

# Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas

tesis doctoral realizada por:  
Pablo Pujadas Álvarez

dirigida por:  
Antonio Aguado de Cea  
Sergio Henrique Pialarissi Cavalaro

Barcelona, marzo 2013

Universitat Politècnica de Catalunya  
Departament d'Enginyeria de la Construcció

TESIS DOCTORAL



Curso académico:

## Acta de calificación de tesis doctoral

Nombre y apellidos

PABLO PUJADAS ÁLVAREZ

DNI / NIE / Pasaporte

36522546-H

Programa de doctorado

INGINERIA DE LA CONSTRUCCIÓ

Unidad estructural responsable del programa

## Resolución del Tribunal

Reunido el Tribunal designado a tal efecto, el doctorando / la doctoranda expone el tema de su tesis doctoral titulada

CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS PLÁSTICAS

Acabada la lectura y después de dar respuesta a las cuestiones formuladas por los miembros titulares del tribunal, éste otorga la calificación:

APTA/O     NO APTA/O

(Nombre, apellidos y firma)		(Nombre, apellidos y firma)	
Presidente/a		Secretario/a	
(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)
Vocal	Vocal	Vocal	Vocal

Barcelona, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2013

El resultado del escrutinio de los votos emitidos por los miembros titulares del tribunal, efectuado por la Escuela de Doctorado, a instancia de la Comisión de Doctorado de la UPC, otorga la MENCIÓN CUM LAUDE:

SI     NO

(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)
Presidenta de la Comisión de Doctorado	Secretaria de la Comisión de Doctorado

Barcelona, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2013.



*Si tu veux être un chercheur de la vérité vraie,  
il est nécessaire qu'au moins une fois dans votre vie vous en doutez,  
autant que possible, toutes les choses.*

*(Rene Descartes, 1596-1650)*



*Como profesor gozaste siempre de la admiración de tus compañeros y alumnos. Una excelsa trayectoria profesional como catedrático e investigador, trabajador incansable y ejemplo de rigor y excelencia acompañarán siempre tu nombre.*

*Sin embargo, eras para nosotros mucho más que un mero profesor. Siempre fuiste la cara más humana de la Escuela, el catedrático más accesible, el apasionado maestro que mantuvo viva nuestra ilusión por aprender y el fiel amigo que nos regalaba sus más sabios y sinceros consejos.*

*La puerta de tu despacho siempre abierta de par en par, siempre atento y dispuesto a recibir con una amable sonrisa a tus alumnos, a sabiamente aconsejar a tus doctorandos y hablar de lo divino y de lo humano con, como nos llamabas, tus “niños”.*

*...portaos mal!...nos solías decir los viernes. Jamás olvidaremos esa moderna y particular adaptación del carpe diem quam minimum credula postero, otrora acuñada por el célebre poeta romano Horacio. Porque la vida está llena de obstáculos y dificultades, y tú siempre nos empujaste a afrontar el futuro con esperanza y optimismo, nos enseñaste a vivir intensamente cada momento y afrontar la vida con entusiasmo y alegría. Porque nos adoctrinaste en la filosofía de sonreírle a la vida, como le sonreías tú, y de que, como dijo Shakespeare, y a menudo nos recordabas, es más fácil obtener lo que se desea con una sonrisa que con la punta de la espada.*

*Luis, tu bondad y grandeza, únicamente puede medirse por el enorme vacío que has dejado en nuestros corazones. Son muchas las sinceras y sentidas palabras que nos gustaría dedicarte en nombre de todos los alumnos, doctorandos, post-docs,...que hemos pasado por tus manos, pero no es fácil. Sin embargo hay, algo que, por desgracia, pocos pudimos decirte en vida: gracias. Gracias por el legado que nos dejas, gracias por tu apoyo incondicional, por tu proximidad con los jóvenes, gracias por enseñarnos unos valores y ser, para nosotros, como un padre en la Universidad.*

*Vivir es lo más complicado que tiene la vida, y tú has logrado caminar por ella dejando huella. Tu encomiable labor como maestro, consejero y amigo de tus alumnos perdurarán en el recuerdo de todos quienes tuvimos la fortuna de conocerte y aprender de ti.*

*Lluís Agulló Fité, descansa en paz, tu recuerdo y legado vivirá siempre en nosotros.*



## AGRADECIMIENTOS

Mi mayor agradecimiento debo dirigirlo a Antonio Aguado, él me sedujo para emprender la aventura del doctorado, y durante todo este tiempo mantuvo siempre viva en mí la ilusión por aprender. De él he aprendido mundo e ingeniería y me congratula enormemente poder considerarme discípulo y amigo suyo. Gracias por ser mi maestro y por confiar ciegamente en mí.

A Sergio Henrique Pialarissi, siempre atento y dispuesto a recibir con una amable sonrisa a tu amigo, y a sabiamente aconsejar a tu doctorando. Muchos de los contenidos de esta tesis se han perfilado en nuestras reuniones en el B1, y tus comentarios y correcciones han enriquecido profundamente el contenido de esta Tesis y de los artículos que de ella derivan.

Antonio y Sergio han sido los mejores tutores que podía haber tenido, su constante orientación, valiosos comentarios y sugerencias en cada una de las etapas de mi doctorado han sido el motor de esta tesis. Su atención, plena dedicación y cercanía son un ejemplo que ha dejado en mí una profunda huella.

Esta tesis no hubiera sido posible sin la inestimable ayuda de mi amigo y preceptor Albert de la Fuente, pieza clave del *Team fibras*. Siempre dispuesto a solventar cualquier duda y plantear nuevas. Sin su ayuda y propuestas de mejora nada hubiera sido posible.

Agradezco a Tomas García su acertada colaboración durante toda la campaña experimental. Asimismo, al resto del personal del Laboratorio de Tecnología de Estructuras por su buena disposición y amabilidad en todo momento, y muy en especial a Camilo Bernad, Robert Micheal Mc-Aloon y Jordi Cabrerizo. También quiero agradecer todas las gestiones administrativas que han realizado para mí Montse, Carmeta, Mercè, Carme, Bea y Sandra, siempre atentas, amables y pacientes conmigo desde el primer día.

Quiero hacer una mención especial al profesor Antonio Figueiredo y agradecerle que haya compartido sus conocimientos y experiencia conmigo. *I would like to thank Professor Walraven and Professors Blom and Grunewald for their unbelievable kindness, for giving me the opportunity to work for 6 months at TU Delft and for sharing their knowledge with me in so many subjects.*

Me gustaría agradecer a todos mis amigos y compañeros los años que hemos pasado juntos en este largo y duro reto que supone el doctorado. Entre todos nos hemos hecho mejores y más fuertes. André Campos, Ahmed Elyamani, Filipe Laranjeira, Francisco Mena, Francesc Pardo, Ignacio Segura, Isaac Galobardes, Júlia Gómez, Juliana Veras, Luca Pela, Luis Segura, Martha Alejandra y Ricardo Pieralisi vuestro apoyo y consejo han ayudado, sin duda a enriquecer esta tesis. *I would also like to thank my "Delft friends" Nima Sharif, Kassahun Kindu, Sepher Eslami and Yuguang Yang for their unbelievable kindness and unconditional support.*

Quiero acordarme también de Nayara Soares Klein en quien he encontrado una amiga para siempre y de quien admiro su valentía, con ella he pactado despegar y nunca más aterrizar.

Quiero dedicar un especial agradecimiento a *aBa* quien me ha escuchado, comprendido y apoyado incondicionalmente. *Aprendre i compartir experiències amb tu ha posat el dolç toc salat a aquest doctorat.*

Tampoco sería justo olvidar a mi prima y amiga Ana con quien he estudiado, sufrido y disfrutado del éxito, y con quien formo un equipo inmejorable; a mi primo José Luis, quien tuvo la elegancia y generosidad de apadrinar mi entrada en esta Universidad y en quien siempre he encontrado un modelo a seguir; a mis tíos, a quienes admiro y aprecio profundamente; y a mis abuelos, con quienes tengo el firme compromiso de no defraudarles.

He dejado para el final de esta breve relación de agradecimientos a las personas más importantes, mis padres, Nati y Luis, por enseñarme que la perseverancia y el esfuerzo son el camino para lograr objetivos. Sólo ellos saben el trabajo que he realizado para llegar hasta aquí y todo ello no habría sido posible sin su incondicional apoyo, ayuda y colaboración. Ellos siempre han estado presentes en los momentos difíciles y desde aquí les reitero mi gratitud. Ellos son para mí los verdaderos héroes del día a día.

A todos, gracias.



**Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas**

Pablo Pujadas Álvarez

Departamento de Ingeniería de la Construcción - ETSECCPB

Universitat Politècnica de Catalunya - Barcelona Tech

**RESUMEN**

En esta Tesis Doctoral se abordan aspectos de gran interés en relación a la caracterización del HRF, la definición de una ecuación constitutiva considerando la orientación de las fibras, y el comportamiento diferido del material. Con ello se pretende contribuir a abrir el camino definitivo del HRF como posible material de refuerzo frente a las tracciones en elementos con clara responsabilidad estructural y superar, de este modo, las barreras que existen en la actualidad.

En primer lugar se analiza la validez de las metodologías de diseño propuestas en las distintas normativas y se evalúan los modelos constitutivos que en ellas se proponen. Para ello se han realizado dos campañas experimentales a escala real: la primera sobre elementos tipo vigas de hormigón reforzados con armadura mixta, es decir macro-fibras plásticas y armadura convencional y la segunda sobre losas hiperestáticas reforzadas únicamente con macro-fibras plásticas.

En dicho análisis se ha observado que los planteamientos de análisis inversos tradicionalmente utilizados en dichas normativas conducen a una clara sobreestimación de los resultados experimentales para elementos únicamente reforzados con fibras plásticas. Ello es debido a que la configuración de los ensayos de caracterización a flexotracción y la geometría y orientación de las fibras en las probetas prismáticas utilizadas no son representativas de los elementos tipo losa. Así mismo, las ecuaciones constitutivas de EHE y RILEM (trilineal y multilínea), son excesivamente optimistas para el cálculo de elementos únicamente reforzados con fibras plásticas. Todo ello pone de manifiesto la necesidad de revisar los modelos constitutivos propuestos en las normativas para el HRF y proponer una nueva ecuación constitutiva para el diseño basada en una filosofía diferente.

Como pasos previos hasta la definición de la nueva ecuación constitutiva con la que superar los inconvenientes de los enfoques actuales, se ha desarrollado un modelo analítico para convertir el desplazamiento de pistón ( $\delta$ ) en *TCOD*, eliminando la necesidad de emplear la cadena extensométrica en el ensayo Barcelona. Adicionalmente, se ha propuesto un nuevo ensayo de caracterización (MDPT) con el que determinar la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción del HRF teniendo en cuenta de manera indirecta la orientación de las fibras según tres direcciones principales. Ambas propuestas se han validado en base a campañas experimentales con probetas y testigos de HRF.

Finalmente, se presenta y valida un nuevo planteamiento directo para predecir la respuesta postfisuración del HRF a partir del ensayo *MDPT*. La nueva filosofía tiene sentido físico y refleja de forma fidedigna el comportamiento a tracción del material, considerando la orientación de las fibras bajo las condiciones reales de puesta en obra y geometría de la estructura.

El comportamiento diferido del HRF no debe convertirse en un inconveniente para el uso de este material siempre y cuando la consideración de sus efectos sea contemplada en el diseño estructural. Por ello, la Tesis se completa con el estudio de las deformaciones diferidas que se producen en elementos fisurados de HRF cuando están sometidos a cargas de larga duración. Para ello se ha realizado una campaña experimental con la que se evalúa la influencia del nivel de carga y fisuración en el rendimiento a largo plazo del material bajo cargas mantenidas en el tiempo y se propone un modelo para predecir el comportamiento diferido de los HRF en base a los resultados obtenidos.

## Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas

Pablo Pujadas Álvarez

Departamento de Ingeniería de la Construcción - ETSECCPB

Universitat Politècnica de Catalunya - Barcelona Tech

### ABSTRACT

This thesis discusses issues of great interest for the design of PFRC regarding its characterization, the definition of a constitutive equation for PFRC that takes into account the orientation of fibers and its long-term behavior.

First, in addition to reviewing the key technical papers on the definition of constitutive equations, a detailed analysis of the main regulatory models proposed Europe-wide for the use of structural fibre-reinforced concrete is done. The intention is to provide an overview of the most relevant aspects of these models and the conceptual grounds on which they were developed. A detailed comparative study was conducted to determine the capacity of each model analyzed to predict PFRC structural behaviour. In this part, two real scale experimental campaigns are conducted: the first one with beams reinforced with both, macro-plastic fibers and conventional reinforcement and the second on hyperstatic slabs only reinforced with macro-plastic fibers. The results of the experimental campaigns are compared to the numerical results obtained with the constitutive equations analyzed.

The inverse analysis approaches traditionally used for design of FRC lead to a clear overestimation of the experimental results in the case of the real-scale slabs, which were only reinforced with plastic fibres. This may be attributed to the characterization tests (flexural tests on small beams), whose test setup, geometry of the specimens and the fiber orientation are not representative of the real-scale slabs. Likewise, the constitutive equations proposed by RILEM and EHE (trilinear and multilinear, respectively) are overly optimistic for the design of PFRC elements. This highlights the need to review the existing constitutive models for PFRC and propose a new constitutive equation, based on a different philosophy.

As the first step to obtain a constitutive equation that overcomes the drawbacks of the existing approaches, an analytical model to transform the axial displacement ( $\delta$ ) into TCOD in the Barcelona test is developed (eliminating the need to use in the chain gage). In addition to that, a new characterization test (MDPT) is proposed to determine the cracking strength, toughness and tensile residual strength of the PFRC indirectly considering the fiber orientation in three main directions. Both proposals are validated with experimental results.

Finally, a new direct approach to predict the PFRC postcracking response by means of the MDPT test is presented and validated. The rational and comprehensive new approach provides physical insight that may be gathered into a straightforward procedure, in which the real orientation of the fibers (according to the casting method and the geometry of the structural application) is considered to obtain the tensile behavior of the material.

Creep behavior of PFRC must not become an inconvenience for the use of this material as long as its effects are considered in the structural design. Thus, this thesis includes the study of long-term deformations occurring in cracked specimens of FRCP when subjected to long-term loading. An experimental campaign is carried out in order to evaluate the influence of load and cracking levels in the long-term performance of the material under maintained load over time. Based on the results, a simple model to predict the creep behavior of PFRC is proposed.



