



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y
PROYECTOS DE INGENIERIA CIVIL**

**ANÁLISIS NUMÉRICO-EXPERIMENTAL
DE ELEMENTOS DE
HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO**

Tesis doctoral

Andrés Mauricio Núñez López

Director

Dr. Pedro Serna Ros

Co-Directora

Dr. Tatiana Souza Antunes Ribeiro

Valencia, Enero de 2011

Andrés Mauricio Núñez López
e-mail: andresma23@hotmail.com
Teléfono: +34 667 88 54 55
Valencia (España), 2011

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN.	5
1.2. HIPÓTESIS.	7
1.3. OBJETIVOS.	8
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.	8
1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.	9
1.4. ALCANCE.	9
1.5. METODOLOGIA.	9
1.6. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.	10

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO (HRFA).	17
2.1.1. COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN.	19
2.1.2. COMPORTAMIENTO A TRACCIÓN.	22
2.1.3. COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN.	25
2.2. MODELOS DE COMPORTAMIENTO PARA EL HRFA.	27
2.2.1. CRITERIOS DE ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS DE HRFA.	27
2.2.1.1. Modelo Tensión-Abertura De Fisura.	28
2.2.1.2. Modelo Ancho de la Zona de Proceso de Fractura (Crack Band).	34
2.2.1.3. Modelo Tensión - Deformación.	36
2.2.2. MODELOS DE COMPORTAMIENTO PROPUESTOS EN LOS ÚLTIMOS AÑOS.	37
2.2.3. MODELOS DE COMPORTAMIENTO PROPUESTOS POR NORMATIVAS EUROPEAS.	39
2.3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE ELEMENTOS DE HRFA.	41
2.3.1. MODELO DE HUANG, V. Z. (1995).	41
2.3.2. MODELO DE PADMARAJAIAH, S.K. & RAMASWAMY, A. (2002).	45
2.3.3. MODELO DE ZHU, E.C. ET AL, (2002).	47
2.3.4. MODELO DE DOMINGO, A. (2002).	50

2.3.5. MODELO DE THOMEE, B. ET AL, (2006).	52
2.3.6. MODELO DE THOMAS, J. & RAMASWAMY, A. (2006).	54
2.3.7. MODELO DE STRACK, M. (2008).	56
2.3.8. MODELO DE DOZIO, D. (2008).	60
2.3.9. MODELO DE CUNHA, V.M.C.F. (2009).	63
2.4. RESUMEN CRÍTICO Y CUESTIONES SIN RESOLVER.	64

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

3.1. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.	71
3.2. VARIABLES DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.	73
3.3. PLANIFICACIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.	73
3.4. METODOLOGIA DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.	75
3.5. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS.	80
3.5.1. ENSAYO A FLEXO-TRACCIÓN EN14651 (2005).	81
3.5.2. PROBETA PRISMÁTICA ASTM C 1018 (1997)/UNE 83509 (2004)/ ASTM C 1609 (2007).	86
3.5.3. PANEL CIRCULAR ASTM 1550.	93
3.5.4. PLACA CUADRADA CON CARGA CENTRAL (PLACA 1).	99
3.5.5. PLACA CUADRADA CON CARGA EN VÉRTICES (PLACA 2).	107

CAPÍTULO 4. ESTUDIO NUMÉRICO

4.1. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO NUMÉRICO.	129
4.2. PLANIFICACIÓN DEL ESTUDIO NUMÉRICO.	130
4.3. MODELO PROPUESTO.	132
4.4. VARIABLES Y PARÁMETROS DEL ESTUDIO NUMÉRICO.	137
4.4.1. PARAMETROS QUE SE MANTIENEN FIJOS EN EL ESTUDIO.	137
4.4.2. PARÁMETROS VARIABLES DEL ESTUDIO.	139
4.5. METODOLOGIA DEL ESTUDIO NUMÉRICO.	140
4.6. ESTUDIOS PRELIMINARES.	140
4.7. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL COMPORTAMIENTO DEL HRFA.	150
4.7.1. PROBETA PRISMÁTICA EN14651.	153

4.7.2. PROBETA PRISMÁTICA ASTM1018. _____	156
4.7.3. PANEL CIRCULAR ASTM1550. _____	158
4.7.4. PLACA CUADRADA CON CARGA CENTRAL (PLACA 1). _____	160
4.7.5. CONCLUSIONES PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL COMPORTAMIENTO DEL HRFA. _____	162
4.8. PROFUNDIZACIÓN Y ANÁLISIS DEL EFECTO DE LOS PARÁMETROS PRINCIPALES. _____	164
4.8.1. VARIACIONES Y COMBINACIONES DE f_s Y E_s . _____	164
4.8.2. VARIACIONES Y COMBINACIONES DE f_1 Y f_2 . _____	174
4.8.3. VARIACIONES Y COMBINACIONES DE f_{cb} . _____	180
4.8.4. COMBINACIÓN DE LOS PARÁMETROS. _____	186
4.8.5. COMPARACIÓN DE LOS AJUSTES CON LA VARIABILIDAD DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES. _____	200
4.8.6. ANÁLISIS DE ADECUACIÓN AL CONJUNTO DE LOS ELEMENTOS ENSAYADOS. _____	203

