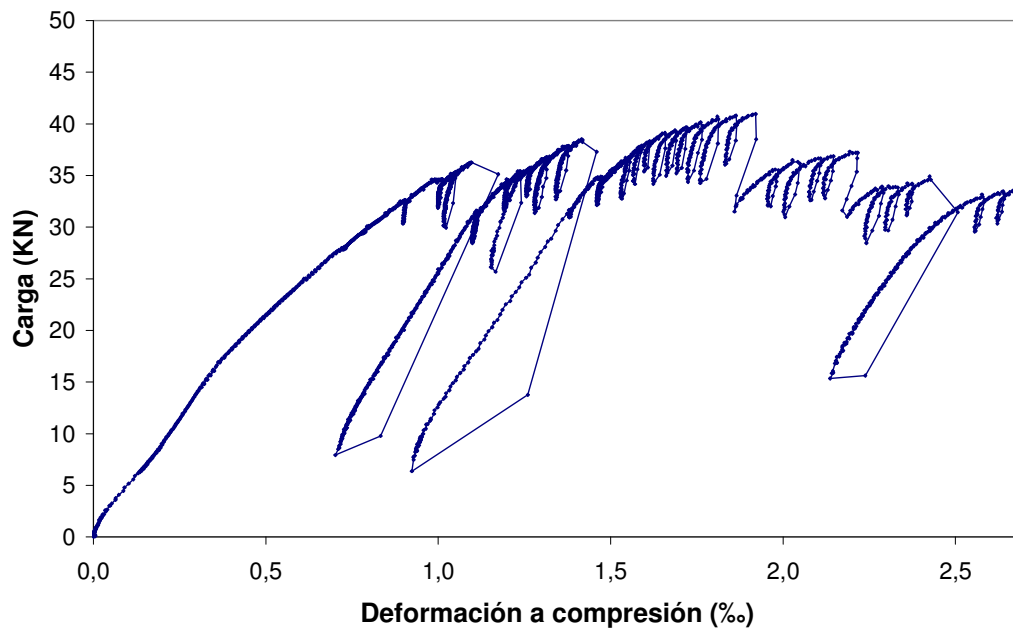


Figura 4.49. Carga-Deformación a compresión en ensayo de rotura post-fluencia.

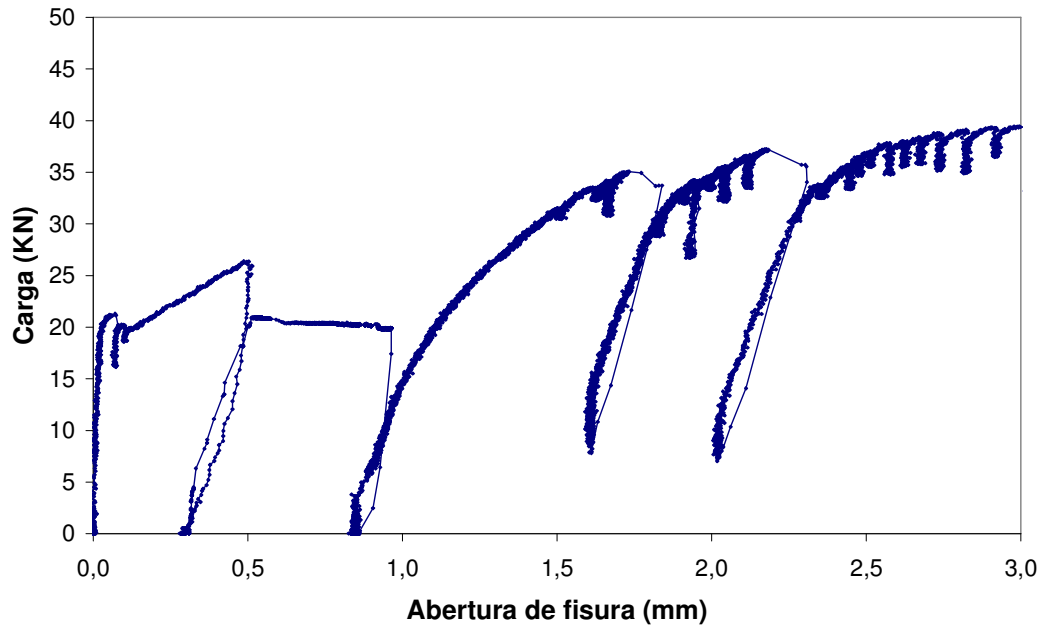


Figura 4.50. Carga-Abertura de fisura en ensayo de fluencia.