# ÍNDICE GENERAL

## **Capítulo 1: Introducción**

1.1	Introducción .....	1
1.2	Razón de ser .....	2
1.3	Objetivos .....	3
1.3.1	Objetivos generales .....	3
1.3.2	Objetivos específicos .....	4
1.4	Metodología y organización de la tesis .....	5

## **Parte I: Motivaciones**

### **Capítulo 2: Estado del conocimiento**

2.1	Introducción .....	9
2.2	Macro fibras plásticas estructurales .....	10
2.3	Métodos para la caracterización del HRF .....	11
2.3.1	Características y criterios .....	11
2.3.2	Ensayos de caracterización .....	11
2.4	Ecuaciones constitutivas .....	12
2.4.1	Criterios para su obtención .....	13
2.4.2	Ecuaciones constitutivas propuestas en la literatura técnica .....	15
2.4.3	Modelos constitutivos normativos .....	17
2.5	Comportamiento diferido del hormigón .....	24
2.5.1	Componentes y mecanismos de la fluencia .....	24
2.5.2	Deformaciones diferidas en el HRF a flexión .....	25
2.5.3	Fluencia de las fibras plásticas .....	27

## **Parte II: Validación de los enfoques actuales**

### **Capítulo 3: Elementos tipo viga con armadura mixta**

3.1	Introducción .....	29
3.2.1	Razón de ser y objetivos .....	30
3.2.2	Organización del capítulo .....	30
3.2	Campaña experimental .....	31
3.2.1	Elementos a ensayar .....	31
3.2.2	Materiales y dosificaciones .....	31
3.2.3	Caracterización en estado endurecido .....	32
3.2.4	Proceso de fabricación .....	34
3.2.5	Configuración del ensayo .....	35
3.2.6	Instrumentación .....	37

3.2.7	Metodología de ensayo.....	38
3.2.8	Incidencias .....	39
3.3	Resultados.....	40
3.3.1	Número y separación de fisuras.....	40
3.3.2	Ancho de fisura .....	45
3.3.3	Flecha .....	50
3.4	Análisis comparativo de los modelos constitutivos.....	53
3.4.1	Modelo numérico para la simulación del ensayo.....	54
3.4.2	Metodología y consideraciones realizadas .....	56
3.4.3	Contrastación de los resultados experimentales y numéricos .....	57
3.5	Conclusiones .....	59

#### **Capítulo 4: Elementos tipo losa bajo configuración hiperestática**

4.1	Introducción.....	61
4.1.1	Razón de ser y objetivos .....	62
4.1.2	Organización del capítulo.....	62
4.2	Campaña experimental.....	62
4.2.1	Elementos a ensayar.....	62
4.2.2	Materiales y dosificaciones.....	63
4.2.3	Proceso de producción .....	64
4.2.4	Caracterización en estado endurecido .....	66
4.2.5	Transporte y acopio.....	67
4.2.6	Configuración y procedimiento de ensayo .....	68
4.2.7	Instrumentación .....	69
4.2.8	Tratamiento previo de los datos .....	70
4.3	Análisis del comportamiento mecánico.....	74
4.3.1	Análisis estructural .....	74
4.3.2	Fisuración.....	76
4.4	Modelo 3D de las losas en elementos finitos .....	78
4.4.1	Modelo .....	79
4.4.2	Geometría y condiciones de contorno .....	79
4.4.3	Generación de malla .....	80
4.4.4	Propiedades de los materiales .....	80
4.5	Comparación de los resultados numéricos y experimentales.....	81
4.5.1	Curvas carga-flecha.....	81
4.6	Conclusiones .....	84

#### **Capítulo 5: Estudio paramétrico de la ecuación constitutiva**

5.1	Introducción.....	87
5.1.1	Razón de ser y objetivos .....	88
5.1.2	Organización del capítulo.....	88
5.2	Estudio paramétrico preliminar.....	89
5.2.1	Casos de estudio .....	89
5.2.2	Influencia de las variables $\sigma_2$ ; $\varepsilon_2$ ; $\sigma_3$ y $\varepsilon_3$ .....	89
5.3	Estudio paramétrico completo.....	92
5.3.1	Variables de estudio .....	92
5.3.2	Influencia de las variables $\sigma_2$ ; $\varepsilon_2$ ; $\sigma_3$ .....	93
5.4	Ajuste numérico de los parámetros.....	97
5.4.1	Curvas numéricas .....	97
5.4.2	Análisis detallado de las ecuaciones constitutivas obtenidas.....	99
5.4.3	Propuesta de parámetros geométricos .....	102
5.5	Conclusiones .....	104

### ***Parte III: Nueva filosofía para la caracterización del HRFP***

#### **Capítulo 6: Generalización del ensayo Barcelona**

6.1	Introducción.....	105
-----	-------------------	-----

6.1.1	Razón de ser y objetivos .....	106
6.1.2	Organización del capítulo .....	107
6.2	Ensayo Barcelona para la caracterización del HRF .....	107
6.3	Propuesta de generalización del ensayo Barcelona .....	108
5.3.1	Correlación TCOd-desplazamiento de pistón .....	108
5.3.2	Parámetros involucrados y formulación desarrollada.....	114
6.4	Estudio paramétrico .....	115
6.4.1	Longitud y ángulo de la generatriz del cono formado .....	115
6.4.2	Influencia del número de fisuras .....	118
6.5	Validación del modelo.....	118
6.5.1	Materiales y dosificación .....	119
6.5.2	Parámetros de entrada en el modelo .....	119
6.5.3	Resultados obtenidos con el modelo propuesto .....	120
6.5.4	Comparación con el modelo propuesto por Carmona <i>et al.</i> .....	123
6.6	Conclusiones .....	125

### **Capítulo 7: Ensayo de caracterización multidireccional**

7.1	Introducción .....	127
7.1.1	Razón de ser y objetivos .....	127
7.1.2	Organización del capítulo.....	128
7.2	Ensayo de caracterización multidireccional (MDPT) .....	128
7.2.1	Descripción cualitativa .....	129
7.2.2	Filosofía del procedimiento.....	130
7.3	Campaña experimental.....	131
7.3.1	Parámetros de estudio y elementos a ensayar .....	131
7.3.2	Materiales y dosificaciones.....	132
7.3.3	Proceso de producción y curado de las probetas .....	133
7.3.4	Preparación de los testigos cúbicos.....	134
7.3.5	Caracterización en estado endurecido .....	135
7.3.6	Análisis de los resultados .....	136
7.4	Método para determinar la orientación de las fibras .....	144
7.4.1	Orientación de las fibras en base a las resistencias residuales .....	145
7.5	Orientación de las fibras en elementos losa.....	147
7.5.1	Estrategia para la extracción de los testigos cilíndricos.....	147
7.5.2	Evaluación de la orientación de las fibras en elementos losa .....	150
7.6	Conclusiones .....	154

### **Capítulo 8: Modelo constitutivo directo en base al MDPT**

8.1	Introducción .....	157
8.1.1	Razón de ser y objetivos .....	158
8.1.2	Organización del capítulo.....	158
8.2	Debilidades de los modelos actuales.....	159
8.3	Modelo constitutivo de partida: Laranjeira (2010).....	160
8.3.1	Contribución del hormigón en masa (paso 1).....	161
8.3.2	Contribución de las fibras (pasos del 2 al 6).....	161
8.4	Nuevo planteamiento para la definición del modelo .....	166
8.4.1	Descripción general del planteamiento .....	166
8.4.1	Simplificación para la obtención de $P_{\theta_i}(w)$ .....	167
8.4.1	Obtención de $(\tau^*)$ a partir del ensayo multidireccional .....	168
8.4.1	Proceso iterativo para la obtención de $\tau^*$ .....	169
8.5	Ejemplos de aplicación del modelo y validación.....	172
8.5.1	Definición del problema.....	173
8.5.2	Resolución paso a paso.....	173
8.5.2	Bondad de los resultados .....	179
8.6	Estudio de sensibilidad.....	181
8.6.1	Sensibilidad al parámetro $\tau^*$ .....	181
8.6.2	Sensibilidad a los parámetros $V_f; \eta_\theta$ .....	182
8.7	Conclusiones .....	183

## **Parte IV: Comportamiento diferido del HRFP**

### **Capítulo 9: Fluencia a flexión de elementos fisurados de HRFP**

9.1	Introducción .....	185
9.1.1	Razón de ser y objetivos .....	185
9.1.2	Organización del capítulo .....	186
9.2	Campaña experimental.....	186
9.2.1	Parámetros de estudio.....	186
9.2.2	Elementos a ensayar.....	187
9.2.3	Materiales y dosificaciones.....	187
9.2.4	Proceso de producción y curado de las probetas .....	188
9.2.5	Caracterización en estado endurecido .....	188
9.2.6	Metodología de ensayo.....	189
9.2.7	Instrumentación .....	192
9.3	Análisis de los resultados .....	193
9.3.1	Etapas 1: Prefisuración a flexión.....	193
9.3.2	Etapas 2: Deformaciones diferidas en el tiempo.....	195
9.4	Modelo para la predicción de la fluencia básica.....	204
9.4.1	Introducción .....	204
9.4.2	Consideraciones de partida.....	205
9.4.3	Modelo para el coeficiente de fluencia en régimen lineal.....	205
9.4.4	Coeficiente de ajuste no lineal.....	207
9.4.5	Contrastación del modelo .....	208
9.5	Conclusiones .....	209

## **Parte V: Conclusiones finales**

### **Capítulo 10: Conclusiones**

10.1	Introducción.....	211
10.2	Conclusiones generales .....	212
10.3	Conclusiones específicas.....	212
10.4	Futuras líneas de investigación .....	217

### **Chapter 11: Final conclusions**

11.1	Introduction .....	219
11.2	General conclusions .....	219
11.3	Specific conclusions .....	220
11.4	Future perspectives .....	225

### **Bibliografía .....**

### **Anejos**

Anejo 1:	Medidas manuales con reloj comparador.....	245
Anejo 2:	Determinación de la longitud característica en el ensayo Barcelona.....	219
Anejo 3:	Validación de la correlación desplazamiento de pistón-TCOD .....	249
Anejo 4:	Tomografía axial computarizada en HRFP .....	257

### **Notaciones y símbolos .....**

### **Listado de publicaciones.....**

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Macro-fibras plásticas (estructurales) en el hormigón.....	2
Figura 1.2 –Etapas involucradas en el diseño de estructuras de HRF.....	3
Figura 1.3 – Organización de la tesis doctoral.....	5
Figura 2.1 – Diagrama constitutivo del comportamiento a compresión y a tracción.....	13
Figura 2.2 – Ecuaciones constitutivas ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) del HRF. (Lim et al., 1987).....	16
Figura 2.3 – Ecuaciones constitutivas ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) para caracterizar el comportamiento a tracción el hrf. (Dupond, 2003; Tlemat et al., 2006).....	16
Figura 2.4 – Ecuaciones constitutivas ( $\sigma$ - $w$ ) a tracción del HRF. (Dozio, 2008).....	17
Figura 2.5 – Diagramas propuestos por la norma alemana, DBV.....	20
Figura 2.6 – Distribución tensión-deformación en sección transversal (RILEM, 2003).....	21
Figura 2.7 – Comparación del factor tamaño aplicado en la norma DBV y a la RILEM.....	21
Figura 2.8 – Modelos elástico lineal y rígido plástico propuestos en la norma CNR-DT-204.....	22
Figura 2.9 – Ensayos de fluencia a tracción sobre probetas de pp. (Liu et al., 2009).....	27
Figura 2.10 – Degradación de la superficie de polipropileno como consecuencia de la aplicación de la luz UV, temperatura y tensión (Liu et al., 2009).....	28
Figura 3.1 – Armado convencional de las vigas ensayadas.....	31
Figura 3.2 – Resistencias residuales para las fibras a) PF1 y b) PF2.....	33
Figura 3.3 – a) armado convencional y b) hormigonado de las vigas ensayadas.....	35
Figura 3.4 – a) vibrado exterior de los moldes y b) acabado del HRF.....	35
Figura 3.5 – Configuración del ensayo y dimensiones.....	36
Figura 3.6 – Vista (a) cenital y (b) lateral de la configuración general del ensayo.....	36
Figura 3.7 – Configuración de los apoyos a) apoyo no liberado; b) apoyo liberado.....	36
Figura 3.8 – Esquema curva carga-flecha a) general; b) detalle escalones.....	37
Figura 3.9 – Transductores de desplazamiento en el lado a) anterior y b) posterior de la viga.....	37
Figura 3.10 – Medición mediante extensómetro mecánico (o reloj comparador).....	38
Figura 3.11 – Proceso de colocación de las vigas.....	39
Figura 3.12 – a) esquina derecha sin apoyar debido a la retracción diferencial; b) solución adoptada al problema de retracción diferencial.....	39
Figura 3.13 – Esquema cualitativo de las deformaciones en el hormigón y la armadura convencional para una sola fisura.....	40
Figura 3.14 – Esquema de las deformaciones en el hormigón y la armadura convencional para a) justo antes de la aparición de una nueva fisura y b) fase final de la fisuración.....	41
Figura 3.15 – Esquema de las deformaciones en el hormigón, armadura convencional y fibras para fase final de la fisuración del HRFP.....	41
Figura 3.16 – Área de estudio de la separación entre fisuras.....	42
Figura 3.17 – Distribución de la separación entre fisuras en la zona 3 para a) PF1 y b) PF2.....	43
Figura 3.18 – Patrón o mapa de fisuración de los elementos ensayados.....	43
Figura 3.19 – Curvas carga-ancho de fisura para a) y b) vigas PF1-0,25%, c) y d) vigas PF2-0,25%, e) y f) vigas PF1-0,50%, g) y h) vigas PF2-0,50%.....	46
Figura 3.20 – a) curva carga-ancho de fisura y b) incremento de carga-ancho de fisura.....	47
Figura 3.21 – Porcentaje de incremento máximo en la curva carga-ancho de fisura.....	48
Figura 3.22 – Porcentaje de incremento de carga para el mismo ancho de fisura.....	49
Figura 3.23 – Curvas carga-desplazamiento para a) y b) vigas PF1-0,25%, c) y d) vigas PF2-0,25%, e) y f) vigas PF1-0,50%, g) y h) vigas PF2-0,50%.....	51

Figura 3.24 – a) idealización longitudinal de la viga y b) ley de momentos (curvaturas).....	54
Figura 3.25 – (a) fib Model Code 2010 y (b) consideración realizada para los cálculos.....	56
Figura 3.26 – PF1_0,25%. modelos a) trilineales; c) bilineales; b) y d) carga-desplazamiento.....	57
Figura 3.27 – PF1_0,50%. modelos a) trilineales; c) bilineales; b) y d) carga-desplazamiento.....	57
Figura 4.1 – Dimensiones de los apoyos para a) 3,0mx3,0m; b) 2,0mx3,0m y c) 1,5mx3,0m.....	63
Figura 4.2 – Planta de prefabricados de Escofet: a) cinta transportadora; b) amasadora utilizada; c) adición manual de fibras y d) amasado final.....	64
Figura 4.3 – Ensayo de extensión de flujo dosificación F1.A1: a) vista general; b) detalle.....	65
Figura 4.4 – a) montaje de encofrado; b) detalle espuma para sellar las juntas; c) encofrado losas de 3x3x0,2 m y d) aplicación de producto desencofrante.....	65
Figura 4.5 – a) y b) vertido del hormigón con cubilote; c) y d) flujo del hormigón en el molde.....	66
Figura 4.6 – Transporte de las losas de HRF a) viaje 1 y b) viaje 2.....	67
Figura 4.7 – Acopio de las losas en el laboratorio de tecnología de estructuras Luís Agulló.....	68
Figura 4.8 – Sistemas de ganchos para el transporte con puente grúa.....	68
Figura 4.9 – Configuración del ensayo y detalle de la carga puntual.....	69
Figura 4.10 – a) Configuración de los apoyos y b) dimensiones del neopreno.....	69
Figura 4.11 – Posicionamiento de los transductores de desplazamiento para las losas a) 3,0mx3,0m; b) 2,0mx3,0m y c) 1,5mx3,0m.....	70
Figura 4.12 – Estructura reticular fabricada con perfilaría de aluminio y detalle de un transductor de deplazamiento.....	70
Figura 4.13 – Ejemplo de obtención de la flecha central a) eje 1 y b) eje 2.....	71
Figura 4.14 – Deformada de las losas para diferentes flechas centrales a) L_B_3,0mx3,0m; b) M_A_2,0mx3,0m y c) S_A_1,5mx3,0m.....	71
Figura 4.15 – a) L_B_3,0mx3,0m; b) M_A_2,0mx3,0m y c) S_A_1,5mx3,0m.....	72
Figura 4.16 – Ascenso de los extremos de la losa en los apoyos.....	72
Figura 4.17 – Ascenso de las esquinas de las losas durante el proceso de carga.....	73
Figura 4.18 – Deformadas en la diagonal no-se.....	73
Figura 4.19 – Curvas carga-desplazamiento en el centro de la losa a) antes de y b) después de considerar los neoprenos.....	73
Figura 4.20 – Curvas carga-desplazamiento en el centro de la losa (y rotación equivalente) y energía absorbida-desplazamiento en el centro de la losa (y rotación equivalente).....	74
Figura 4.21 – Curvas a) $E-\chi_{3m}$ y b) de $d\chi-h/l$ .....	75
Figura 4.22 – Fisuración de las losas tras el ensayo.....	76
Figura 4.23 – Mapas de fisuración de las losas tras el ensayo.....	77
Figura 4.24– a) fisuras llegando hasta los extremos de los apoyos; b) y c) detalle de la fisuración en la zona central de la losa L_b_3,0mx3,0m.....	78
Figura 4.25 – Fisuración en la cara superior a) y b) L_A_3,0mx3,0m y c) L_B_3,0mx3,0m.....	78
Figura 4.26 – Esquema de las curvas tensión-deformación $\sigma$ - $\epsilon$ de a) HRFP y b) neopreno.....	80
Figura 4.27 – Comparación resultados numéricos y experimentales para las losas a) L_A y b_3,0mx3,0m b) m_a y b_2,0mx3,0m y c) s_a y b_1,5mx3,0m.....	82
Figura 5.1 – Influencia de las variables $\sigma_2$ y $\epsilon_2$ a) $\sigma_2=0,5\sigma_2$ & $\epsilon_3=20\%$ ;.....	90
Figura 5.2 – Influencia de las variables $\sigma_2$ y $\epsilon_2$ . a) $\sigma_2=0,2\sigma_1$ & $\epsilon_2= \epsilon_1$ .....	91
Figura 5.3 – Curvas F- $\delta$ obtenidos para los seis valores de $\sigma_2$ para la losa S_1,5mx3,0m.....	93
Figura 5.4 – Curvas F- $\delta$ obtenidos para los seis valores de $\sigma_2$ para la losa M_2,0mx3,0m.....	94
Figura 5.5 – Curvas F- $\delta$ obtenidos para los seis valores de $\sigma_2$ para la losa L_3,0mx3,0m.....	94
Figura 5.6 – Curvas $F_{max}-\sigma_2/\sigma_1$ para a) L_3,0mx3,0m; b) M_2,0mx3,0m y c) S_1,5mx3,0m.....	94
Figura 5.7 – Curvas $F_{max}-\sigma_3/\sigma_2$ para a) L_3,0mx3,0m; b) M_2,0mx3,0m y c) S_1,5mx3,0m.....	95
Figura 5.8 – Curvas $F(\delta=15)-\sigma_2/\sigma_1$ para a) L_3,0mx3,0m; b) M_2,0mx3,0m y c) S_1,5mx3,0m.....	96
Figura 5.9 – Curvas $E(\delta=15)-\sigma_2/\sigma_1$ para a) L_3,0mx3,0m; b) M_2,0mx3,0m y c) S_1,5mx3,0m.....	96
Figura 5.10 – Curvas $E(\delta=15)-\sigma_3/\sigma_2$ para a) L_3,0mx3,0m; b) M_2,0mx3,0m y c) S_1,5mx3,0m.....	97
Figura 5.11 – Curvas F- $\delta$ para a) L_3,0mx3,0m; b) M_2,0mx3,0m y c) S_1,5mx3,0m.....	98
Figura 5.12 – a) diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ y b) variación de $\sigma_3$ con $b_{corto}/b_{largo}$ .....	100
Figura 5.13 – Esquema de la orientación de las fibras y patrón de fisuración para losas con diferentes relaciones $b_{corto}/b_{largo}$ .....	101
Figura 5.14 – Esquema de la variación de $\sigma_3$ en función de $b_{corto}/b_{largo}$ .....	101
Figura 5.15 – Esquema del coeficiente o factor geométrico $\psi$ en función de $b_{corto}/b_{largo}$ .....	102
Figura 5.16 – Coeficiente o factor geométrico $\psi$ obtenido para las losas del capítulo 4.....	103
Figura 6.1 – Metodología de trabajo aplicada para la obtención del modelo.....	107
Figura 6.2 – a) configuración del ensayo Barcelona y b) patrón de fisuración típico.....	107