CAPÍTULO 5. EXTRAPOLACIÓN A OTRAS CALIDADES DE HORMIGÓN

5.1. INTRODUCCIÓN. _____	211
5.2. CURVAS CARGA-FLECHA EN14651. _____	212
5.3. CURVAS CARGA-FLECHA ASTM1018. _____	221
5.4. CURVAS CARGA-FLECHA PLACA 1. _____	232
5.5. CURVAS CARGA-FLECHA PLACA 2. _____	240
5.6. CONCLUSIONES DE LA EXTRAPOLACIÓN A OTRAS CALIDADES DE HORMIGÓN. _____	249

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1. CONCLUSIONES. _____	255
6.1.1. CONCLUSIONES ACERCA DE LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL COMPORTAMIENTO DEL HRFA. _____	256
6.1.2. CONCLUSIONES SOBRE LA REPRESENTATIVIDAD DE LOS ENSAYOS NORMALIZADOS Y LAS NECESIDADES DEL NIVEL DE AJUSTE. _____	257
6.1.3. CONCLUSIONES ACERCA DE LA EXTRAPOLACIÓN A OTRAS CALIDADES DE HORMIGÓN. _____	258
6.2. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN. _____	258

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	259
ANEJO A. CURVAS EXPERIMENTALES CARGA-FLECHA DE LAS PROBETAS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL	265
ANEJO B. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL COMPORTAMIENTO DEL HRFA	275
ANEJO C. PROFUNDIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS PRINCIPALES	327
ANEJO D. RANKING DE COMBINACIONES, ESTUDIO EN CONJUNTO, VALORES DE MEDIA CORREGIDA D_c	373

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

Figura 2. 1.	a) Superficie de fractura del HRFA, b) Ejemplo de fibras de diferentes formas	18
Figura 2. 2.	Comportamiento típico de un HRFA a compresión $f_{ctm} = 42 \text{N/mm}^2$ (König y Kützing, 1999)	19
Figura 2. 3.	Relación tensión-deformación a compresión del (a) comportamiento de un HRFA y (b) de un HRFA de alta resistencia con fibras con ganchos (Balaguru y Shah, 1992)	20
Figura 2. 4.	Curvas esfuerzo-deformación en tracción para el HRFA (Adaptado de Serna, 1984)	22
Figura 2. 5.	Comportamiento a tracción uni-axial (Thomé, 2006).	23
Figura 2. 6.	Comportamiento a tracción uni-axial (Balaguru y Shah, 1992).	24
Figura 2. 7.	Comportamiento a flexo-tracción del HRFA (Kooiman, 2000).	26
Figura 2. 8.	Redistribución de tensiones en una sección transversal de HRFA sujeta a flexo-tracción (Kooiman, 2000)	26
Figura 2. 9.	Esquematación de los modelos de análisis.	28
Figura 2. 10.	Modelo de la fisuración ficticia.	28
Figura 2. 11.	Modelo de la fisuración ficticia.	29
Figura 2. 12.	Efecto de puente de las fibras. Mayor longitud de la zona cohesiva gracias a las fibras.	29
Figura 2. 13.	Efecto Cook–Gordon (Li et al, 1993).	31
Figura 2. 14.	Relaciones idealizadas tensión-abertura de fisura ($\sigma-w$).	33
Figura 2. 15.	Definición de la teoría del efecto de puente (Bazant y Oh, 1983).	35
Figura 2. 16.	Diagrama tensión–deformación; a) de acuerdo con DBV-Merkblatt (1992); b) de acuerdo con RILEM TC 162-TDF (2000).	37
Figura 2. 17.	Descripción del comportamiento del HRFA (Huang, V.Z., 1995).	42
Figura 2. 18.	Diagrama para la determinación de E_{eff}^F y D_{BZ}^F (Huang, V.Z., 1995).	43
Figura 2. 19.	Determinación de la resistencia del hormigón después de fisurar (Huang, V.Z., 1995).	43
Figura 2. 20.	Determinación de la armadura equivalente (Huang, V.Z., 1995).	44
Figura 2. 21.	Elemento de la librería del ANSYS® 5.5: a) SOLID65, b) LINK8, y c) COMBIN14.	46
Figura 2. 22.	Representación de un elemento de hormigón pre-tensado reforzado con fibras de acero (Adaptado de Padmarajaiah y Ramaswamy, 2002).	46
Figura 2. 23.	Cuadrilátero iso-paramétrico de ocho nodos para la simulación de láminas delgadas (Zhu et al, 2002)	49
Figura 2. 24.	Modelo propuesto por A. Domingo, 2002 para el HRFA en tracción.	51
Figura 2. 25.	Comportamiento de la sección central de la probeta instantes antes de la fisuración.	51
Figura 2. 26.	Distribución de tensiones de la sección tras la fisuración.	52
Figura 2. 27.	Criterio suavizado de Rankine, sección de tensión diferencial, sección media y tensiones principales tridimensionales.	52
Figura 2. 28.	Dos partes que componen la relación tensión-abertura de fisura para HRFA (Hofstetter y Mang, 1995).	53