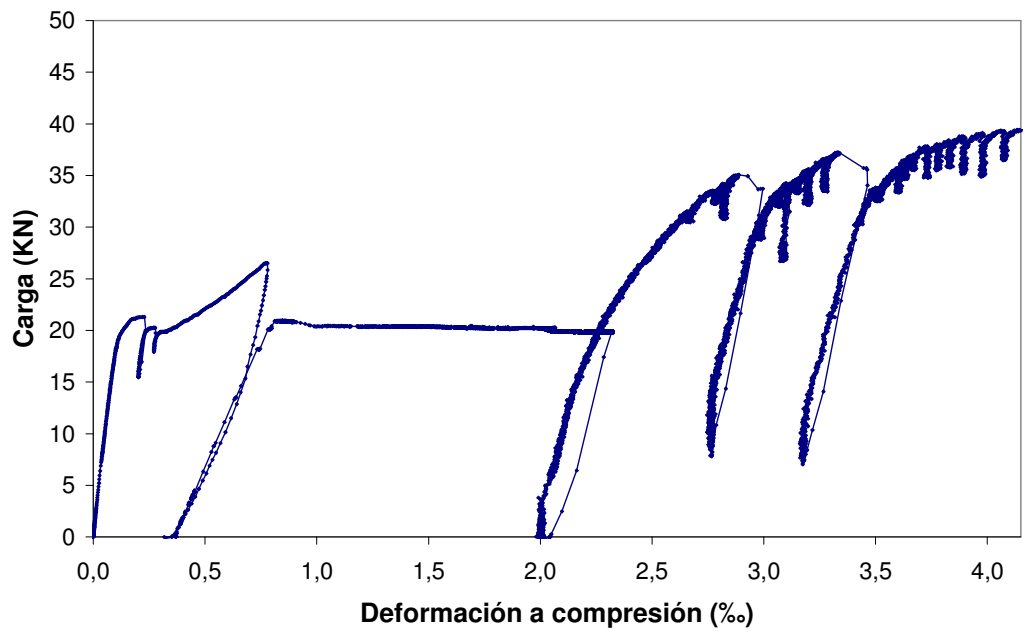


Figura 4.51. Carga-Deformación a compresión en ensayo de fluencia.

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_f)(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_f)(kN)	21,0	
Resist. primera fisura (f_{f1})(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 ($F_{p,max}$)(kN)	39,6	
Abertura carga max ($w_{p,max}$)(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 (apertura 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}^f)(mm)	0,444	
Abertura total final (w_{cd}^f)(mm)	0,664	
Abertura res. inicial (w_{cri})(mm)	0,559	
Abertura res. final (w_{cr}^f)(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_{f1})(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})	0,787	
Def. final (ϵ_{pc})	2,321	
Def. residual (ϵ_{pcr})	1,997	
Zona de Rotura		
Def. carga max ($\epsilon_{p,max}$)	3,917	
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}^f)	1,534	
Def. total final (ϵ_{cd}^f)	2,003	
Def. residual inicial (ϵ_{cui})	1,721	
Def. residual final (ϵ_{cu}^f)	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 4.52. Ficha de ensayo con resultados de ensayo experimental.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se exponen las principales conclusiones de esta Tesina de Master y se recomiendan futuras líneas de investigación.

5.1. CONCLUSIONES

Se ha definido una propuesta metodológica para el análisis experimental de la fluencia en 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.

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.

La metodología permite 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.

A partir de la medición de las aberturas de fisura y de la deformación en compresión del hormigón, se han obtenido resultados experimentales que han permitido verificar la viabilidad de la aplicación de la metodología de ensayo de fluencia que se ha establecido.

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.).