Figura 6.3 – Etapas que se suceden durante el ensayo Barcelona .....	109
Figura 6.4 – Representaciones del ensayo barcelona a) carga-TCOD, b) carga- $\delta$ y c) TCOD- $\delta$ .....	109
Figura 6.5 – Esquema en planta de los mecanismos cinemáticos que gobiernan la etapa 3 .....	110
Figura 6.6 – Esquema de los mecanismos cinemáticos que gobiernan la etapa 3 en el ensayo Barcelona (perfil) .....	111
Figura 6.7 – Curva que relaciona TCOD y $\delta$ para un HRF con resistencia residual prácticamente nula.....	112
Figura 6.8 – Curva que relaciona TCOD y $\delta$ para un HRF con a) softening y b) hardening .....	113
Figura 6.9 – Filosofía de trabajo para correlacionar TCOD y desplazamiento axial ( $\delta$ ) .....	115
Figura 6.10 – a) mecanismo de cortante por fricción y esquema de las sollicitaciones normales y tangenciales; y b) engranamiento de áridos entre caras de fisura .....	115
Figura 6.11 – a) probeta cilíndrica del ensayo Barcelona y b) detalle de la longitud del cono.....	117
Figura 6.12 – Sensibilidad de la longitud del cono sobre modelo cinemático a) correlación teórica TCOD- $\delta$ ; b) curva carga- $\delta$ y c) curva $E(0 < \text{TCOD} < 4 \text{ mm})-l$ .....	117
Figura 6.13 – Sensibilidad del número de fisuras sobre modelo cinemático a) correlación teórica TCOD- $\delta$ ; b) curva carga- $\delta$ y c) curva $E(0 < \text{TCOD} < 4 \text{ mm})-l$ .....	118
Figura 6.14 – Resultados para HRF_PF_5_2 .....	121
Figura 6.15 – Resultados para HRF_PF_9_3 .....	121
Figura 6.16 – Resultados para HRF_SF_40_3.....	121
Figura 6.17 – Resultados para HRF_SF_60_6.....	121
Figura 6.18 – Resultados para UHPHRF_SMF_130_1 .....	121
Figura 6.19 – TCOD medido y TCOD predicho para a) FRC_PF_5_N y b) FRC_PF_9_N.....	122
Figura 6.20 – TCOD medido y TCOD predicho para a) FRC_SF_60_N y b) FRC_SF_40_N.....	123
Figura 6.21 – TCOD medido y TCOD predicho para a) UHPFRC_SMF y b) todos los datos.....	123
Figura 6.22 – Relación entre $E(\delta)-E(\text{TCOD})$ a) HRF_PF_5_5 y b) HRF_PF_9_1 .....	124
Figura 6.23 – Relación entre $E(\delta)-E(\text{TCOD})$ a) HRF_SF_60_6 y b) HRF_SF_40_5 .....	124
Figura 7.1 – a) dimensiones y b) configuración del ensayo multidireccional.....	129
Figura 7.2 – Esquema de la filosofía del ensayo multidireccional.....	130
Figura 7.3 – Dirección de carga de las probetas a) 1 y 2 según eje z ; b) 3, 4 según eje y y c) 5, 6 según eje x. ....	132
Figura 7.4 – Procedimiento de hormigonado de las probetas: a) prismáticas y b) cúbicas .....	133
Figura 7.5 – Procedimiento de vibrado de las probetas a) prismáticas y b) cúbicas .....	134
Figura 7.6 – a) transporte y conservación de las probetas y b) probetas en el laboratorio listas para ser introducidas en la cámara húmeda. ....	134
Figura 7.7 – Detalle a) del esquema de las dos modalidades de testigos y b) del procedimiento de corte de los testigos cúbicos.....	135
Figura 7.8 – a) definición de las etapas ensayo multidireccional y b) desplazamiento de la curva a nuevo origen de referencia .....	136
Figura 7.9 – Comparación resultados ensayo Barcelona y ensayo multidireccional (cargando según eje z) para las series a) F1.A1; b) F1.A2; c) F2.A1.....	137
Figura 7.10 – Correlación ensayo Barcelona y MDPT (según eje z) para la carga de fisuración.....	137
Figura 7.11 – Correlación del ensayo Barcelona y MDPT según eje z en términos de a) tenacidad $E(0 \leq \delta \leq 4)$ ; y b) cargas residuales ( $F_R$ ).....	138
Figura 7.12 – Curvas carga – desplazamiento de pistón .....	139
Figura 7.13 – Carga residual ( $F_R$ ) según la dirección de carga: a) $F_{R,\delta=2 \text{ mm}}$ ; y b) $F_{R,\delta=4 \text{ mm}}$ .....	140
Figura 7.14 – Curva $E(0 \leq \delta \leq 4 \text{ mm})-\delta$ para las series a) F1.A1 ( $5 \text{ kg/m}^3$ ); b) F1.A2 ( $7 \text{ kg/m}^3$ ) y c) F2.A3 ( $9 \text{ kg/m}^3$ ).....	140
Figura 7.15 – Curvas carga – desplazamiento de pistón .....	142
Figura 7.16 – Comparación curvas $E(0 \leq \delta \leq 4)-\delta$ para la serie F2.A1 ( $9 \text{ kg/m}^3$ ) de a) probetas moldeadas; b) T1C y c) T2C.....	143
Figura 7.17 – a) Distribución de las fibras en una sección de probeta prismática y b) detalle de la orientación preferente en dirección de flujo (dirección x) .....	143
Figura 7.18 – Influencia del efecto del flujo de hormigón y efecto pared del molde en la orientación de las fibras de los testigos T1C y T2C: a) perfil; y b) planta .....	144
Figura 7.19 – Distribución de las fisuras para a) y d) testigos T1C; y b) y c) testigos T2C.....	144
Figura 7.20 – Distribución promedio de las fibras en base a $E(0 \leq \delta \leq 4)$ : .....	146
Figura 7.21 – Validación del método. Resultados Blanco (2013).....	146
Figura 7.22 – a) obtención de los testigos y b) dimensiones de los testigos .....	147
Figura 7.23 – Plano de localización de los testigos cilíndricos (cotas en mm): a) L_A_3,0mx3,0m; b) M_A_2,0mx3,0m y c) S_A_1,5mx3,0m.....	148

Figura 7.24 – Obtención de los testigos cilíndricos .....	148
Figura 7.25 – Esquema de los cortes necesarios para obtener los testigos cúbicos .....	149
Figura 7.26 – Definición de los anillos de análisis y direcciones de carga de cada testigo .....	150
Figura 7.27 – Esquema explicativo de la orientación de las fibras en elementos tipo losa .....	154
Figura 8.1 – Principales aspectos que influyen en la orientación de las fibras .....	159
Figura 8.2 – Filosofía de las normativas para la obtención de la ecuación constitutiva .....	160
Figura 8.3 – Filosofía del Model Code para la obtención de la ecuación constitutiva .....	160
Figura 8.4 – Esquema del diagrama de pull-out para .....	164
Figura 8.5 – Etapas involucradas en el diseño de estructuras de HRF según Laranjeira (2010) .....	165
Figura 8.6 – Esquema sintético del desarrollo del paso 4, y nueva propuesta .....	166
Figura 8.7 – Diagrama de los esfuerzos que actúan en un segmento infinitesimal de fibra .....	167
Figura 8.8 – Diagrama de la secuencia de operaciones realizadas en la iteración $i=0$ .....	171
Figura 8.9 – Diagrama de la secuencia iterativa para $i=1, \dots, n$ .....	171
Figura 8.10 – Procesos o etapas involucradas en el diseño de estructuras de hrf de acuerdo con el nuevo planteamiento propuesto .....	172
Figura 8.11 – Perfil de orientación ( $P(\theta_i)$ ) .....	174
Figura 8.12 – Secuencia iterativa y solución para las series a) F1.A1; b) F1.A2 y c) F2.A1 .....	175
Figura 8.13 – Diagrama de la secuencia iterativa y solución para la serie F1.A1 .....	177
Figura 8.14 – $P_{\theta_i}(w)$ y $P_{N;\theta_i}(w)$ para las series a) y b) F1.A1; c) y d) F1.A2 y e) y f) F2.A1 .....	178
Figura 8.15 – Ecuaciones constitutivas obtenidas para las series a) F1.A1; b) F1.A2 y c) F2.A2 .....	179
Figura 8.16 – Comparación entre las curvas carga-ancho de fisura experimental y numérica para las series a) F1.A1; b) F1.A2 y c) F2.A1 .....	180
Figura 8.17 – Influencia de la tensión de adherencia en la respuesta $\sigma_{hrfp}(w)$ .....	182
Figura 8.18 – Influencia de a) $V_f$ y b) $\eta_\theta$ en la respuesta $\sigma_{hrfp}(w)$ .....	183
Figura 9.1 – Esquema de la entalla y proceso de corte con sierra vertical .....	188
Figura 9.2 – Curvas carga-cmod obtenidas para las fases a) THlab y b) THcte .....	189
Figura 9.3 – Esquema etapas del ensayo de fluencia realizado .....	190
Figura 9.4 – Bastidores de fluencia en la fase THcte .....	190
Figura 9.5 – Esquema de la posición de las probetas en los bastidores de fluencia .....	191
Figura 9.6 – Esquema método de medida del ancho de fisura (COD) .....	192
Figura 9.7 – Correlación experimental a) CMOD-COD y b) CMOD- $\delta$ .....	193
Figura 9.8 – Prefisuración a a) 0,25 mm; b) 1,50 mm y c) 2,50 mm .....	194
Figura 9.9 – Curvas $f_c$ -tiempo y COD-tiempo para las probetas: a) THlab_0,25P4; b) THlab_1,50P5; c) THlab_2,50P6; a) THcte_0,25P1; b) THcte_1,50P7; c) THcte_2,50P8 .....	196
Figura 9.10 – La influencia de la temperatura y humedad relativa en el $\Delta COD_c^t$ en a) fase THcte y b) fase THlab .....	197
Figura 9.11 – Curvas $\Delta COD_c^t$ -tiempo para $\Delta COD_p^{teórico}$ de a) 0,25 mm y b) 1,50 mm; curvas $\Delta COD_p^{teórico}$ -tiempo (escala log10) para $\Delta COD_p^{teórico}$ de c) 0,25 mm y d) 1,50 mm .....	198
Figura 9.12 – Velocidad de fluencia-tiempo para a) THcte_0,25P1 y b) THcte_0,25P1 .....	199
Figura 9.13 – curvas $\Delta COD_c^t$ -tiempo para $\Delta COD_p^{teórico}$ de a) 0,25 mm y b) 1,50 .....	200
Figura 9.14 – a) comparación de las curvas $\Delta COD_c^t$ -tiempo en THcte y THlab; y b) curvas $\Delta COD_c^t$ -tiempo (escala log10) de la fase THlab; .....	200
Figura 9.15 – Esquema comportamiento de a) fluencia básica y b) fluencia de secado; .....	201
Figura 9.16 – Curva coeficiente de fluencia $\varphi$ -tiempo para: a) fase THcte (fluencia básica) y b) fase THlab (fluencia de secado) .....	202
Figura 9.17 – Curvas $\Delta COD_c^t$ -tiempo para: a) THcte y b) THlab; y curva $\varphi$ -tiempo para: c) THcte y d) THlab de las probetas con $\Delta COD_p^{teórico}$ de 2,50 mm .....	203
Figura 9.18 – Rotura probeta THlab_2,50P6 .....	203
Figura 9.19 – Modelos reológicos: a) Maxwell; b) Kelvin-Voigt; y c) Burger .....	205
Figura 9.20 – Modelos reológico propuesto (Burger modificado) .....	206
Figura 9.21 – Comparación de los datos experimentales con las predicciones del modelo .....	208

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 – Objetivos específicos.....	4
Tabla 2.1 – Propuestas de longitud característica (lcs). (de Montagnac et al., 2012a) .....	14
Tabla 2.2 – Modelos constitutivos de diversas normativas (Blanco et al., 2013).....	18
Tabla 2.3 – Cuadro resumen de los modelos constitutivos.....	19
Tabla 2.4 – Investigaciones de referencia del fenómeno de la fluencia a flexión .....	26
Tabla 3.1 – Características de las fibras.....	32
Tabla 3.2 – Caracterización a compresión (fcm) a los 28 días.....	33
Tabla 3.3 – Resistencias residuales.....	34
Tabla 3.4 – Análisis del número y la separación medida entre fisuras (zonas 1, 2 y 3).....	42
Tabla 3.5 – Separación medida entre fisuras (zonas 1, 2 y 3) y valor calculado por RILEM.....	45
Tabla 3.6 – Cargas asociadas a los anchos de fisura de 0,3 mm y 0,5 mm.....	47
Tabla 3.7 – Ancho de fisuras para tres niveles de carga: 100 kN, 150 kN y 200 kN.....	50
Tabla 3.8 – Pendiente de la curva carga-desplazamiento para cada etapa (en kn/mm) .....	52
Tabla 3.9 – Energía absorbida hasta un valor de flecha de 40 mm.....	53
Tabla 3.10 – Valores de carga para flechas de 6 mm, 15 mm y 45 mm en [kN] .....	58
Tabla 4.1 – Composición de las mezclas de HRF (en kg/m <sup>3</sup> ).....	63
Tabla 4.2 – Características de las fibras (datos proporcionados por el fabricante).....	63
Tabla 4.3 – Caracterización del HRFP a los 28 días.....	67
Tabla 4.4 – Comparación de los resultados numéricos y experimentales.....	75
Tabla 4.5 – Parámetros que definen los modelos constitutivos.....	81
Tabla 4.6 – Comparación de los resultados numéricos y experimentales.....	83
Tabla 4.7 – Comparación de los resultados numéricos y experimentales.....	84
Tabla 5.1 – Parámetros utilizados para la curva $\sigma$ - $\epsilon$ del HRFP a tracción.....	89
Tabla 5.2 – Comparación de los resultados numéricos del estudio paramétrico preliminar .....	92
Tabla 5.3 – Parámetros que definen los modelos constitutivos.....	93
Tabla 5.4 – Resultados del ajuste del diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ .....	97
Tabla 5.5 – Comparación de los resultados numéricos y experimentales en términos de $F(\delta)$ .....	99
Tabla 5.6 – Comparación de los resultados numéricos y experimentales en términos de $E(\delta)$ .....	99
Tabla 5.7 – Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ que conducen a un mejor ajuste de las curvas experimentales .....	100
Tabla 6.1 – Análisis de la variación de los ángulos $\theta$ y $\beta$ , y de la longitud del cono (l) .....	116
Tabla 6.2 – Características de las fibras utilizadas para la validación.....	119
Tabla 6.3 – Tipo y contenido de fibra utilizadas para la validación .....	119
Tabla 6.4 – Parámetros para la predicción del TCOD con el modelo propuesto .....	120
Tabla 6.5 – Comparación de valores experimentales y predichos de $E(0 < \text{TCOD} < 4 \text{ mm})$ .....	125
Tabla 7.1 – Nomenclatura de las diferentes probetas.....	132
Tabla 7.2 – Composición de las mezclas de HRF (en kg/m <sup>3</sup> ).....	132
Tabla 7.3 – Características de las fibras (datos proporcionados por el fabricante).....	133
Tabla 7.4 – Caracterización del HRFP a los 28 días.....	136
Tabla 7.5 – $F_{R,\delta=2 \text{ mm}}$ y $F_{R,\delta=4 \text{ mm}}$ en probetas moldeadas .....	139
Tabla 7.6 – $F_{R,\delta=2 \text{ mm}}$ y $F_{R,\delta=4 \text{ mm}}$ experimentales para los testigos T1C y T2C.....	141
Tabla 7.7 – valores experimentales de $E(0 \leq \delta \leq 4 \text{ mm})$ . testigos cúbicos T1C y T2C.....	141
Tabla 7.8 – Orientación de las fibras según los ejes z, y y x.....	146
Tabla 7.9 – Resultados obtenidos con el MDPT .....	151