Figura 2. 29. Elemento COMBIN39.	54
Figura 2. 30. Detalle del modelo de elementos finitos (MEF).	55
Figura 2. 31. Principio de transferencia de carga discreta entre superficies de fractura y las fibras metálicas (Strack, 2008).	57
Figura 2. 32. Modelo de la rótula plástica (Strack, 2008).	58
Figura 2. 33. Aproximación de sección plana: explicación del modelo kinemático (Tomado de Dozio, 2008).	60
Figura 2. 34. Curva de Compresión Parabólica (Tomada de Dozio, 2008).	61
Figura 2. 35. Prueba de los cuatro puntos: a) curva tracción- abertura de fisura en la punta de la entalla (CTOD), b) modelo rígido plástico. (Tomado de Dozio, 2008).	62
Figura 2. 36. a) Segunda ley constitutiva de tracción: modelo lineal. Diagramas de esfuerzo para la determinación de la resistencia a tracción para el b) ELS 6.5 y c) ELU 6.5. (Tomado de Dozio, 2008).	62
Figura 2. 37. Tercera ley constitutiva de tracción: modelo bi-lineal (bh/bs). (Tomado de Dozio, 2008).	63
Figura 2. 38. Diagrama tensión-deformación basado en la relación experimental fuerza de arrancamiento-deslizamiento.	63

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Figura 3. 1. Estructura del desarrollo de la investigación.	71
Figura 3. 2. Estructura de descomposición de tareas del estudio experimental.	74
Figura 3. 3. Ilustración de los componentes del HRFA.	75
Figura 3. 4. Amasadoras con capacidad nominal de: (a) 60L para la fabricación del hormigón HI, y (b) 150L para la fabricación de los hormigones HA y HB.	77
Figura 3. 5. Ensayo de cono de Abrams.	78
Figura 3. 6. Prueba para la obtención del módulo de Young.	80
Figura 3. 7. Montaje de la probeta EN14651 (2005).	81
Figura 3. 8. Mecanismo de aplicación de la carga EN14651 (2005).	81
Figura 3. 9. Curva media carga-flecha y carga-abertura de fisura (CMOD) experimental de las probetas HI1 y HI2, ensayo EN14651	82
Figura 3. 10. Curva media carga- flecha y carga-abertura de fisura (CMOD) experimental de las probetas HA1, HA2 y HA3, ensayo EN14651.	82
Figura 3. 11. Curva media carga- flecha y carga-abertura de fisura (CMOD) experimental de las probetas HB1, HB2 y HB3, ensayo EN14651	82
Figura 3. 12. Elementos EN14651 fisurados, correspondientes a los hormigones: a) HA1, HA2, HA3, y b) HB1, HB2, y HB3.	86
Figura 3. 13. Configuración del ensayo ASTM1018.	87
Figura 3. 14. Mecanismo de aplicación de carga del ensayo ASTM1018.	87
Figura 3. 15. Curva media carga-flecha experimental de las probetas HI1, HI2, HI3 y HI4, ensayo ASTM1018.	88
Figura 3. 16. Curva media carga-flecha experimental de las probetas HA1, HA2, HA3 y HA4, ensayo ASTM1018.	88
Figura 3. 17. Curva media carga-flecha experimental de las probetas HB1, HB2, HB3 y HB4, ensayo ASTM1018.	88
Figura 3. 18. Elementos ASTM1018 fisurados, correspondientes a los hormigones: a) HA1, HA2, HA3, HA4 y b) HB1, HB2, HB3 y HB4.	93
Figura 3. 19. Configuración del ensayo de la ASTM C 1550 (2005).	94
Figura 3. 20. Configuración de los apoyos según ASTM C 1550 (2005).	94

Figura 3. 21. Curva carga-flecha experimental de la probeta HI1, ensayo ASTM1550.	95
Figura 3. 22. Curva media carga-flecha experimental de las probetas HA1 y HA2, ensayo ASTM1550.	95
Figura 3. 23. Curva media carga-flecha experimental de las probetas HB1 y HB2, ensayo ASTM1550.	95
Figura 3. 24. Elementos ASTM1550 fisurados, correspondientes a los hormigones: a) HI, b) HA1, HA2, c) HB1 y HB2.	98
Figura 3. 25. Configuración de la prueba propuesta para la placa cuadrada con carga puntual en el centro.	99
Figura 3. 26. Configuración de la placa cuadrada, sus apoyos y localización de la carga aplicada.	99
Figura 3. 27. Disposición de los captadores Placa 1.	100
Figura 3. 28. Configuración de los captadores del elemento Placa 1 HI1.	101
Figura 3. 29. Curva carga-flecha experimental de la probeta HI1, placa 1.	102
Figura 3. 30. Curva media carga-flecha experimental de las probetas HA1 y HA2, placa 1.	102
Figura 3. 31. Curva media carga-flecha experimental de las probetas HB1 y HB2, placa 1.	102
Figura 3. 32. Elementos Placa 1 fisurados, correspondientes a los hormigones: a) HI, b) HA1, HA2, c) HB1 y HB2.	105
Figura 3. 33. Curvas carga-abertura de fisura (CMOD) de las probetas a) HI1, b) HA1, c) HA2, d) HB1 y e) HB2, placa 1.	106
Figura 3. 34. Configuración de la prueba propuesta para la placa cuadrada con dos líneas de carga.	107
Figura 3. 35. Configuración de los apoyos y las dos líneas de carga para la placa 2.	108
Figura 3. 36. Disposición de los captadores de la placa 2 en la zona inferior.	109
Figura 3. 37. Disposición de los captadores placa 2 en la zona superior.	110
Figura 3. 38. Configuración de los captadores a) inferiores y b) superiores, del elemento Placa 2 HI1.	111
Figura 3. 39. Curvas carga-flecha experimentales de la probeta HI1, placa 2. Captadores inferiores.	112
Figura 3. 40. Curva media carga-flecha experimental de las probetas HA1 y HA2, Placa 2. Captadores inferiores.	112
Figura 3. 41. Curva media carga-flecha experimental de las probetas HB1 y HB2, Placa 2. Captadores inferiores.	112
Figura 3. 42. Vista inferior de los elementos Placa 2 fisurados, correspondientes a los hormigones: a) HI, b) HA1, c) HA2, d) HB1 y e) HB2.	118
Figura 3. 43. Vista superior de los elementos Placa 2 fisurados, correspondientes a los hormigones: a) HI1, b) HA1, c) HA2, d) HB1 y e) HB2.	119
Figura 3. 44. Curvas carga-abertura de fisura (CMOD) de las probetas a) HI1, b) HA1, c) HA2, d) HB1 y e) HB2, placa 2. Captadores inferiores.	120
Figura 3. 45. Curvas carga-abertura de fisura (CMOD) de las probetas a) HI1, b) HA1, c) HA2, d) HB1, y e) HB2, placa 2. Captadores superiores.	121
Figura 3. 46. Curvas carga-flecha de las probetas a) HA1, b) HA2, c) HB1, y d) HB2, placa 2. Captadores superiores.	122