5.2. 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. Desarrollar programa experimental que permita definir y ajustar las variables más representativas del ensayo.
3. Evaluar el comportamiento de los FRC ante este fenómeno, empleando diferentes hormigones (en términos de resistencia a compresión y comportamiento post-fisura), tipos y contenidos de fibra, niveles de carga, niveles y edades de abertura de fisura, y condiciones ambientales (humedad relativa y temperatura).
4. Plantear un modelo de comportamiento y realizar un estudio paramétrico que permita calibrar y validar dicho modelo.
5. 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. and 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 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.
- Altoubat, S. A. y Lange, D. A., "Tensile Basic Creep: Measurements and behaviour at Early Age", ACI Materials Journal, Vol. 98 (5), 2001.
- Anejo 14 de la Instrucción EHE 2008, "Recomendaciones para la utilización de hormigones con fibras", 2008.
- Andresen, P., "Experiments with concrete in torsion", Trans. Am. Soc. of Civil Engineers, pp. 949-983, 1935.
- ASTM A820/A820M-06, "Standard Specification for Steel Fibres for Fiber-Reinforced Concrete", American Society for Testing Materials, 2006.
- 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. and 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.
- Barragán, B. E. and 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., and Kusterle, W., "Kriechversuche an Kunststoffmakrofaserbetonen Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Faserbetonen unter Biegezugbeanspruchung – ein Zwischenbericht", *FASERBETON BEITRÄGE ZUM 11. VILSER BAUSTOFFTAG*, pp. 32-35, 2007.
- Bernard, E. S., "Creep of Cracked Fibre Reinforced Shotcrete Panels", *Shotcrete: More Engineering Developments*, Bernard ed., pp. 47-57, 2004.
- Carmona, S., Gettu, R., and 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. and Roque, O., "Behaviour of Fibre Reinforced Concrete Cracked Section under Sustained Load", *Proceedings of 3rd International Workshop on High Performance Fibre Reinforced Cements Composites*, Mainz (Germany), RILEM Publications, pp. 239-250, 1999.

- Chern, J. C. and 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. and Gopalaratnam, 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. and Kusterle, W., "Compressive Stress-Strain Relationship of Steel Fibre Reinforced Concrete at Early Age", *Cement and Concrete Research*, 2000.
- Fernández Canovas, M. "Hormigón", Rugarte S.L., Madrid, 2002.
- Gettu, R. and 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. and 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. and 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, 1987.
- 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. 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 SFRC", Japanese Society of Civil Engineers (JSCE), 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. and 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. and Cho, R., "Flexural Characteristics of Steel Fibre and Polipropylene Fibre Hybrid Reinforced Concrete", Composites, Vol. 13, 1982.
- Krátký, J., Trtík, K., Vodicka, J. and 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. and 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. and Pigeon, M., "Effect of Steel Macro-fibres on Cracking of Thin Concrete Repairs", Rilem Proceedings 15, BEFIB 2000.
- López, M., "Creep and shrinkage of high performance lightweight concrete: a multi-scale investigation", Doctoral Thesis, Georgia Institute of Technology, 2005.
- Mackay, J. and 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. and Azari, M. M., "Compression Creep Behaviour of Steel Fibre Reinforced Cement Composites," *Materials and Structures*, Vol. 19, No. 113, pp. 361-370, September 1986.
- Massicotte, B., "Fibre Reinforce Concrete: an Structural Perspective", Rilem Proceedings 15, BEFIB 2000.
- 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.
- Neville, A. M., Dilger, W. H. and Brooks, J. J., "Creep of plain and structural concrete", Construction Press, London and New York, 1983.
- Purkiss, J. A. and 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 (UHPFRC): 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.
- Stang, H., Gettu, R. and 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. and 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.
- Tan, K. H. and 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. and 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. and Tan, K. C., "Instantaneous and Long-Term Deflections of Steel Fibre Reinforced Concrete Beams", *ACI Structural Journal*, Vol. 91, Nº 4, July-August 1994².
- UNE 83.507:2004, "Hormigones con Fibras. Rotura por Compresión".
- UNE 83.504:2004, "Hormigones con Fibras. Fabricación y Conservación de Probetas para los Ensayos de Laboratorio".
- 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 12350-2:2006, "Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento".

- 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".
- UNI 11039-2, "Metodo di prova per la determinazione della resistenza di prima fessurazione e degli indicio di duttilità", 2003.
- Wafa, F. F. and Ashour, S.A., "Mechanical Properties of High-Strength Fiber Reinforced Concrete", ACI Mater. J., V. 89, No. 5, pp. 449-455, 1992.
- Yazici, S., Inan, G., and 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. and Wu, K., "Mechanical Properties of Hybrid Fibre-Reinforced Concrete at Low Fibre Volume Fraction", Cement and Concrete Research, (33), 2003.