Tabla 7.10 – Resultados obtenidos con el MDPT .....	152
Tabla 7.11 – Resultados obtenidos con el MDPT .....	153
Tabla 8.1 – Modelo para definir el pull-out de las fibras inclinadas (Laranjeira, 2010) .....	164
Tabla 8.2 – Expresiones analíticas para la resistencia a tracción en el ensayo DPT .....	169
Tabla 8.3 – Parámetros de entrada para las series F1.A1; F1.A2 y F2.A1 .....	173
Tabla 8.4 – Predicción número de orientación de la probeta prismática .....	173
Tabla 8.5 – Definición del número de fibras ( $N_f$ ) en cada sección transversal.....	174
Tabla 8.6 – Cálculo del perfil de orientación ( $P(\theta_i)$ ) y número de fibras en cada $\theta_i$ ( $N_{\theta_i}$ ).....	174
Tabla 8.7 – Resultados experimentales obtenidos para un ancho de fisura de 2 mm .....	175
Tabla 8.8 – Obtención de $\eta_\theta$ a partir de los valores de $\% \zeta$ obtenidos en el capítulo 6.....	176
Tabla 8.9 – Soluciones obtenidas tras el proceso de iteración para las tres series .....	177
Tabla 9.1 – Dosificación de los hormigones (en $\text{kg}/\text{m}^3$ ).....	187
Tabla 9.2 – Características de las fibras (datos proporcionados por el fabricante).....	187
Tabla 9.3 – Caracterización del HRFP a los 28 días.....	189
Tabla 9.4 – Programa de ensayos de fluencia .....	192
Tabla 9.5 – Resultados de la etapa 1.....	194
Tabla 9.6 – Resultados de la etapa 2 para $t=t_0$ .....	196
Tabla 9.7 – Resultados de $\varphi$ y $\lambda$ obtenidos experimentalmente para las distintas probetas.....	207

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. INTRODUCCIÓN

El Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) constituye una de las innovaciones más relevantes en el campo de los hormigones especiales. Los HRF se definen como aquellos *hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas, distribuidas aleatoriamente en su masa.*

La incorporación de fibras modifica el comportamiento no lineal del hormigón estructural, especialmente en tracción, impidiendo la abertura y propagación de fisuras. Una vez el hormigón ha fisurado, la aportación a tracción debido al efecto puente (*bridging effect*) de las fibras aumenta la resistencia residual del material compuesto. Consecuentemente, y gracias a los mecanismos de pérdida de adherencia (*debonding*) y arrancamiento (*pull-out*) de las fibras, se disipa una mayor energía, lo que conduce a un importante incremento de la tenacidad y un mayor control de la fisuración.

La efectividad de la acción reforzante y la eficacia de la transmisión de tensiones por parte de las fibras dependen de muchos factores, pero especialmente, de la naturaleza de las fibras empleadas. En este sentido, el hormigón reforzado con fibras plásticas (HRFP) atrajo la atención de los investigadores en la primera mitad de los años 60.

Los usos tradicionales del HRFP han sido los pavimentos y la construcción subterránea. Las fibras, generalmente, se empleaban en dichas aplicaciones con el único

propósito de mejorar la durabilidad del elemento, dada la efectividad de las fibras en el control de la fisuración a tempranas edades y también posteriormente en estado endurecido. Sin embargo, la función estructural de las fibras no se contemplaba en términos de proyecto o diseño.

En este sentido, la aparición de macro-fibras plásticas (estructurales) de alto módulo elástico (ver *Figura 1.1*) en el mercado constituye un destacado reto dentro del ámbito del HRF (aunque su rendimiento no sea comparable al de las fibras de acero). Las fibras plásticas ofrecen actualmente grandes prestaciones y, además de ser económicas respecto a otras fibras, son químicamente inertes y muy estables en el medio alcalino que supone el hormigón, lo que las convierte no solamente en una posible solución estructural sino que pueden permitir una reducción de costes y recursos asociados a la construcción con destacadas mejoras en cuanto a la durabilidad (aumentando la vida útil de la estructura).



*Figura 1.1 – Macro-fibras plásticas (estructurales) en el hormigón*

Todo ello, acentúa la necesidad de abordar aspectos de diseño del HRF sobre los que no existe una investigación exhaustiva, contribuyendo de este modo a abrir el camino definitivo de las macro-fibras plásticas como material de refuerzo frente a las tracciones en determinados elementos con clara responsabilidad estructural.

Conviene destacar que esta Tesis Doctoral forma parte de un proyecto global. Este proyecto se integra en el ámbito general referente a la utilización del hormigón con fibras (plásticas y metálicas) en el sector de la construcción civil y la edificación. Con él, se pretende generar y transferir al sector herramientas útiles que promuevan una utilización sistemática de estos hormigones, de manera similar al hormigón estructural convencional. Fruto del trabajo realizado en el contexto de dicho proyecto, se han desarrollado dos Tesis Doctorales, una con HRFA (Blanco, 2013), y el presente documento con HRF.

## **1.2. RAZÓN DE SER**

La aparición de las macro-fibras plásticas ha ido acompañada de un creciente interés del sector en las aplicaciones del HRF dadas las posibilidades que este material ofrece en relación a la reducción de las operaciones de montaje y sus costes asociados, y a las mejoras de las propiedades globales del producto final que éste garantiza.

Sin embargo entre los factores que influyen en la falta de aplicación de las fibras plásticas con responsabilidad estructural cabe destacar la falta de experiencia y el desconocimiento entre los profesionales sobre el HRFP, sus propiedades, limitaciones y campos de aplicación.

Además, la base fundamental del conocimiento que ha servido para el desarrollo de las distintas normativas y recomendaciones relativas al HRF se ha obtenido a partir de estudios de HRFA y los planteamientos de análisis inverso tradicionalmente utilizados en dichas normativas caracterizan el material mediante un ensayo poco representativo de la orientación real de las fibras en las estructuras. Esto, unido a que las normativas no consideran de los efectos de la fluencia en el diseño estructural a pesar de las importantes deformaciones bajo cargas mantenidas en el tiempo que exhiben las fibras plásticas, ha limitado considerablemente el desarrollo del HRFP como una solución estructural competitiva.

Por lo tanto es necesario realizar una revisión sobre la validez de las bases de cálculo y diseño del HRF, para el HRFP, desde la caracterización del material hasta la definición de las ecuaciones constitutivas, y del comportamiento diferido. La investigación de estos aspectos representa un gran reto y tiene un papel primordial en la extensión de la aplicación de este hormigón a otros ámbitos de la construcción, y también en proporcionar un mayor margen de confianza al proyectista para emplearlo en el diseño de sus soluciones.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivos generales

Actualmente existen numerosas directrices y recomendaciones normativas (DBV, 2001; RILEM TC 162-TDF, 2003; CNR-DT 204, 2006; EHE, 2008; FIB, 2010) que definen las bases de cálculo y diseño del HRF. Todas estas recomendaciones normativas de diseño, (tal y como se representa en el esquema de la *Figura 1.2*) definen la ejecución de ensayos de caracterización (paso 1) como punto de partida en el proceso de diseño de elementos de HRF. A partir de dichos ensayos se obtienen, directa o indirectamente, los parámetros básicos que definen la ley de comportamiento a tracción del HRF en régimen postfisuración (paso 2) a partir del cual realizar el diseño estructural (paso 3) y los correspondientes controles (pasos 4 y 5).



*Figura 1.2 –Etapas involucradas en el diseño de estructuras de HRF*

Esta Tesis Doctoral pretende incidir en las etapas o pasos 1 y 2; y abordar aspectos de gran interés en relación a la caracterización del HRFP, la definición de una ecuación constitutiva considerando la orientación de las fibras, y el comportamiento diferido del

material. Con ello se pretende contribuir a abrir el camino definitivo del HRFP como material de refuerzo frente a las tracciones en elementos con clara responsabilidad estructural y superar, de este modo, las barreras que existen en la actualidad.

### 1.3.2. Objetivos específicos

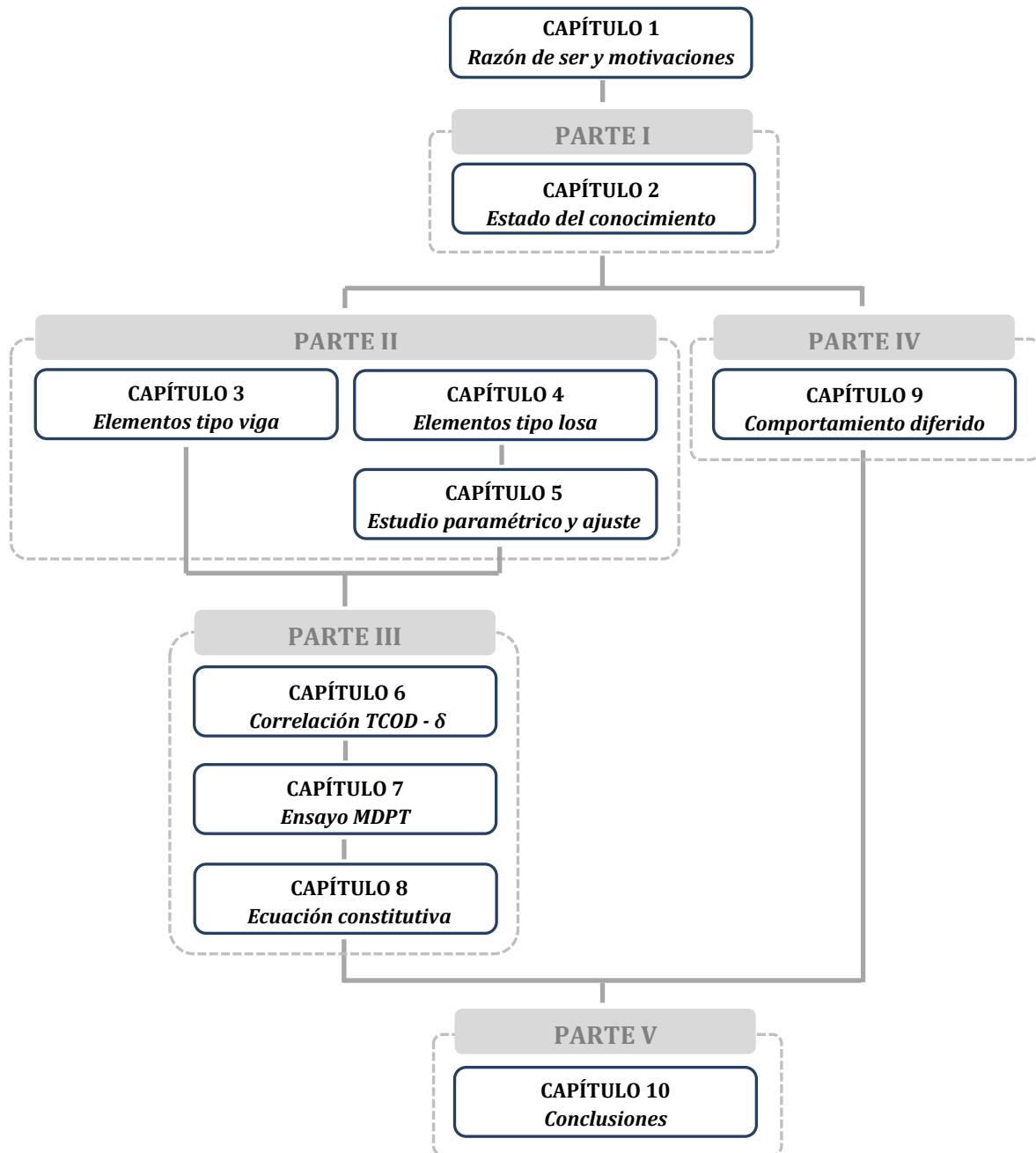
En respuesta a las diferentes cuestiones señaladas anteriormente, se proponen varios objetivos específicos. En la *Tabla 1.1* se presentan los principales objetivos específicos que se persiguen en aras a alcanzar los objetivos globales anteriormente citados.

*Tabla 1.1 – Objetivos específicos*

Temas	Objetivos específicos
Validación y análisis de los modelos de diseño de normativas y códigos de referencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtener resultados experimentales en elementos tipo vigas de hormigón reforzados con armadura mixta, y en losas hiperestáticas reforzadas únicamente con macro-fibras plásticas.</li> <li>• Evaluar y comparar los modelos de ecuación constitutiva existentes y su idoneidad para la consideración estructural en elementos reforzados con fibras plásticas en cada caso.</li> <li>• Realizar un estudio paramétrico y analizar la sensibilidad de las ecuaciones constitutivas propuestas en normativas respecto a parámetros como la dimensión transversal.</li> <li>• Proponer un modelo que permita la consideración de todos los puntos anteriormente mencionados.</li> </ul>
Propuesta de una nueva filosofía para la caracterización del material	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encontrar la relación entre desplazamiento del pistón y TCOD en el ensayo Barcelona como paso previo al ensayo propuesto.</li> <li>• Desarrollar un ensayo capaz de caracterizar la contribución estructural de las fibras discriminando la orientación de las mismas (caracterización multidireccional).</li> <li>• Correlacionar el ensayo objeto de estudio con el ensayo Barcelona</li> <li>• Determinar la orientación de las fibras en función de los resultados del ensayo.</li> <li>• Desarrollar un modelo constitutivo directo tensión-ancho de fisura que permita la consideración de la orientación de las fibras en el diseño.</li> </ul>
Estudio del comportamiento diferido del material	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtener resultados experimentales de fluencia en elementos prismáticos prefisurados sometidos a flexotracción con los que cuantificar y analizar el fenómeno.</li> <li>• Identificar las variables fundamentales que gobiernan el comportamiento diferido a flexión de los HRFP y de las propias fibras (material termoplástico) bajo condiciones de laboratorio y de temperatura y humedad constantes.</li> <li>• Analizar el comportamiento global de la fluencia terciaria y rotura por fluencia.</li> <li>• Proponer un modelo para describir matemáticamente el comportamiento diferido de elementos de HRFP.</li> </ul>

#### 1.4. METODOLOGÍA Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Cada uno de los grandes temas a abordar en el cuerpo de la tesis doctoral constituye por sí mismo una parte o bloque temático de la misma, a la que se le han asociado los capítulos necesarios así como anejos correspondientes. Esta Tesis Doctoral, como se muestra en la *Figura 1.3*, se divide en cinco partes.



*Figura 1.3 – Organización de la Tesis Doctoral*

La PARTE I de esta tesis, corresponde al **Capítulo 2**. En él se realiza un breve estado del conocimiento del HRFp y se analizan las ecuaciones constitutivas propuestas en normativas y códigos de referencia así como los ensayos que estas utilizan como punto de partida para el diseño. Con ello se pretende introducir los modelos constitutivos con los

que posteriormente reproducir numéricamente las campañas experimentales presentadas en esta Tesis Doctoral.

El objetivo de la PARTE II es analizar la validez de las metodologías de diseño propuestas en las distintas normativas y evaluar los modelos constitutivos que en ellas se proponen. Para ello se han realizado dos campañas experimentales: la primera sobre elementos tipo vigas de hormigón reforzados con armadura mixta, es decir macro-fibras plásticas y armadura convencional (en el **Capítulo 3**) y la segunda sobre losas hiperestáticas reforzadas únicamente con macro-fibras plásticas (en el **Capítulo 4**).

La sobreestimación de los resultados experimentales observada en el Capítulo 4 para elementos únicamente reforzados con fibras plásticas pone de manifiesto la necesidad de revisar los modelos constitutivos propuestos en las normativas para el HRF. Por ello, en el **Capítulo 5** se realiza un estudio paramétrico para determinar la influencia de los parámetros que definen la ecuación constitutiva en la respuesta estructural de las losas y determinar el valor de los parámetros que mejor ajustan los resultados experimentales presentados en el **Capítulo 4**.