CAPÍTULO 4. ESTUDIO NUMÉRICO

Figura 4. 1. Estructura del desarrollo de la investigación.	129
Figura 4. 2. Estructura de descomposición de tareas del estudio numérico	131

Figura 4. 3.	Esquema del desarrollo del modelo.	132
Figura 4. 4.	Elemento tri-dimensional SOLID65.	133
Figura 4. 5.	Desarrollo del modelo empleado en ANSYS® V.11.	135
Figura 4. 6.	Comparación de las curvas carga-flecha experimental y numérica, obtenida con el modelo de Huang (1995), EN14651.	145
Figura 4. 7.	Comparación de las curvas carga-flecha experimental y numéricas, obtenidas con el modelo de Huang (1995) y el modelo propuesto, ASTM1018.	146
Figura 4. 8.	Comparación de las curvas carga-flecha experimental y numéricas, obtenidas con el modelo de Huang (1995) y el modelo propuesto, ASTM1550.	147
Figura 4. 9.	Comparación de las curvas carga-flecha experimental y numéricas, obtenidas con el modelo de Huang (1995) y el modelo propuesto, placa 1.	148
Figura 4. 10.	Comparación de las curvas carga-flecha experimental y numérica, obtenida con el modelo de Huang (1995), placa 2.	149
Figura 4. 11.	Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 11 combinaciones de parámetros y su comparación con la curva experimental del hormigón HI, EN14651.	154
Figura 4. 12.	Grupos en los que se dividieron las pruebas numéricas, EN14651.	154
Figura 4. 13.	Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 16 combinaciones de parámetros y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, ASTM1018.	156
Figura 4. 14.	Grupos en los que se dividieron las pruebas numéricas, ASTM1018.	156
Figura 4. 15.	Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 16 combinaciones de parámetros y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, ASTM1550.	158
Figura 4. 16.	Grupos en los que se dividieron las pruebas numéricas, ASTM1018.	159
Figura 4. 17.	Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 16 combinaciones de parámetros y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, placa 1.	160
Figura 4. 18.	Grupos en los que se dividieron las pruebas numéricas, placa 1.	161
Figura 4. 19.	Valores de energía para una flecha de 1,0mm, variando los parámetros: a) Es y b) f1, EN14651.	163
Figura 4. 20.	Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 36 combinaciones de fs y Es, y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, EN14651.	166
Figura 4. 21.	Combinaciones de fs_Es más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, EN14651.	167
Figura 4. 22.	Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 36 combinaciones de fs y Es, y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, ASTM1018.	167
Figura 4. 23.	Combinaciones de fs_Es más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, ASTM1018.	168
Figura 4. 24.	Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 36 combinaciones de fs y Es, y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, Placa 1.	168
Figura 4. 25.	Combinaciones de fs_Es más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, Placa 1.	169
Figura 4. 26.	Combinaciones de fs_Es con forma similar pero nivel de carga mayor al experimental del hormigón HI, Placa 1.	169