ANEJO

DESPIECE DE PERFILES Y PLANOS DE BASTIDOR DE FLUENCIA

DESPIECE DE LOS PERFILES

A continuación se detallan todos los perfiles metálicos que componen el dispositivo, especificando la ubicación, número, longitud y peso de cada uno de ellos. Para mayor claridad, en la Figura A1.1 se señala a qué perfiles se hace referencia.

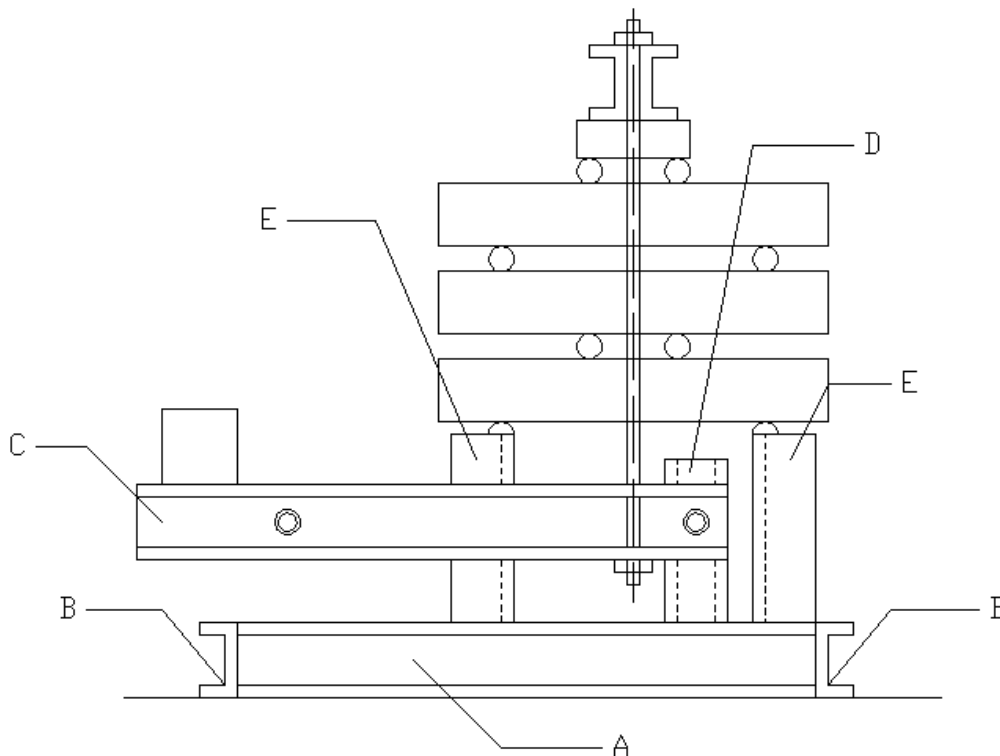


Figura A1.1. Referencias del despiece de perfiles.

A.- Perfiles que apoyan en el suelo en dirección longitudinal.

Perfil	UPN 100
Número	2
Longitud c/u	1.70 m
Densidad lineal	10.6 kg/m
Peso total	36.04 kg

B.- Perfiles que apoyan en el suelo en dirección transversal.

Perfil	UPN 100
Número	2
Longitud c/u	0.72 m
Densidad lineal	10.6 kg/m
Peso total	15.26 kg

C.- Perfiles que constituyen la palanca.

Perfil	UPN 100
Número	2
Longitud c/u	1.73 m
Densidad lineal	10.6 kg/m
Peso total	36.68 kg

D.- Perfiles verticales a los que se une la palanca.

Perfil	UPN 100
Número	2
Longitud c/u	0.32 m
Densidad lineal	10.6 kg/m
Peso total	6.78 kg

E.- Perfiles verticales en los que se apoya la torre de probetas.

Perfil	UPN 220
Número	2
Longitud c/u	0.37 m
Densidad lineal	29.4 kg/m
Peso total	21.76 kg

El peso total de todos los perfiles señalados resulta de 116.52 kilogramos.

PLANOS

Se adjuntan los planos correspondientes al alzado y una vista en planta (sección). Los planos no están escalados pero sí acotados. En todos ellos las cotas vienen dadas en milímetros.