Sin embargo la solución propuesta en este último capítulo está limitada al tipo y cuantía de fibras utilizadas así como a una geometría de la estructura y orientación de las fibras determinada. Para superar los inconvenientes de los enfoques actuales, en la PARTE III se propone una nueva filosofía para la caracterización del HRF y la definición de una nueva ecuación constitutiva con la que abordar el diseño estructural del HRF.

Como punto de partida, en el **Capítulo 6** se propone una generalización del ensayo Barcelona mediante un modelo analítico con el que eliminar la necesidad de emplear la cadena extensométrica. Dicho modelo, además, permite la realización del ensayo de doble punzonamiento, pero con probetas con una forma diferente de la cilíndrica.

En el **Capítulo 7** se aborda la caracterización del material desde otras perspectivas, y se propone un ensayo de doble punzonamiento en probeta cúbica (ensayo multidireccional o *MDPT*) que permite determinar la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción del HRF teniendo en cuenta de manera indirecta la orientación de las fibras según tres direcciones principales. Los resultados obtenidos sirven además para estimar las direcciones de orientación de las fibras y un comportamiento mecánico medio en cada dirección.

Finalmente, la PARTE III concluye con el **Capítulo 8**. En este se realiza una propuesta de un nuevo planteamiento directo para predecir la respuesta postfisuración del HRF a partir del ensayo *MDPT*. La nueva filosofía tiene sentido físico y refleja de forma fidedigna el comportamiento a tracción del material, considerando la orientación de las fibras bajo las condiciones reales de puesta en obra y geometría de la estructura.

Por otro lado, se ha considerado oportuno dedicar la PARTE IV de esta tesis al estudio de las deformaciones diferidas que se producen en el HRF cuando está sometido a cargas de larga duración. En el **Capítulo 9** se realiza una investigación exhaustiva sobre el comportamiento diferido a flexión de elementos fisurados de HRF en estado endurecido, se evalúa la influencia del nivel de carga y fisuración en el rendimiento a largo plazo del material bajo cargas mantenidas en el tiempo y se propone un modelo para predecir el

comportamiento diferido de los HRFP en base a los resultados de una campaña experimental.

Finalmente, en la PART V (**Capítulo 10**) se exponen las conclusiones más relevantes que se derivan del trabajo realizado y se proponen futuras líneas de investigación con el fin de profundizar y completar el trabajo iniciado en la presente Tesis Doctoral.



## **2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se realiza una revisión del estado del conocimiento en relación al comportamiento postfisuración del HRF y en especial del HRFP. El objetivo de este capítulo es: (1) identificar las motivaciones de esta Tesis Dcotoral, y (2) cubrir brevemente la literatura sobre varios de los aspectos que se abordarán durante el desarrollo de esta tesis doctoral. Este estado del conocimiento puede dividirse en tres bloques.

En el primer bloque de este capítulo se realiza una breve introducción al HRFP. Seguidamente se realiza una revisión de los principales trabajos técnicos, directrices y recomendaciones normativas para la definición de las ecuaciones constitutivas y ensayos de caracterización que actualmente se emplean para reproducir el comportamiento a tracción del HRF. El objetivo de este apartado es presentar los modelos que se utilizaran en la PARTE II para la simulación del comportamiento de diferentes elementos estructurales y sentar las bases para la definición de la Ecuación constitutiva desarrollada en la PARTE III.

Finalmente se presenta una revisión del estado actual del conocimiento en relación comportamiento diferido del HRFP, los mecanismos que gobiernan dicho fenómeno y las campañas realizadas por otros investigadores. El estado del arte se completa en de cada capítulo donde se tratan aspectos del conocimiento más específicos.

## 2.2. MACRO FIBRAS PLÁSTICAS ESTRUCTURALES

Las fibras son, sin duda, un refuerzo alternativo al acero que suprime los costes derivados de la manipulación de ferralla (traslado, doblado, soldaduras, colocación de separadores), economizando tiempo y reduciendo los accidentes derivados de este tipo de montajes. Las fibras se incorporan a la masa de hormigón a fin de conferirle ciertas propiedades específicas, ya sea en estado fresco, o en estado endurecido (di Prisco et al., 2009 y Wlraven, 2009). Existen numerosas investigaciones y campañas experimentales a nivel probeta asociadas al estudio de las propiedades mecánicas del HRF: resistencia a compresión (Bencardino, 2008), comportamiento a flexión (Barros 1999, Barros 2005), *pull-out* (Naaman 2000, Shah 1999, y Laranjeira 2009), resistencia a tracción (Barragán 2003), tension stiffening (Bischoff 2003). Sin embargo la mayoría de estas investigaciones se han realizado con fibras de acero, y poco se ha estudiado al respecto sobre el HRF.

De acuerdo con Naaman (2003), para que una fibra trabaje de forma eficiente, ésta debe presentar las siguientes propiedades: elevada resistencia a tracción, resistencia a la adherencia con la matriz del mismo orden o incluso superior a la resistencia a tracción de dicha matriz, módulo elástico mayor que el correspondiente a la matriz (por lo menos 3 veces mayor) y debe presentar un coeficiente de Poisson y coeficiente de dilatación térmica preferiblemente semejante al de la matriz. Consecuentemente las fibras plásticas, no son mecánicamente tan eficientes como las fibras de acero, sin embargo existe una amplia gama de fibras y una gran variedad de geometrías en el mercado. Las fibras derivadas de la poliolefina (las más comunes en el mercado) pueden alcanzar resistencias a tracción muy altas pero sin embargo presentan generalmente bajos módulos elásticos. Sí existen fibras de alto módulo elástico como PVA o Kevlar, si bien son relativamente caras. De manera general, las fibras plásticas pueden clasificarse como: micro-fibras (no estructurales) y macro-fibras (estructurales).

Las micro-fibras sintéticas, han sido tradicionalmente utilizadas en el hormigón para controlar y reducir la fisuración por retracción plástica (Soroushian *et al.*, 1995 y Naaman *et al.*, 2005) y mejorar el comportamiento frente al fuego (Liu *et al.*, 2008) y, aunque en menor medida, para mejorar la tenacidad y resistencia al impacto (aunque no asumen funciones estructurales).

En los últimos años, sin embargo, los crecientes esfuerzos de la industria se han dirigido al desarrollo de una nueva generación de fibras con finalidad estructural, éstas se conocen como macro-fibras. Si bien las macro-fibras plásticas no se han estudiado en la profundidad con la que se han investigado las fibras de acero, existen en la literatura técnica trabajos e investigaciones en las que se demuestra que con la adición de macro-fibras plásticas se logra mejorar significativamente la resistencia a flexión, resistencia al impacto y comportamiento a la fatiga (Cengiz y Turanli, 2004 y Buratti *et al.*, 2011). Consecuentemente, el uso de macro-fibras plásticas o sintéticas (*polyolefin based structural fibers*) en la industria del hormigón se ha extendido más allá de un mero control de la fisuración por retracción plástica, para ser utilizado en nuevas aplicaciones con contribución estructural (Soutos *et al.*, 2012; Alani, y Beckett, 2013). Si bien el creciente uso de macro-fibras plásticas/sintéticas en aplicaciones estructurales requiere de la comprensión y evaluación del efecto que éstas tienen en el comportamiento del hormigón.

## 2.3. MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL HRF

### 2.3.1. Características y criterios

La ejecución de ensayos de caracterización del HRF es el primer paso para llegar a definir una ley de comportamiento o ecuación constitutiva (relaciones *tensión – deformación* o *tensión – ancho de fisura*) del HRF en régimen postfisuración. Importantes dispersiones en los resultados obtenidos en la caracterización del material pueden afectar a los valores característicos a partir de los que se definen dichas ecuaciones constitutivas. Por ello, conviene identificar la idoneidad de los métodos de ensayo para la caracterización del comportamiento postfisuración del HRF. De acuerdo con Kooiman (2000), los principales aspectos que determinan la idoneidad de un ensayo de caracterización del HRF son:

- La complejidad intrínseca al método de ensayo (derivada de las dimensiones de la probeta y trabajo asociado a la preparación de la misma, así como de la configuración y ejecución del ensayo).
- La reproducibilidad, fiabilidad y dispersión de los resultados del ensayo.
- Los costes asociados a su realización.
- La complejidad en el tratamiento de datos para llegar a una relación uniaxial del material.
- La aplicabilidad y nivel de aceptación.

### 2.3.2. Ensayos de caracterización

Los ensayos de tracción uniaxial son los que de manera más fidedigna recogen el comportamiento uniaxial en régimen postfisuración del HRF. De sus resultados, además, puede derivarse directamente la relación  $\sigma - w$  para caracterizar el material.

Sin embargo, dicho ensayo presenta claras dificultades técnicas que inevitablemente influyen en los resultados finales obtenidos. Entre ellas cabe destacar la heterogeneidad del material, las imperfecciones de la probeta, las eventuales excentricidades durante el proceso de carga (difícilmente evitables) o la rotura de la probeta por sus extremos (van Mier y van Vliet, 2002; Walraven, 2009).

Además, existen otros inconvenientes tales como la sujeción de la probeta y la dificultad de asegurar la estabilidad del ensayo. Consecuentemente las tensiones postfisuración y los parámetros de tenacidad obtenidos presentan unos coeficientes de variación de aproximadamente un 30%. Esta elevada dispersión hace que el ensayo sea de difícil aplicación para el control sistemático del HRF (Stroband, 1998 y Saludes *et al.*, 2007).

Aunque no existe un ensayo a tracción uniaxial estandarizado, cabe destacar la importante contribución realizada en este sentido por el documento RILEM TC 162-TDF (2001) en la que se proporcionan útiles recomendaciones para el ensayo con HRF con comportamiento *softening*. Tomando este trabajo como punto de partida, algunos

investigadores han asumido diferentes procedimientos de ensayo, con variaciones bien sea en términos de la geometría de la probeta (Markovic, 2006) o en relación al sistema de aplicación de la carga (Stälhi, 2008).

Por razones prácticas, las normas y códigos de referencia recomiendan el empleo de ensayos a flexotracción sobre probeta prismática, con carga en el centro y entalla (EN 14651, 2005; RILEM TC 162-TDF, 2003), o con cargas aplicadas a tercios de los apoyos (NBN B 15-238, 1992 o ASTM C-1609, 2007).

De acuerdo con Lappa (2007) la entalla, aunque disminuye la dispersión del ensayo, influye en el comportamiento estructural, forzando la aparición de la fisura en dicha sección. Sin embargo, ésta no necesariamente corresponde a la sección más débil, por lo que incluso se pueden alcanzar mayores resistencias residuales ensayando elementos con entalla que elementos sin entalla (en los que indefectiblemente fisura la sección más débil). Así mismo, la zona de “*deflection hardening*” debido a la fisuración múltiple no es tan pronunciada en el caso de las probetas con entalla.

A pesar de requerir el uso de probetas relativamente pesadas, la ventaja de este método es su simplicidad. Sin embargo, estos ensayos presentan una alta dispersión de los resultados, a menudo por encima del 20% (Parmantiers, 2008; Molins *et al.*, 2009), que compromete su uso como herramienta de control. En este sentido, en el preámbulo de la norma belga (NBN B 15-238, 1992) queda expresamente establecido que se trata de un ensayo de caracterización y que no es aplicable para el control sistemático del HRF.

Alternativamente, existen en normativas y recomendaciones otras propuestas de ensayo como el *round determinate panel test* (Bernard, 2000; ASTM C-1550, 2012) y el *WedgeSplitting Test* (Tschegg y Linsbauer, 1986). Éste ha sido modificado por di Prisco *et al.* (2010) y Ferrara *et al.* (2011a) incorporando un corte en forma de cuña con entalla (*Double Edge Wedge Splitting* o DEWS). Con ellas, se logra reducir sensiblemente la dispersión de los resultados (Molins *et al.* 2009), pero sus costes asociados y complejidad, dificultan su uso para el control sistemático y para la estimación de parámetros de diseño.

El Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), como alternativa para caracterizar el HRF, propuso el ensayo Barcelona (Molins *et al.* 2006 y Molins *et al.* 2009), una adaptación del ensayo de doble punzonamiento o DPT (Chen, 1970). Dicho ensayo conduce a valores representativos de la resistencia y de la tenacidad del material, con un coeficiente de variación medio inferior al 13% (Molins *et al.* 2009), lo que lo convierten en un ensayo muy adecuado para el control sistemático de HRF en obra.

## 2.4. ECUACIONES CONSTITUTIVAS

La identificación del modelo constitutivo a tracción representa uno de los pasos fundamentales en el diseño de estructuras de HRF. Durante los últimos 15 años se han desarrollado numerosas recomendaciones técnicas con el fin de facilitar el diseño de este tipo de estructuras y extender su uso. La variedad de ecuaciones constitutivas existentes hace patente la falta de un único modelo aceptado de forma general.

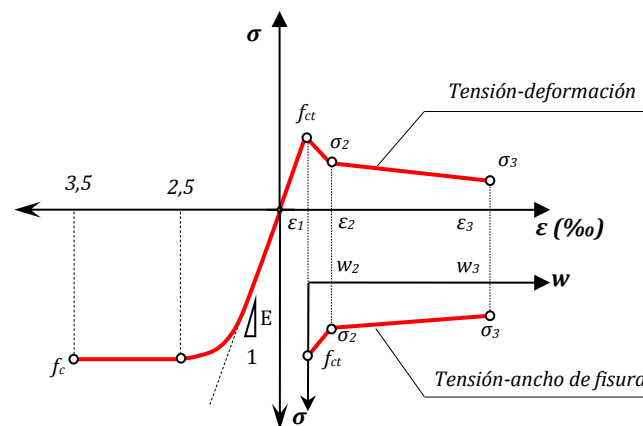
### 2.4.1. Criterios para su obtención.

A diferencia de lo que ocurre a tracción, el comportamiento a compresión del HRF no dista de la respuesta del hormigón convencional (Bencardino *et al.*, 2008). Es por ello que uno de los retos más importantes es el de desarrollar un modelo de ecuación constitutiva que permita caracterizar adecuadamente el comportamiento a tracción de dicho material. El diseño de secciones con HRF se basa en el método tradicional de análisis de secciones para el hormigón armado (HA). La única diferencia reside en que el modelo tensión-deformación ( $\sigma - \varepsilon$ ) usado en el diseño del HRF considera la aportación a tracción debido al efecto puente (*bridging effect*) de las fibras (Tlemat *et al.*, 2006).

En la literatura técnica se han recogido, hasta el momento, numerosos modelos tanto de índole experimental como de carácter meramente teórico. Dichos modelos se pueden obtener adoptando criterios y procedimientos diversos. A continuación se presentan las bases conceptuales sobre las que estos modelos se han desarrollado.

#### **Modelos tensión-ancho de fisura ( $\sigma - w$ ) / Modelos tensión-deformación ( $\sigma - \varepsilon$ )**

La descripción del comportamiento a tracción del hormigón reforzado con fibras puede realizarse, entre otras, mediante la relación  $\sigma - w$  (Löefgren *et al.*, 2005) relacionado con el concepto del modelo de la fisura ficticia (*fictitious crack model*) o la relación  $\sigma - \varepsilon$  (Barros *et al.*, 2005; Tlemat *et al.*, 2006 y Laranjeira, 2010), ambas representadas esquemáticamente en la en la *Figura 2.1*.



*Figura 2.1 – Diagrama constitutivo del comportamiento a compresión y a tracción.*

El diagrama  $\sigma - \varepsilon$  permite la definición del comportamiento a tracción del material en los mismos términos que el de compresión, conduciendo a un único diagrama para la representación del comportamiento del HRF. Asimismo, este tipo de diagrama resulta de especial interés por su compatibilidad con el del acero, permitiendo aplicar una metodología encaminada hacia la visión conjunta del material (HRF) como hormigón estructural.

El parámetro clave que relaciona deformación ( $\varepsilon$ ) con ancho de fisura ( $w$ ) es la longitud característica ( $l_{cs}$ ), ver *Ec. 2.1* (Bischoff, 2003; Fernandes, 2004).

$$w = f(\varepsilon, l_{cs}) = (l_{cs})\varepsilon \quad [2.1]$$

Cuanto mayor sea  $l_{cs}$  menor será la resistencia a flexión estimada del elemento y consecuentemente, mayor el ancho de fisura para un momento dado. Por tanto, escoger valores altos de  $l_{cs}$  inevitablemente conduce a predicciones de ancho de fisura y resistencia última conservadoras. Un mayor detalle sobre la influencia de  $l_{cs}$  en la predicción del comportamiento a flexión de elementos de HRF puede encontrarse en (de Montaignac *et al.*, 2012a).

Tal y como puede observarse en la *Tabla 2.1*, existen numerosas propuestas para tratar de evaluar dicha longitud, sin embargo no se ha alcanzado hasta el momento un consenso para la definición de un único valor. La clara dependencia del tipo y cuantía de fibra, resistencia de la matriz, geometría del elemento ensayado, así como de las condiciones de ensayo y niveles de carga, dificultan enormemente su determinación (Barros y Figueiras, 1999). Una descripción más detallada sobre este concepto puede encontrarse en (Hillerborg, 1980).