Figura 4. 27. Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 36 combinaciones de f_s y E_s , y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, Placa 2. (NC= No Converge).	170
Figura 4. 28. Combinaciones de f_s _Es más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, Placa 2.	170
Figura 4. 29. Combinaciones de f_s _Es con forma similar pero nivel de carga mayor al experimental del hormigón HI, Placa 2.	171
Figura 4. 30. Valores de energía a: a) PF primera fisura y b) nivel de flecha de 0,5mm, correspondientes a las combinaciones de f_s _Es, elemento EN14651, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	171
Figura 4. 31. Valores de energía a: a) PF primera fisura, y niveles de flechas de b) 0,5mm, c) 1mm, d) 1,5mm, e) 2mm y f) 2,5mm, correspondientes a las combinaciones de f_s _Es, elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	172
Figura 4. 32. Valores de energía a: a) PF primera fisura, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm, f) 8mm, y g) 10mm, correspondientes a las combinaciones de f_s _Es, elemento Placa 2, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	174
Figura 4. 33. Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 26 combinaciones de f_1 y f_2 , y su comparación con la curva experimental del hormigón HI, EN14651.	176
Figura 4. 34. Combinaciones de f_1 _f2 más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, EN14651.	176
Figura 4. 35. Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 26 combinaciones de f_1 y f_2 , y su comparación con la curva experimental del hormigón HI, ASTM1018.	177
Figura 4. 36. Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 26 combinaciones de f_1 y f_2 , y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, Placa 1.	177
Figura 4. 37. Combinaciones de f_1 _f2 más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, Placa 1.	178
Figura 4. 38. Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 26 combinaciones de f_1 y f_2 , y su comparación con la curva experimental del hormigón HI, Placa 2.	178
Figura 4. 39. Combinaciones de f_1 _f2 más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, Placa 2.	179
Figura 4. 40. Valores de energía a: a) PF primera fisura, y a niveles de flecha b) 0,5mm, c) 1mm, d) 1,5mm, e) 2mm, y f) 2,5mm, correspondientes a las combinaciones de f_1 _f2, elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	180
Figura 4. 41. Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 23 variaciones de f_{cb} y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, EN14651.	182
Figura 4. 42. Combinaciones de f_{cb} más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, EN14651.	183
Figura 4. 43. Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 23 variaciones de f_{cb} y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, ASTM1018.	183
Figura 4. 44. Combinaciones de f_{cb} más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, ASTM1018.	184
Figura 4. 45. Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 23 variaciones de f_{cb} y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, Placa 1.	184

Figura 4. 46. Combinaciones de fcb más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, Placa 1.	185
Figura 4. 47. Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 23 variaciones de fcb y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, Placa 2.	185
Figura 4. 48. Cálculo de la diferencia de área bajo la curva (energía) entre la curva numérica y la media experimental para el tramo BC.	191
Figura 4. 49. Comparación curva carga-flecha experimental media con la curva carga-flecha numérica 107, correspondiente a la mejor combinación de acuerdo con ranking individual, EN14651.	193
Figura 4. 50. Comparación curva carga-flecha experimental media con la curva carga-flecha numérica 93, correspondiente a la mejor combinación de acuerdo con ranking individual, ASTM1018.	194
Figura 4. 51. Comparación curva carga-flecha experimental media con la curva carga-flecha numérica 96, correspondiente a la mejor combinación de acuerdo con ranking individual, Placa 1.	194
Figura 4. 52. Comparación curva carga-flecha experimental media con la curva carga-flecha numérica 96, correspondiente a la mejor combinación de acuerdo con ranking individual, Placa 2.	194
Figura 4. 53. Comparación curva carga-flecha experimental media con la curva carga-flecha numérica 43, correspondiente a una de las mejores combinaciones de acuerdo con la verificación gráfica y el ranking individual, ASTM1018.	195
Figura 4. 54. Comparación curva carga-flecha experimental media con la curva carga-flecha numérica 97, correspondiente a una de las mejores combinaciones de acuerdo con la verificación gráfica y el ranking individual, EN14651.	196
Figura 4. 55. Comparación curva carga-flecha experimental media con la curva carga-flecha numérica 161, correspondiente a una de las mejores combinaciones de acuerdo con la verificación gráfica y el ranking individual, Placa 2.	196
Figura 4. 56. Comparación curva carga-flecha experimental media con la curva carga-flecha numérica 87, correspondiente a una de las mejores combinaciones de acuerdo con la verificación gráfica, ASTM1018.	197
Figura 4. 57. Comparación curva carga-flecha experimental media con la curva carga-flecha numérica 123, correspondiente a una de las mejores combinaciones de acuerdo con la verificación gráfica, Placa 1.	197
Figura 4. 58. Comparación curva carga-flecha experimental media con la curva carga-flecha numérica 123, correspondiente a una de las mejores combinaciones de acuerdo con la verificación gráfica, Placa 2.	198
Figura 4. 59. Comparación curva carga-flecha experimental media con la curva carga-flecha numérica de la combinación 123 fr (55%) para los elementos: a) Placa 1 HI, y b) Placa 2 HI.	199

CAPÍTULO 5. EXTRAPOLACIÓN A OTRAS CALIDADES DE HORMIGÓN

Figura 5. 1. Relación de las combinaciones numéricas elegidas y los hormigones HI, HA y HB.	211
Figura 5. 2. Comparación curva carga-flecha experimental media EN14651 HI con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, y g) C161, EN14651 HI.	213

Figura 5. 3.	Comparación curva carga-flecha experimental media EN14651 HA con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, y g) C161, EN14651 HA. _____	214
Figura 5. 4.	Comparación curva carga-flecha experimental media EN14651 HB con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, y g) C161, EN14651 HB. _____	215
Figura 5. 5.	Diagrama de: a) tensiones principales de la combinación 107, b) tensiones principales de la combinación 97, c) deformación principal de la combinación 107 y d) deformación principal de la combinación 97, EN14651 HA. _____	220
Figura 5. 6.	a) Fisuración de la probeta, y mapa de fisuración numérico b) combinación 107, y c) combinación 97, EN14651 HA. _____	220
Figura 5. 7.	Diagrama de flecha y diagrama de posición inicial y final de la combinación a) 107 y b) 97, EN14651 HA. (Valores numéricos en metros). _____	221
Figura 5. 8.	Comparación curva carga-flecha experimental media ASTM1018 HI con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, g) C123, y h) C161, ASTM1018 HI. _____	223
Figura 5. 9.	Comparación curva carga-flecha experimental media ASTM1018 HA con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, y g) C161, ASTM1018 HA. _____	224
Figura 5. 10.	Comparación curva carga-flecha experimental media ASTM1018 HB con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, y g) C161, ASTM1018 HB. _____	225
Figura 5. 11.	Diagrama de: a) tensiones principales de la combinación 43, b) tensiones principales de la combinación 93, c) deformación principal de la combinación 43 y d) deformación principal de la combinación 93, ASTM1018 HB. _____	230
Figura 5. 12.	a) Fisuración de la probeta, y mapa de fisuración numérico b) combinación 43, y c) combinación 93, ASTM1018 HB. _____	230
Figura 5. 13.	Diagrama de flecha y diagrama de posición inicial y final de la combinación a) 43 y b) 93, ASTM1018 HB. _____	231
Figura 5. 14.	Comparación curva carga-flecha experimental media ASTM1018 HA con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a: a) combinación C123 con modificaciones en Es y fcb, y b) mejores combinaciones C43, C93 y C123 con modificación. _____	231
Figura 5. 15.	Comparación curva carga-flecha experimental media Placa 1 HI con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, g) C161, y h) C123 fr (55%), Placa 1 HI. _____	234
Figura 5. 16.	Comparación curva carga-flecha experimental media Placa 1 HA con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, g) C161, y h) C123 fr (55%), Placa 1 HA. _____	235
Figura 5. 17.	Comparación curva carga-flecha experimental media Placa 1 HB con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, g) C161, y h) C123 fr (55%), Placa 1 HB. _____	237
Figura 5. 18.	Diagrama de a) tensiones principales y b) deformación principal, de la combinación 123 con reducción en la resistencia residual al 55%, Placa 1 HA. _____	239

Figura 5. 19. a) Fisuración de la probeta, y b) mapa de fisuración numérico, combinación 123 con reducción en la resistencia residual al 55%, Placa 1 HA. _____	239
Figura 5. 20. a) Diagrama de flecha y b) diagrama de posición inicial y final vista frontal y lateral, combinación 123 con reducción en la resistencia residual al 55%, Placa 1 HA. _____	240
Figura 5. 21. Comparación curva carga-flecha experimental media Placa 2 HI con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, g) C161, y h) C123 fr (55%), Placa 2 HI. _____	242
Figura 5. 22. Comparación curva carga-flecha experimental media Placa 2 HA con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, g) C161, y h) C123 fr (55%), Placa 2 HA. _____	243
Figura 5. 23. Comparación curva carga-flecha experimental media Placa 2 HB con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, y g) C123 fr (55%), Placa 2 HB. _____	245
Figura 5. 24. Diagrama de a) tensiones inferiores, b) tensiones superiores, c) deformaciones inferiores, y d) deformaciones superiores, de la combinación 123 con reducción en la resistencia residual al 55%, Placa 2 HA. _____	247
Figura 5. 25. a) Fisuración de la probeta, y b) mapa de fisuración numérico, combinación 123 con reducción en la resistencia residual al 55%, Placa 2 HA. _____	248
Figura 5. 26. a) Diagrama de flecha y b) diagrama de posición inicial y final vista frontal y lateral, combinación 123 con reducción en la resistencia residual al 55%, Placa 2 HA. _____	248

ANEJO A. CURVAS EXPERIMENTALES CARGA-FLECHA DE LAS PROBETAS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

Figura A. 1. Curvas carga-flecha de las probetas de los hormigones: a) HI, b) HA y c) HB, EN14651. _____	268
Figura A. 2. Curvas carga-flecha de las probetas de los hormigones: a) HI, b) HA y c) HB, ASTM1018. _____	269
Figura A. 3. Curvas carga-flecha de las probetas de los hormigones: a) HI, b) HA y c) HB, ASTM1550. _____	270
Figura A. 4. Curvas carga-flecha de las probetas de los hormigones: a) HI, b) HA y c) HB, Placa 1. _____	271
Figura A. 5. Curvas carga-flecha de las probetas de los hormigones: a) HI, b) HA1, c) HA2, d) HB1 y e) HB2, Placa 2. _____	273

ANEJO B. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL COMPORTAMIENTO DEL HRFA

Figura B. 1. Valores de energía a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro Es, EN14651. _____	279
Figura B. 2. Valores de energía a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro f1, EN14651. _____	280