*Tabla 2.1 – Propuestas de longitud característica ( $l_{cs}$ ). (de Montaignac *et al.*, 2012a)*

REFUERZO	$l_{cs}$	REFERENCIAS
HRF(A)	$h/2$	Utkjaer <i>et al.</i> , 1995; Pedersen, 1996; Iyengard <i>et al.</i> , 1998; RILEM TC 162, 2002; Massicotte, 2004
	$2h/3$	AFGC, 2002
	$h$	CNR, 2006; FIB, 2010
	$2h$	Stack, 2008
HRF(A)+RC	$Min[s_m; h/2]$	Massicotte, 2004
	$Min[s_m; y]$	CNR, 2006; FIB, 2010

### **Análisis inverso / Análisis directo**

El empleo del análisis inverso y el análisis directo no es sólo exclusivo de la caracterización del comportamiento a tracción del HFR. Se acude a estos procedimientos también, por ejemplo, cuando se quiere abordar la caracterización de la respuesta adherente y de anclaje de una barra de acero o de una fibra embebidas en el hormigón.

El *análisis directo* para el análisis de secciones y/o estructuras de HRF se basa en fijar la forma de una ecuación constitutiva (tipo  $\sigma - \varepsilon$  o  $\sigma - w$ ) para simular la respuesta a tracción del HRF, ya sea alguna de las recogidas en los códigos o referencias internacionales, o alguna de las propuestas por otros investigadores y recogidas en bibliografía especializada (Barros *et al.*, 1999; di Prisco *et al.*, 2004 y Tlemat *et al.*, 2006). Los parámetros constitutivos de cada una de éstas pueden obtenerse experimentalmente [RILEM, EHE...] o se pueden fijar a partir de ciertas propiedades de las fibras empleadas, del hormigón utilizado y del procedimiento de fabricación y hormigonado elegido (Löefgren *et al.*, 2005). Fijada la ecuación constitutiva y el resto de variables e hipótesis necesarias para simular el comportamiento a nivel seccional, se ejecuta el algoritmo de cálculo (Cunha *et al.*, 2008; de la Fuente *et al.*, 2008 y Chiaia *et al.*, 2009a) y se obtiene la respuesta tenso-deformacional de los materiales constituyentes de la sección.

A nivel estructural, se puede integrar la respuesta de cada sección para obtener el comportamiento global de la misma. En el caso de disponer de resultados experimentales del elemento estudiado, se pueden comparar con los obtenidos de forma numérica. Dicha comparación y el grado de ajuste, proporcionará una estimación de cuán adecuada es la forma de la ecuación constitutiva empleada para la simulación del comportamiento a tracción del HRF así como de los parámetros que la definen.

En el *análisis indirecto* la estrategia parte de los resultados experimentales de la sección y/o estructura cuyo comportamiento se quiere simular numéricamente, y se ajustan los valores de una ecuación constitutiva, cuya forma puede haberse predefinido. Concretamente, el planteamiento consiste en obtener los parámetros que definen la ecuación constitutiva del HRF traccionado, variándolos de forma que la respuesta de la estructura obtenida numéricamente se ajuste a la obtenida experimentalmente (Laranjeira, 2010).

En este proceso se pueden aplicar métodos de cálculo simplificados u otros más sofisticados, como el método de los elementos finitos. El proceso de fisuración puede ser representado a través de la teoría de la fisura difusa (*smearred crack approach*) o por la teoría de la fisura discreta (*discrete crack approach*). La primera asume fisuras distribuidas en el elemento mediante el concepto tensión-deformación,  $\sigma - \varepsilon$ , (Barr y Lee, 2004 y Sousa y Gettu, 2004) y la segunda utiliza una ubicación predefinida de la fisura y se basa en la relación tensión-ancho de fisura,  $\sigma - w$  (Bazant y Oh, 1984 y Tlemat *et al.*, 2006).

#### ***Ecuación continua / Ecuación definida por tramos***

Hasta la fecha, la gran mayoría de ecuaciones constitutivas propuestas son ecuaciones definidas por tramos. Sin embargo, para la obtención de una ecuación constitutiva parametrizada, que represente de forma fidedigna el comportamiento a tracción uniaxial del HRF, se requiere de muchos puntos. Es por ello que cada vez más se tiende a investigar modelos continuos (Laranjeira, 2010). Entre éstos cabe destacar el modelo con cuatro funciones exponenciales (*four-e*), con el que sus autores (Barr y Lee, 2004) definen el comportamiento prefisuración y postfisuración del hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) con una única ecuación mediante seis parámetros.

Conviene enfatizar la tendencia de muchas normativas, entre las que se encuentran la norma española (Serna *et al.*, 2009) que a pesar de valerse de modelos definidos por partes (o tramos), proponen un mayor número de inputs con el objetivo de obtener resultados más precisos.

#### **2.4.2. Ecuaciones constitutivas propuestas en la literatura técnica**

Las estructuras de HRF pueden calcularse con un análisis plástico que permita aprovechar la mayor capacidad de redistribución de esfuerzos proporcionada por la contribución de las fibras. No obstante, no existe aún un modelo constitutivo relativo al comportamiento a tracción del HRF que se imponga sobre los demás. Este hecho ha conducido a la aparición de numerosas propuestas, recogidas en la literatura técnica, algunas de las cuales se presentan a continuación.

El diagrama de la *Figura 2.2a* (Lim *et al.*, 1987) fue uno de los primeros estudios de diagrama  $\sigma - \varepsilon$  para el HRFA. En este estudio los autores consideran cuantías pequeñas de fibras y asumen que en la zona de prefisuración del hormigón el efecto de las fibras es despreciable (Elsaigh *et al.*, 2004). El modelo representado en la *Figura 2.2b* (Lok *et al.*, 1998) está formado por tres etapas, siendo la primera de tipo parabólico; la zona intermedia se incluyó para estimar mejor la resistencia postpico.

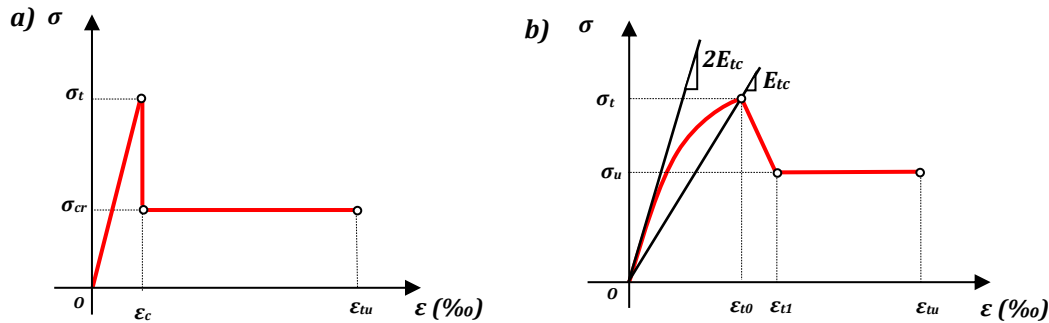


Figura 2.2 - Ecuaciones constitutivas ( $\sigma - \varepsilon$ ) del HRF. (Lim *et al.*, 1987)

Dupont (Dupont, 2003) desarrolla un diagrama de tensión deformación (*Figura 2.3a*) de dos niveles basado en las mismas suposiciones que el del modelo trilineal de la RILEM o la DBV (que se verá posteriormente).

Este modelo no presenta la desventaja del modelo trilineal, ya que se modela mediante dos niveles (o escalones) de tensión definidos por las deformaciones  $\varepsilon_2$  (2,5‰) y  $\varepsilon_3$  (15‰) de modo que el comportamiento postfisuración sea independiente de la resistencia a tracción ( $f_{ct}$ ). Dicho modelo justifica la aproximación en dos niveles en base a la necesidad de las fibras a deformarse previamente a actuar “cosiendo” las fisuras.

Con el objetivo de simplificar el modelo constitutivo y predecir el comportamiento para deformaciones mayores, en (Tlemat *et al.*, 2006) se propone un diagrama constitutivo  $\sigma$ - $\varepsilon$  compuesto de dos fases (*Figura 2.3b*). La primera depende exclusivamente de la cuantía en peso de fibras ( $\nu_p$ ) y de la resistencia a tracción de la matriz ( $f_{ctk}$ ). En la segunda, la caída de tensión a  $\sigma_2$  viene gobernada por una ecuación hiperbólica garantizando una pérdida de tensión en función de un parámetro de forma que refleja la influencia del tipo de fibra en la rama de *softening*.

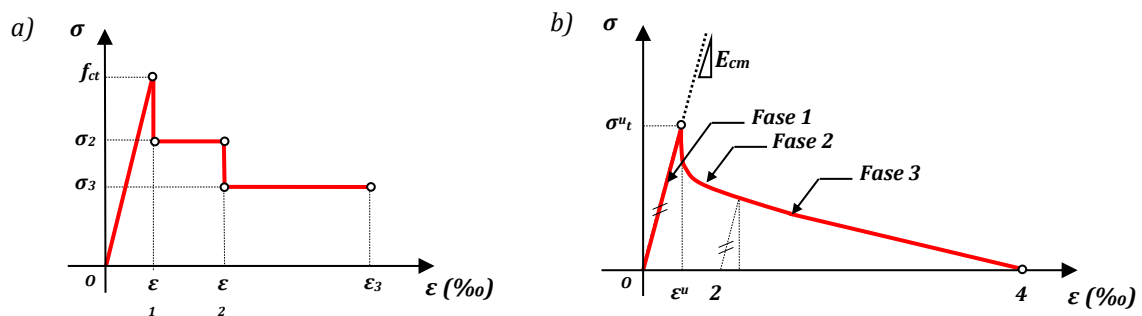
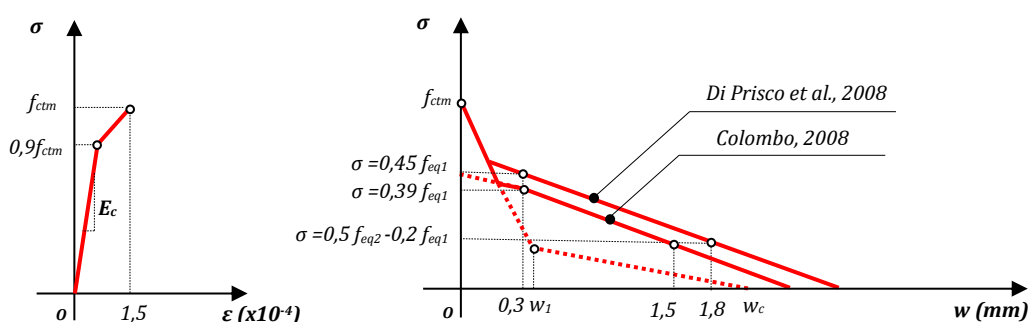


Figura 2.3 - Ecuaciones constitutivas ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) para caracterizar el comportamiento a tracción el HRF. (Dupont, 2003; Tlemat *et al.*, 2006)

Por otra parte, en (di Prisco *et al.*, 2004) se propone un modelo bilineal  $\sigma - w$ , representado en la *Figura 2.4*, que asume un primer tramo de reblandecimiento (*softening*) y considera en el tramo final el efecto de las fibras. Este último tramo se define con las tensiones para dos anchos de fisura determinados (0,3 mm y 1,8 mm). El modelo bilineal presentado en (di Prisco *et al.*, 2004) sobreestima el inicio de la colaboración de las fibras (Dozio, 2008), representado por la intersección de la primera y la segunda rama postpico. Por este motivo, el comportamiento postfisuración se representa mejor si se asume un modelo trilineal  $\sigma - w$  como el que presenta Colombo (Dozio, 2008), de acuerdo con la *Figura 2.4*, que puede entenderse como una modificación del bilineal anteriormente citado.



*Figura 2.4 - Ecuaciones constitutivas ( $\sigma - w$ ) a tracción del HRF. (Dozio, 2008)*

### 2.4.3. Modelos constitutivos normativos

En la *Tabla 2.2* se presentan los modelos constitutivos propuestos por las normativas europeas citadas que han sido agrupados según su diagrama (rectangular, bilineal y trilineal), indicando los parámetros que definen los modelos. Así mismo, se representa esquemáticamente el ensayo requerido para obtener los valores de dichos parámetros. Una vez presentados los modelos constitutivos se realiza un análisis de las similitudes y diferencias entre ellos, valorando los puntos a favor y en contra de las hipótesis y consideraciones realizadas en cada uno de ellos.

Modelos más elaborados, como el multilineal completo de la EHE, trilineal de la DBV o el propuesto por la RILEM tratan de recoger de forma más fidedigna el comportamiento fenomenológico del HRF, atribuyéndole una mayor responsabilidad estructural al material. Estos modelos reproducen el comportamiento elástico-lineal hasta fisuración y recogen el comportamiento del efecto pico. Consecuentemente se trata de modelos reservados, *a priori*, para aplicaciones que requieren de un cálculo más ajustado como un diseño no lineal o casos en los que se requiera trabajar en dominios de pequeñas deformaciones (ELS). El valor de la tensión pico (o de fisuración) propuesto por la RILEM es excesivamente optimista y proporciona valores muy altos.

Los modelos simplificados como el modelo rectangular o bilineal de la EHE y DBV o los propuestos por la CNR-DT 204 resultan de especial interés, por su sencillez y rápida aplicación, para el cálculo en ELU. Nótese que a diferencia de los multilineales o trilineales, éstos no reproducen la fase elástica-lineal previa a la fisuración de la losa, reproduciendo el proceso de carga con la rigidez fisurada desde origen.

Tabla 2.2 – Modelos constitutivos de diversas normativas (Blanco et al., 2013)

Diagrama	Parámetros	Caracterización	
	$\sigma_1 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_{cf} \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{cf} \leq f_{eq,ctd,I}$ ( $\alpha_{sys}$ : coeficiente por efecto tamaño; $\alpha_{cf}$ : coefficient for longterm strength behaviour) $\epsilon_1 = \epsilon_u = 10\text{‰}$	NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = f_{Ftu} = f_{eq2}/3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\text{‰ softening ; 10\text{‰ hardening}]$	UNI 11039 	CNR-DT 204
	$\sigma_1 = f_{ctRd} = 0.33 f_{R,3,d}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\text{‰ flexión; 10\text{‰ tracción}]$	EN 14651 	EHE
	$\sigma_1 = f_{Ftu} = f_{R3}/3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\text{‰ softening ; 10\text{‰ hardening}]$	EN 14651 	MC
	$\sigma_1 = f_{eq,ctd,I} = f_{eq,ctk,I} \cdot \alpha_{cf} \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{cf}$ $\sigma_2 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_{cf} \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{cf} \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = 10\text{‰}$	NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = f_{Fts} = 0.45 f_{eq1}$ $\sigma_2 = f_{Ftu} = k[f_{Fts} - (w_u/w_{i2})(f_{Fts} - 0.5 f_{eq2} + 0.2 f_{eq1})]$ $k = [0.7 \text{ tracción, 1 otros casos}]$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = [20\text{‰ softening; 10\text{‰ hardening}]$	UNI 11039 	CNR-DT 204
	$\sigma_1 = f_{ctd} = \alpha_{cf} \cdot f_{ctk,II} / \gamma_{cf}$ $\sigma_2 = f_{eq,ctd,I} = f_{eq,ctk,I} \cdot \alpha_{cf} \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{cf}$ $\sigma_3 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_{cf} \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{cf} \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}$ ; $\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0.1\text{‰}$ ; $\epsilon_3 = \epsilon_u = 10\text{‰}$	NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = 0.7 f_{ctm,II} (1.6-d)$ ; $\sigma_2 = 0.45 \cdot \kappa_h \cdot f_{R,1}$ ; $\sigma_3 = 0.37 \cdot \kappa_h \cdot f_{R,4}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}$ ; $\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0.1\text{‰}$ ; $\epsilon_3 = \epsilon_u = 25\text{‰}$	RILEM TEST 	RILEM
	$\sigma_1 = f_{ct,d} = 0.6 f_{ct,II,d}$ $\sigma_2 = f_{ctR1,d} = 0.45 f_{R,1,d}$ $\sigma_3 = f_{ctR3,d} = k_1(0.5 f_{R,3,d} - 0.2 f_{R,1,d})$ $\epsilon_2 = 0.1 + 1000 \cdot f_{ct,d} / E_{c,0}$ $\epsilon_3 = 2.5 / l_{cs}$ ( $l_{cs}$ : longitud característica) $\epsilon_u = [20\text{‰ flexión; 10\text{‰ tracción pura}]$	EN 14651 	EHE
	$f_{ctm} = 0.30 (f_{ck})^{2/3}$ $f_{Fts} = 0.45 f_{R1}$ $f_{Ftu} = k[f_{Fts} - (w_u/CMOD_3)(f_{Fts} - 0.5 f_{R3} + 0.2 f_{R1})]$ $\epsilon_{SLU} = CMOD_1 / l_{cs}$ $\epsilon_{SLU} = w_u / l_{cs} = \min(\epsilon_{Fu}, 2.5 / l_{cs} = 2.5 / y)$ $\epsilon_{Fu} = [20\text{‰ softening; 10\text{‰ hardening}]$	EN 14651 	MC

Por otro lado, en la *Tabla 2.3* se presentan los conceptos que se tratarán a continuación para cada uno de los modelos constitutivos presentados en las normas DBV (alemana), RILEM, CNR-DT 204 (italiana), el Model Code y la EHE (española) siguiendo un criterio cronológico de aparición. En la misma se señalan los factores que tienen en cuenta cada una de ellas. Esta tabla se referencia con posterioridad en el análisis pormenorizado de cada normativa.