Figura B. 3.	Valores de energía a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro f2, EN14651. _____	280
Figura B. 4.	Valores de energía a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro fcb, EN14651. _____	281
Figura B. 5.	Valores de energía a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro fs, EN14651. _____	282
Figura B. 6.	Valores de energía a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro Bt, EN14651. _____	282
Figura B. 7.	Valores de carga a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro Es, EN14651. _____	283
Figura B. 8.	Valores de carga a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro f1, EN14651. _____	284
Figura B. 9.	Valores de carga a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro f2, EN14651. _____	284
Figura B. 10.	Valores de carga a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro fcb, EN14651. _____	285
Figura B. 11.	Valores de carga a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro fs, EN14651. _____	286
Figura B. 12.	Valores de carga a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro Bt, EN14651. _____	286
Figura B. 13.	Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro Es, ASTM1018. _____	288
Figura B. 14.	Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro f1, ASTM1018. _____	289
Figura B. 15.	Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro f2, ASTM1018. _____	290
Figura B. 16.	Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro fcb, ASTM1018. _____	291
Figura B. 17.	Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro fs, ASTM1018. _____	292
Figura B. 18.	Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro Bt, ASTM1018. _____	293
Figura B. 19.	Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro Es, ASTM1018. _____	294
Figura B. 20.	Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro f1, ASTM1018. _____	295
Figura B. 21.	Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro f2, ASTM1018. _____	296
Figura B. 22.	Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro fcb, ASTM1018. _____	297
Figura B. 23.	Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro fs, ASTM1018. _____	298
Figura B. 24.	Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro Bt, ASTM1018. _____	299
Figura B. 25.	Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro Es, ASTM1550. _____	301
Figura B. 26.	Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro f1, ASTM1550. _____	302
Figura B. 27.	Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro f2, ASTM1550. _____	303
Figura B. 28.	Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro fcb, ASTM1550. _____	304

Figura B. 29. Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro f_s , ASTM1550. _____	305
Figura B. 30. Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro B_t , ASTM1550. _____	306
Figura B. 31. Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro E_s , ASTM1550. _____	307
Figura B. 32. Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro f_1 , ASTM1550. _____	308
Figura B. 33. Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro f_2 , ASTM1550. _____	309
Figura B. 34. Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro f_{cb} , ASTM1550. _____	310
Figura B. 35. Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro f_s , ASTM1550. _____	311
Figura B. 36. Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro B_t , ASTM1550. _____	312
Figura B. 37. Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro E_s , Placa 1. _____	314
Figura B. 38. Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro f_1 , Placa 1. _____	315
Figura B. 39. Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro f_2 , Placa 1. _____	316
Figura B. 40. Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro f_{cb} , Placa 1. _____	317
Figura B. 41. Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro f_s , Placa 1. _____	318
Figura B. 42. Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro B_t , Placa 1. _____	319
Figura B. 43. Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro E_s , Placa 1. _____	320
Figura B. 44. Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro f_1 , Placa 1. _____	321
Figura B. 45. Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro f_2 , Placa 1. _____	322
Figura B. 46. Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro f_{cb} , Placa 1. _____	323
Figura B. 47. Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro f_s , Placa 1. _____	324
Figura B. 48. Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro B_t , Placa 1. _____	325

ANEJO C. PROFUNDIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS PRINCIPALES

Figura C. 1. Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 0,5 mm (b), 1mm (c), 1,5 mm (d), 2,5mm (e) y 3,5mm (f) correspondientes a las combinaciones de $f_s E_s$, elemento EN14651, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	331
---	-----

Figura C. 2.	Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 0,5 mm (b), 1mm (c), 1,5 mm (d), 2,5mm (e) y 3,5mm (f) correspondientes a las combinaciones de $f_s E_s$, elemento EN14651, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	332
Figura C. 3.	Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 0,5 mm (b), 1mm (c), 1,5 mm (d), 2mm (e) y 2,5mm (f) correspondientes a las combinaciones de $f_s E_s$, elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	334
Figura C. 4.	Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 0,5 mm (b), 1mm (c), 1,5 mm (d), 2mm (e) y 2,5mm (f) correspondientes a las combinaciones de $f_s E_s$, elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	335
Figura C. 5.	Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de $f_s E_s$, elemento Placa 1, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	338
Figura C. 6.	Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de $f_s E_s$, elemento Placa 1, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	339
Figura C. 7.	Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de $f_s E_s$, elemento Placa 2, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	342
Figura C. 8.	Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de $f_s E_s$, elemento Placa 2, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	343
Figura C. 9.	Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 0,5 mm (b), 1mm (c) y 1,5mm (d), correspondientes a las combinaciones de $f_1 f_2$, elemento EN14651, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	345
Figura C. 10.	Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 0,5 mm (b), 1mm (c) y 1,5mm (d), correspondientes a las combinaciones de $f_1 f_2$, elemento EN14651, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	346
Figura C. 11.	Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 0,5 mm (b), 1mm (c), 1,5 mm (d), 2mm (e) y 2,5mm (f) correspondientes a las combinaciones de $f_1 f_2$, elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	348
Figura C. 12.	Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 0,5 mm (b), 1mm (c), 1,5 mm (d), 2mm (e) y 2,5mm (f) correspondientes a las combinaciones de $f_1 f_2$, elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	349
Figura C. 13.	Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de $f_1 f_2$, elemento Placa 1, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	352
Figura C. 14.	Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de $f_1 f_2$, elemento Placa 1, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.	353