*Tabla 2.3 – Cuadro resumen de los modelos constitutivos*

	DBV	RILEM	CNR-DT 204	EHE	FIB MC
Tensión-deformación ( $\epsilon$ ) / Tensión-ancho de fisura ( $w$ )	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon/w$	$\epsilon$	$\epsilon/w$
Análisis directo (AD) / Análisis indirecto (AI)	AI	AI	AI	AI	AI
Ecuación Continua (EC) / Ecuación Discontinua (ED)	ED	ED	ED	ED	ED
Trabaja con resistencias residuales		●		●	●
Trabaja con resistencias equivalentes	●		●		●
Distinción de la deformación última			●	●	●
Deformación última (%)	10	25	20/10	20/10	20/10
Reducciones respecto a la distribución elástica-lineal de las tensiones	●	●		●	
Aplicación de la longitud característica en la obtención de la deformación			●	●	●
Considera coeficientes de seguridad	●		●	●	●
Considera efecto tamaño	●	●			
Considera efecto de cargas sostenidas	●				
Considera la cuantía de fibras					
Norma específica para fibras de acero	●	●			
Considera aportación de las fibras en la separación entre fisuras		●	●		●
Considera la orientación de las fibras en el diseño					●

Del conjunto de las distintas normativas estudiadas, DBV y RILEM hacen referencia únicamente a las fibras de acero; sin embargo, las normas italiana (CNR-DT 204) y española (EHE) presentan un planteamiento general para todo tipo de fibras. No obstante, hay que tener presente que la base fundamental del conocimiento que ha servido para el desarrollo de todas ellas se ha obtenido a partir de estudios de hormigón reforzado con fibras de acero.

#### **Norma alemana: DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton (1992/2001)**

La *German Concrete Society* fue la propulsora en 1992 de la primera normativa que se valía de una ecuación  $\sigma - \epsilon$  para el diseño de HRFA (Kooiman, 2000), (específica para fibras metálicas). Dicha normativa se creó en su momento con el propósito de disponer de un diagrama para el diseño estructural de túneles (DBV, 1992). En el año 2001, se publicó la nueva normativa (DBV, 2001), vigente en la actualidad, en la que se propone la utilización de un modelo trilineal para Estados Límite de Servicio (ELS) con posibilidad de emplear un diagrama bilineal (e incluso rectangular) para Estados Límite Últimos (ELU), representados en la *Figura 2.5*.

Ambos diagramas, definidos por las resistencias a flexotracción equivalentes, se deducen de los resultados sobre probetas bajo la configuración de flexión a cuatro puntos ("4-point bending test"). La tensión pico ( $f_{ctd}^f$ ) del modelo trilineal propuesto se obtiene a partir de las cargas máximas obtenidas en el ensayo dentro de un rango de flecha de 0,100 mm. Sin embargo, esta tensión, obtenida mediante un ensayo a flexión, sobrestima

la resistencia a tracción real del hormigón, por este motivo, algunos autores (Laranjeira, 2010) proponen emplear un ensayo a tracción directa para su determinación.

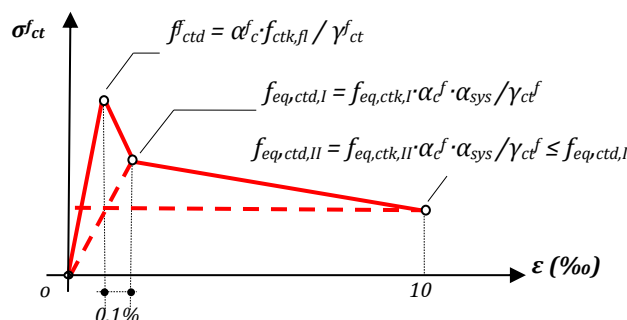


Figura 2.5 – Diagramas propuestos por la norma alemana, DBV

El modelo alemán obtiene las resistencias a tracción equivalentes a partir de las resistencias a flexotracción equivalentes. Los factores que rigen esa relación son 0,45 y 0,37, representando una reducción respecto a la distribución elástica-lineal de las tensiones consideradas:  $f_{eq,ctk,I} = 0,45 f_{eqk,I}$  y  $f_{eq,ctk,II} = 0,37 f_{eqk,II}$ .

Entre los aspectos a destacar de la propuesta de la DBV cabe mencionar la consideración de la dispersión en el comportamiento postpico, coeficientes parciales de seguridad y el efecto de cargas sostenidas (coeficiente de cansancio) con reducciones que pueden alcanzar hasta un 25% en hormigones ligeros y hasta un 15% en hormigones normales. Dicho modelo también introduce el concepto del efecto tamaño o coeficiente de forma ( $\alpha_{sys}$ ) que tiene en cuenta el efecto del canto sobre el comportamiento a flexotracción de la sección, penalizando sensiblemente (hasta un 20%) las secciones de mayor canto.

La deformación última, en la revisión de 2001, aumenta significativamente hasta  $\epsilon_u = 10\%$  respecto a la antigua propuesta (1992),  $\epsilon_u = 5\%$ . Aunque dicho valor resulta razonable para elementos con armadura mixta, pues la armadura convencional limita dicha deformación, es cuestionable para elementos sometidos a flexión únicamente reforzados con fibras donde se pueden alcanzar deformaciones mayores.

El modelo presenta también ciertas inconsistencias en su propuesta de diagrama trilineal para ELS al no definir adecuadamente el comportamiento inicial tras la postfisuración, vinculado a la resistencia a tracción elástica del material (Dupont, 2003). Ésta, sin embargo, es una propiedad intrínseca al hormigón sin fisurar y completamente independiente de la resistencia postfisuración, siendo esta última función únicamente del tipo y dosificación de fibras.

### **RILEM: RILEM TC 162-TDF (2003)**

La primera propuesta de ecuación constitutiva de la RILEM consistía en un diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  trilineal en el que se caracterizaba el comportamiento postfisuración del HRFA, como en el caso de la DBV, mediante la resistencia a flexotracción equivalente. La diferencia principal radicaba en que RILEM se valía del ensayo a flexión de 3 puntos (“3-point bending test”) y no consideraba el efecto tamaño en el comportamiento

postfisuración. Tras numerosas investigaciones llevadas a cabo en el proyecto Brite Euram (BriteEuram, 2002), se concluyó que, la relación tensión-deformación propuesta hasta el momento, se podía mejorar, por lo que se propuso un nuevo diagrama trilineal recogido en (RILEM TC-162, 2003), para hormigón reforzado con fibras metálicas (Tabla 2.3).

A priori, resulta evidente la similitud de este modelo con el propuesto por la DBV, sin embargo existen diferencias que es necesario destacar. El cambio más significativo de esta nueva ecuación constitutiva es que no tiene en cuenta la resistencia a flexotracción equivalente ( $f_{eq,i}$ ), sino que utiliza resistencias a flexotracción residuales ( $f_{R,i}$ ). Hay que señalar que el empleo de  $f_{eq,i}$  frente a  $f_{R,i}$  conduce a resultados con mayor índice de fiabilidad, pues el aparato teórico empleado para el cálculo de  $f_{eq,i}$  es más realista, aunque de aplicación más tediosa (Barros *et al.*, 2005). No obstante, las diferencias obtenidas son pequeñas y el empleo de ambos conceptos arroja resultados suficientemente precisos desde el punto de vista del diseño estructural. Cabe destacar el alto valor de la tensión pico ( $\sigma_1$ ) que se obtiene con la formulación propuesta por la RILEM en comparación con el resto de normativas (como se verá más adelante).

El valor de la deformación última ( $\epsilon_u$ ) propuesta por la RILEM aumenta (respecto al 10‰ considerado tanto en la versión RILEM del 2000, como en la revisión de DBV del 2001) hasta un 25‰ como resultado de considerar una altura de la fibra neutra de 140 mm por encima del punto en el que se mide la *CMOD* y asumiendo una longitud característica igual a dicha distancia. Para un *CMOD* de 3,5 mm, se obtiene una deformación de  $(3,5/140)=25‰$ .

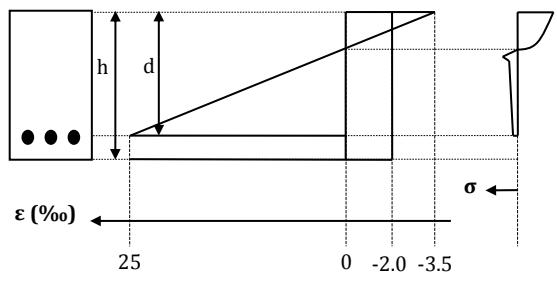


Figura 2.6 – Distribución tensión-deformación en sección transversal (RILEM, 2003)

Asimismo las tensiones asociadas a  $f_{R,1}$  y  $f_{R,4}$  deben afectarse adecuadamente por el coeficiente de forma ( $\kappa_h$ ), siendo éste mucho menor que el propuesto por la DBV tal y como se desprende de la comparación realizada en la Figura 2.7.

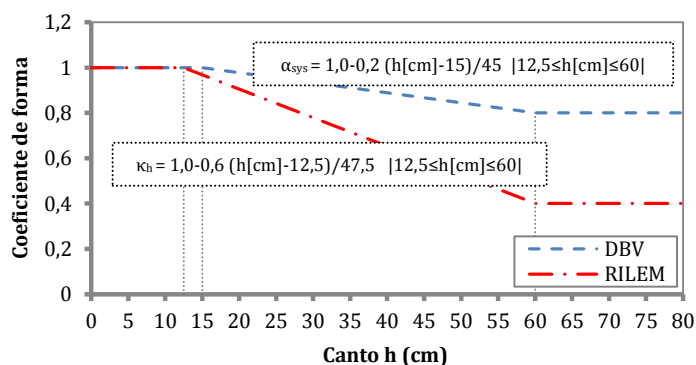
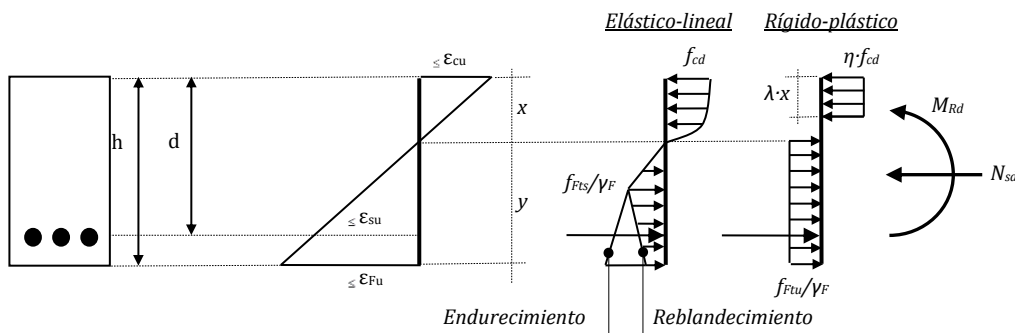


Figura 2.7 – Comparación del factor tamaño aplicado en la norma DBV y a la RILEM

**Norma italiana: CNR-DT 204 (2006)**

El Comité Nacional de Investigación Italiano publicó en 2006 unas recomendaciones para el diseño, ejecución y control de las estructuras de HRF (CNR-DT 204; 2006). Este documento propone dos relaciones para el comportamiento a tracción del HRF: el modelo elástico-lineal y el modelo rígido-plástico. Dichos modelos son presentados en la CNR-DT 204 en dos versiones: como una relación tensión-deformación y una relación tensión-ancho de fisura.

El modelo rígido-plástico se utiliza para cálculo en rotura mientras que el elástico-lineal es aplicable tanto en rotura como en servicio. Ambos modelos permiten representar materiales con comportamientos de reblandecimiento (*softening*) y endurecimiento (*hardening*). En la *Figura 2.8* se esquematiza una sección transversal con las distribuciones de tensiones correspondientes a cada modelo: elástico-lineal y rígido-plástico. Se observa en el modelo elástico-lineal cómo admite materiales con comportamiento de endurecimiento y reblandecimiento.



*Figura 2.8 – Modelos elástico lineal y rígido plástico propuestos en la norma CNR-DT-204.*

Los modelos emplean el concepto de resistencias a flexión equivalentes para caracterizar los diagramas y se definen por medio de ensayos a flexión de 4 puntos (UNI 11039) o ensayos de tracción uniaxial (UNI 11188). Las resistencias a flexión equivalentes que se utilizan para definir la ecuación constitutiva se obtienen a partir de la media de las resistencias obtenidas en los ensayos para unos intervalos de ancho de fisura determinados, lo que supone un planteamiento conservador.

La forma de evaluar la deformación del elemento varía según se trate de un material con comportamiento de endurecimiento o de reblandecimiento. En el primer caso, al producirse múltiples fisuras, la deformación se calcula a través del valor medio de ancho de fisura. En el segundo caso, con la aparición de una única fisura, la deformación se asocia al valor último de ancho de fisura.

La equivalencia entre deformación última ( $\epsilon_u$ ) y ancho de fisura último ( $w_u$ ) se realiza por medio de una longitud característica que resulta del valor mínimo entre la distancia media entre fisuras y la altura del eje neutro. Para el caso de materiales con reblandecimiento, la máxima deformación a tracción,  $\epsilon_{Fu}$ , es de un 20%. El valor último de ancho de fisura,  $w_u$ , debe cumplir la limitación:  $w_u = \epsilon_u l_{cs} \leq 3 \text{ mm}$ . En el caso de materiales con comportamiento de endurecimiento, la deformación máxima a tracción,  $\epsilon_{Fu}$ , es igual al 10%.

Ambos diagramas resultan sencillos por su rapidez de aplicación y prácticos para el diseño en rotura; sin embargo, la precisión del modelo (en este caso el elástico-lineal) en un análisis más sensible, como ELS puede no reproducir determinados fenómenos como el *snap-through* de la forma más adecuada.

### **Norma española: EHE (2008)**

La norma española recoge recomendaciones específicas para el uso del HRF, sin especificar tipo de fibra siempre que se trate de fibras estructurales. En dicha norma se presentan dos diagramas tensión-deformación: un diagrama rectangular y un diagrama multilíneal, cuya aplicación dependerá de la situación a tratar.

En el caso de cálculo en rotura (ELU) se aplica de manera general el diagrama rectangular y para casos particulares que requieran más precisión el diagrama simplificado bilíneal (definido por los puntos A-C-D-E del diagrama multilíneal, ver *Tabla 2.2*). En casos como el de pequeñas deformaciones en servicio (ELS) se aplica el diagrama multilíneal (definido por A-B-C-D-E, ver *Tabla 2.2*), similar al propuesto por la norma alemana. Este diagrama con la resistencia adicional que proporciona el pico A-B-C permite una mejor aproximación y mayor precisión. Los parámetros que definen ambos diagramas son las resistencias a flexión residuales obtenidas a partir de un ensayo a flexión según la Norma Europea (EN 14651, 2005).

Un aspecto a destacar del modelo multilíneal es la definición de la caída de tensión en el comportamiento postfisuración por medio de una resistencia a flexotracción que no corresponde al valor de deformación última como en otros modelos. En este caso se asocia a un punto intermedio correspondiente a un ancho de fisura de 2,5 mm y se cuantifica por medio de una longitud característica  $l_{cs}$  (mínimo entre la distancia media entre fisuras y la altura de la fibra neutra).

Además, la norma española distingue valores distintos de deformación última en función de la sollicitación de la sección: 20‰ para flexión y 10‰ para tracción, de manera análoga a la situación existente para diagrama tensión-deformación en compresión (-3,5‰ para flexión y -2‰ para compresión simple).

Comparando estos modelos con los existentes en otras normas y recomendaciones se observa que el modelo rectangular sigue la misma filosofía que el modelo rígido plástico de la norma italiana, y el modelo multilíneal es similar a los modelos trilineales de la norma alemana y RILEM. En cierto modo se puede decir que la norma española, a pesar de no aportar avances significativos, presenta la ventaja de haber adoptado los conceptos principales de las recomendaciones anteriormente mencionadas.

### **fib Model Code (2010)**

El Código Modelo, sigue el mismo enfoque de la norma italiana, propone dos modelos: el modelo rígido de plástico (un diagrama rectangular) y el modelo lineal-elástico (un diagrama bilíneal) para la caracterización de la respuesta a la tracción del HRF. Los parámetros en ambos diagramas son los mismos que en el CNR-204 DT. Sin embargo, mientras que en la norma italiana éstos, se definen por medio de resistencias a

flexión equivalentes (obtenidas en base a ensayos a flexión de 4 puntos o ensayos a tracción uniaxial), en el Código Modelo utiliza el concepto de resistencia residual a flexión (obtenidas a partir del ensayos a flexión de 3 puntos especificado en la norma EN 14651(2005)).

En este sentido, el Código Modelo aconseja no utilizar tracción uniaxial debido a la dificultad de ejecución e interpretación que dicho ensayo conlleva. Además, añade que, dado el tamaño de la muestra, los resultados estarán afectados por un pequeño número de fibras en el plano de gobierno así como el efecto de orientación de las mismas debido al método de hormigonado.

El Código Modelo, como otras recomendaciones y normativas también presenta factores de seguridad parcial para materiales. Sin embargo, un aspecto que diferencia al Código Modelo del resto de propuestas normativas, es la recomendación de utilizar un factor de orientación ( $K$ ) para el diseño.

Este factor se considera igual a 1 para distribuciones isotrópicas de fibras y se supone inferior o superior a 1 si se demuestra experimentalmente que los efectos de dicha orientación resultan favorables o desfavorables respectivamente. Este enfoque innovador supone un gran avance respecto al resto de recomendaciones normativas anteriores pues ninguna otra considera la influencia de la orientación de las fibras en el diseño estructural. El Código Modelo es el primero en sugerir la realización de ensayos especiales con elementos estructurales para poder definir el efecto de la orientación de las fibras y reproducir el comportamiento del elemento estructural que se pretende diseñar.

## 2.5. COMPORTAMIENTO DIFERIDO DEL HORMIGÓN

### 2.5.1. Componentes y mecanismos de la fluencia

Un elemento de hormigón sometido a unas acciones que generan estados tensionales, presentará unas deformaciones instantáneas derivadas del momento inicial y unas deformaciones diferidas en el tiempo que se producen debido a fenómenos reológicos. El tratamiento tradicional de los fenómenos reológicos del hormigón ha consistido fundamentalmente en separar las deformaciones producidas por la fluencia de las producidas por la retracción<sup>1</sup>. Así, se puede escribir la deformación total del hormigón ( $\varepsilon(t)$ ) como la suma de las deformaciones instantáneas ( $\varepsilon_c(t_0)$ ) y las deformaciones diferidas, tanto por fluencia ( $\varepsilon_c(t)$ ) como por retracción ( $\varepsilon_s(t)$ ).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_c(t_0) + \varepsilon_c(t) + \varepsilon_s(t) \quad [2.2]$$

De forma simplificada, se denomina fluencia del hormigón  $\varepsilon_c(t)$  al conjunto de deformaciones diferidas (no instantáneas) sean o no recuperables bajo un estado tensional constante. En esta Tesis Doctoral se utilizará la nomenclatura propuesta por Neville (2002), que sugirió dividir la fluencia en *básica* y *de secado*.

<sup>1</sup> La idea de separar fluencia de retracción surge del interés en disociar las deformaciones diferidas de procesos donde interviene el nivel de tensiones existente en un elemento, de las que sufriría en caso de no estar sometido a tensión alguna. Así pues, la separación se realiza por definición, teniendo en realidad ambas deformaciones un mismo origen y siendo así como deben ser entendidas (Fernández, 2003).

La fluencia básica consiste en las deformaciones provocadas por una carga sostenida en el tiempo bajo condiciones de humedad relativa constantes y en equilibrio con el medio. Cuando a la aplicación de una carga sostenida en el tiempo se añade el hecho de que el material es simultáneamente sometido a secado, se observa que la deformación total difiere de la suma por separado de la deformación por retracción por secado<sup>2</sup> de la pieza sin carga más la deformación diferida debido a la aplicación de la carga sobre la misma pieza a la que no se permite el secado. Este fenómeno se conoce como efecto Pickett y la deformación en exceso a la fluencia básica y la deformación por retracción se define como fluencia de secado. Esta diferencia es generalmente muy apreciable y puede ser interpretada como una fluencia inducida por retracción o bien como retracción inducida por las tensiones.

Si bien el análisis detallado de los mecanismos que gobiernan el fenómeno de la fluencia no es objeto de esta Tesis, es necesario conocer los procesos que dan origen a las deformaciones diferidas del hormigón. De manera general puede considerarse que el origen de la fluencia se encuentra en la pasta de cemento del hormigón, su composición química, evolución con el tiempo y las variaciones de humedad (Mehta y Monteiro, 2006; Neville 2004, Fernández, 2003).

Estas deformaciones diferidas ocurrirán tanto a compresión como a tracción. Existen numerosos mecanismos que pretenden explicar la relación entre la microestructura del hormigón, el sistema poros-agua y las deformaciones diferidas en el hormigón: *viscous shear theory*, *seepage theory*, *delayed elasticity*, *microcracking*, *mechanical deformation theory*, *plastic flow* (Bazant 1988; Mehta y Monteiro, 2006 o Neville 2004 puede encontrarse una descripción más detallada de los principales modelos teóricos que explican el fenómeno de la fluencia).

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.

### 2.5.2. Deformaciones diferidas en el HRF a flexión

Las investigaciones realizadas, independientemente del tipo de elementos analizados (fisurados o no, reforzados con armadura convencional o no), coinciden en la capacidad del HRF de sostener niveles de carga importantes a lo largo del tiempo y de reducir flechas diferidas en elementos solicitados a flexión respecto de las producidas en hormigón sin fibras (Swamy y Theodorakopoulos, 1979; Purkiss y Blagojevic, 1993; Tan *et al.* 1995; Chanvillard y Roque 1999; Granju *et al.*, 2000; Mackay, 2002; Cochrane 2003; Mackay y Trottier, 2004; Bernard, 2004; Tan y Saha, 2005; Barragán y Zerbino, 2008 y Arango, 2010).

En la *Tabla 2.4* se presentan las investigaciones más destacadas realizadas hasta el momento, siguiendo un criterio cronológico de aparición, sobre la fluencia a flexión en elementos de HRF. En la misma se señalan los factores principales que tienen en cuenta cada una de ellas.

---

<sup>2</sup> La retracción por secado es la componente fundamental de la retracción, desarrollándose sobre el hormigón endurecido. Su origen se encuentra en la microestructura de la pasta de cemento y el intercambio de humedad con el medio.

Tabla 2.4 - Investigaciones de referencia del fenómeno de la fluencia a flexión

Investigación	TIPO DE ENSAYO	FIBRAS ACERO	FIBRAS PLÁSTICAS	TIPO DE ELEMENTO	ELEMENTO FISURADO	DURACIÓN (días)
Swamy y Theodorakopoulos, 1979	flexión	●		Probeta prismática		-
Purkiss y Blagojevic, 1993	flexión	-	-	-		-
Tan et al. 1994	flexión	-	-	Viga		-
Chanvillard y Roque, 1999	flexión	●		Probeta prismática	●	120-200
Granju et al, 2000	flexión	●		Probeta prismática	●	365
Kurtz y Balaguru, 2000	flexión		●	Probeta prismática	●	-
Mackay, 2002	flexión	●	●	Probeta prismática	●	>90
Klinkert et al., 2002	flexión	●		Probeta prismática	●	-
Cochrane, 2003	flexión	●	●	Probeta prismática	●	90+90
Bernard, 2004	flexión		●	Round-panel		90
Mackay y Torttier, 2004	flexión	●	●	Probeta prismática	●	365
Tan y Saha, 2005	flexión	-	-	Viga		365
Bast et al, 2007	flexión	●	●	Probeta prismática	●	90+90+90+90
Barragán y Zerbino, 2008	flexión	●		Probeta prismática	●	120
Kursterle, 2009	flexión		●	Probeta prismática	●	>250
Arango, 2010	flexión	●		Probeta prismática	●	90

El primer estudio de fluencia a flexión en elementos no fisurados de HRF 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. Del análisis de los resultados obtenidos puede concluirse una clara capacidad de los compuestos reforzados con fibras para restringir las flechas (y deformaciones) producidas por la fluencia a flexión, obteniendo reducciones sustanciales en los valores de fluencia ( $\varepsilon_c(t)$ ).

$$(\varepsilon_c(t))_{sin\ fibras} > (\varepsilon_c(t))_{con\ fibras} \quad [2.3]$$

El efecto de las fibras en la reducción de las deformaciones de fluencia ( $\varepsilon_c(t)$ ), en morteros y hormigones, es debido a la restricción adicional en la pasta. De acuerdo con Mangat y Azari (1985) las fibras pueden ser consideradas 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.

Chanvillard y Roque (1999) estudiaron el comportamiento del HRFA con sección fisurada bajo carga sostenida, Kurtz y Balaguru (2000) presentan los resultados de una amplia campaña experimental en la que se estudió el comportamiento a fluencia de elementos prefisurados de HRF (micro fibras de polipropileno y nylon) sometidos a flexión y Bernard (2004) estudió la fluencia de elementos fisurados de HRF y paneles circulares. En esos estudios se han empleado diferentes metodologías, configuraciones (con distintas dimensiones de los elementos ensayados) y equipos de ensayo. Además, suelen quedar limitados a un único nivel de abertura de fisura o flecha, excepto Mackay y Trotter (2004); Barragán y Zerbino (2008) y Arango (2010) que presentan un rango de prefisuración entre 0,2 y 3,5 mm. Respecto de los niveles de carga, Granju et al. (2000) carga a un solo nivel, mientras que en las investigaciones restantes se contempla una mayor variación de niveles de carga, aunque la forma de establecer estos niveles se basa en diferentes consideraciones. Sin embargo, todos ellos concuerdan en que la fisuración (además de otros factores como la edad de aplicación de la carga o el nivel de carga

aplicado entre otros) incide directamente en el fenómeno de la fluencia. De acuerdo con Bernand (2010), no es posible abordar el estudio de las deformaciones diferidas del HRF de forma desacoplada (fibras y hormigón). En este sentido, Boshoff *et al.* (2009a), propone reescribir la *Ec. 9.1* para HRF fisurados añadiendo un término en relación a los efectos diferidos asociados a la fisuración ( $\varepsilon_{cr}(t)$ ) de acuerdo con la ecuación *Ec. 2.3*.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_c(t_0) + \varepsilon_c(t) + \varepsilon_s(t) + \varepsilon_{cr}(t) \quad [2.4]$$

En esa ecuación  $\varepsilon_{cr}(t)$  depende del número y del ancho de las fisuras. Así mismo el aumento del ancho de fisura en el tiempo en elementos bajo carga mantenida puede atribuirse a los efectos diferidos del *pull-out* de las fibras y a la fluencia a tracción de la propia fibra (Boshoff *et al.*, 2009a).

### 2.5.3. Fluencia de las fibras plásticas

Concretamente, en las fibras sintéticas (polímeros termoplásticos como polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon, poliéster), la fluencia es un fenómeno complejo, que depende no sólo de la tensión aplicada y la temperatura (Buratti y Mazotti, 2012) sino de propiedades intrínsecas al material como su orientación molecular o cristalinidad y de otros parámetros externos como la UV y la humedad.

En la *Figura 2.9* se muestran los resultados de los ensayos de fluencia a tracción realizados por Liu *et al.* (2009) sobre probetas de polipropileno de dimensiones: 150x10x4mm. En ellas se evidencia la influencia de la temperatura y de la tensión en el comportamiento a fluencia a tracción del polipropileno, alcanzando incluso fluencia terciaria.

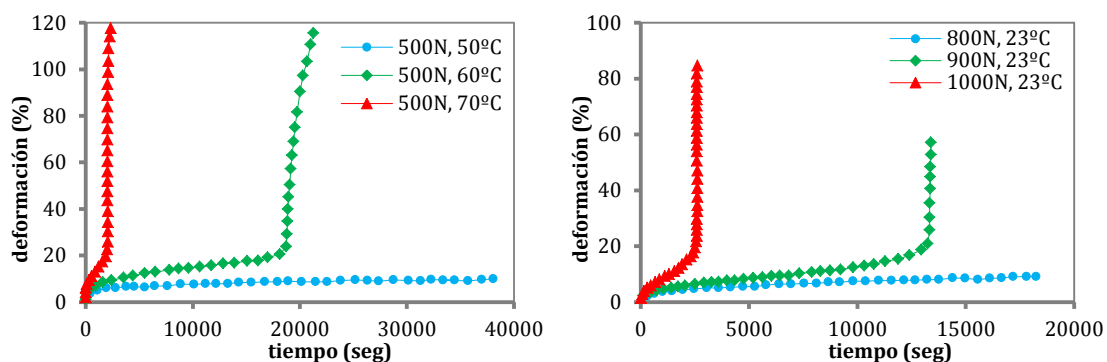
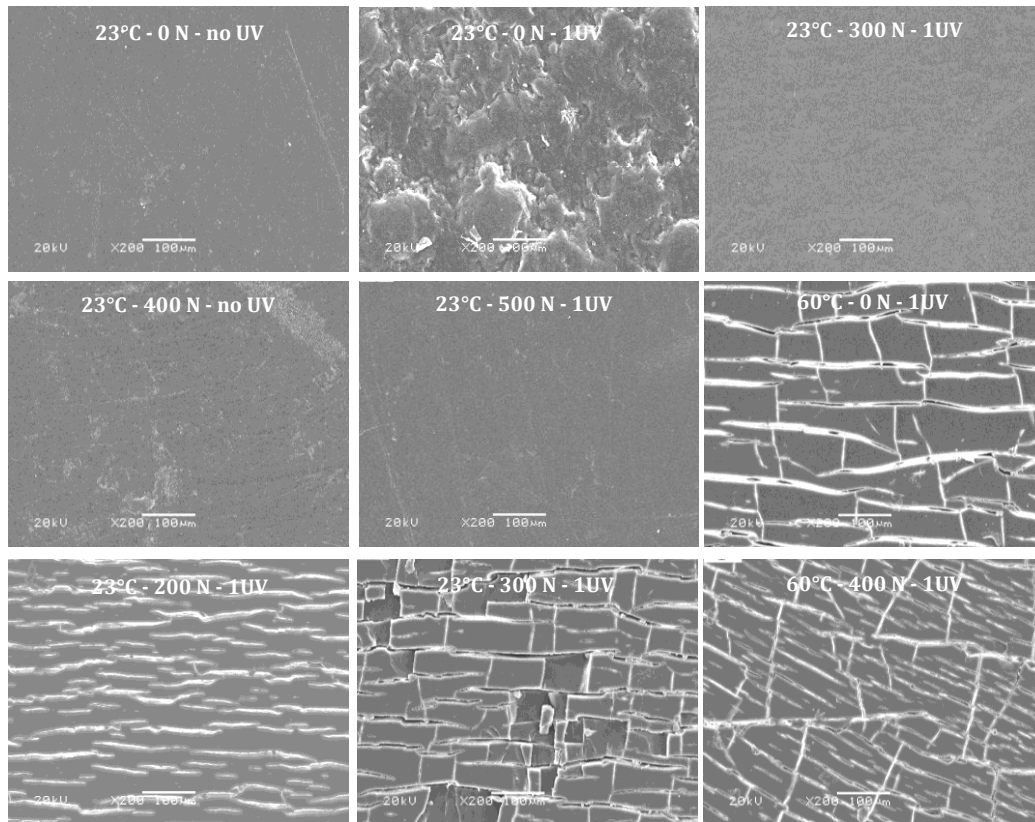


Figura 2.9 - Ensayos de fluencia a tracción sobre probetas de PP. (Liu *et al.*, 2009)

El aumento de la tensión aplicada sobre el material distorsiona las longitudes y ángulos de las cadenas moleculares (por extensión, desenrollamiento o desplazamiento de moléculas). Por otro lado, el aumento de la temperatura produce una expansión gradual del material de lo que resulta un aumento del volumen libre y un debilitamiento de las fuerzas de cohesión intermolecular (fuerzas de Van der Waals) y la radiación de luz UV produce un considerable descenso del peso molecular acompañado de un aumento del contenido de oxígeno, así se acelera el proceso de degradación del polímero, causando

microfisuras en la superficie del mismo (tal y como se aprecia en la *Figura 2.10*). Todo ello resulta en un aumento significativo de la deformación por fluencia.



*Figura 2.10 - Degradación de la superficie de polipropileno como consecuencia de la aplicación de la luz UV, temperatura y tensión (Liu et al., 2009)*