Figura C. 15. Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de f_1 f_2 , elemento Placa 2, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	356
Figura C. 16. Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de f_1 f_2 , elemento Placa 2, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	357
Figura C. 17. Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 0,5 mm (b), 1mm (c), 1,5 mm (d), 2,5mm (e) y 3,5mm (f) correspondientes a las combinaciones de f_{cb} , elemento EN14651, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	359
Figura C. 18. Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 0,5 mm (b), 1mm (c), 1,5 mm (d), 2,5mm (e) y 3,5mm (f) correspondientes a las combinaciones de f_{cb} , elemento EN14651, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	360
Figura C. 19. Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 0,5mm (b), 1mm (c), 1,5mm (d), 2mm (e) y 2,5mm (f) correspondientes a las combinaciones de f_{cb} , elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	362
Figura C. 20. Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 0,5mm (b), 1mm (c), 1,5mm (d), 2mm (e) y 2,5mm (f) correspondientes a las combinaciones de f_{cb} , elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	363
Figura C. 21. Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de f_{cb} , elemento Placa 1, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	366
Figura C. 22. Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de f_{cb} , elemento Placa 1, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	367
Figura C. 23. Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de f_{cb} , elemento Placa 2, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	370
Figura C. 24. Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de f_{cb} , elemento Placa 2, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	371

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

Tabla 2. 1.	Inicios de la investigación del HRFA. _____	17
Tabla 2. 2.	Aportes más destacados del comportamiento del HRFA a compresión, _____	21
Tabla 2. 3.	Modelos de comportamiento existentes para el HRFA. _____	38
Tabla 2. 4.	Modelos de comportamiento propuestos por normativas europeas (Blanco et al, 2009). _____	40
Tabla 2. 5.	Simulación numérica del HRFA desde 1995 hasta 2010. _____	41
Tabla 2. 6.	Elementos de la librería del ANSYS® 5.5 utilizados por Padmarajaiah y Ramaswamy, (2002). _____	45

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Tabla 3. 1.	Dimensiones de los elementos elaborados y ensayados. _____	72
Tabla 3. 2.	Variables correspondientes al hormigón y a las fibras para los tres tipos de hormigón. _____	73
Tabla 3. 3.	Variables correspondientes a los elementos elaborados. _____	73
Tabla 3. 4.	Dosificación del hormigón inicial (HI). _____	75
Tabla 3. 5.	Cantidad de elementos realizados con cada hormigón. _____	76
Tabla 3. 6.	Distribución de amasadas para cada hormigonera. _____	76
Tabla 3. 7.	Procedimiento de amasado. _____	77
Tabla 3. 8.	Resultados del ensayo cono de Abrams para los hormigones HI, HA y HB. ____	78
Tabla 3. 9.	Resistencia a compresión (f_c) de los hormigones HI, HA y HB. _____	79
Tabla 3. 10.	Módulos de Young de los hormigones HI, HA y HB. _____	80
Tabla 3. 11.	Resultados obtenidos del ensayo EN14651 para el hormigón HI. _____	83
Tabla 3. 12.	Resultados obtenidos del ensayo EN14651 para el hormigón HA. _____	83
Tabla 3. 13.	Resultados obtenidos del ensayo EN14651 para el hormigón HB. _____	84
Tabla 3. 14.	Energías de las probetas del hormigón HI, ensayo EN14651. _____	84
Tabla 3. 15.	Energías de las probetas del hormigón HA, ensayo EN14651. _____	84
Tabla 3. 16.	Energías de las probetas del hormigón HB, ensayo EN14651. _____	85
Tabla 3. 17.	Cargas de las probetas del hormigón HI, ensayo EN14651. _____	85
Tabla 3. 18.	Cargas de las probetas del hormigón HA, ensayo EN14651. _____	85
Tabla 3. 19.	Cargas de las probetas del hormigón HB, ensayo EN14651. _____	86
Tabla 3. 20.	Resultados obtenidos del ensayo ASTM1018 para el hormigón HI. _____	89
Tabla 3. 21.	Resultados obtenidos del ensayo ASTM1018 para el hormigón HA. _____	89
Tabla 3. 22.	Resultados obtenidos del ensayo ASTM1018 para el hormigón HB. _____	89
Tabla 3. 23.	Energías de las probetas del hormigón HI, ensayo ASTM1018. _____	91
Tabla 3. 24.	Energías de las probetas del hormigón HA, ensayo ASTM1018. _____	91
Tabla 3. 25.	Energías de las probetas del hormigón HB, ensayo ASTM1018. _____	91
Tabla 3. 26.	Cargas de las probetas del hormigón HI, ensayo ASTM1018. _____	92
Tabla 3. 27.	Cargas de las probetas del hormigón HA, ensayo ASTM1018. _____	92
Tabla 3. 28.	Cargas de las probetas del hormigón HB, ensayo ASTM1018. _____	92
Tabla 3. 29.	Energías de la probeta del hormigón HI, ensayo ASTM1550. _____	96

Tabla 3. 30. Energías de las probetas del hormigón HA, ensayo ASTM1550. _____	96
Tabla 3. 31. Energías de las probetas del hormigón HB, ensayo ASTM1550. _____	96
Tabla 3. 32. Cargas de las probetas del hormigón HI, ensayo ASTM1550. _____	97
Tabla 3. 33. Cargas de las probetas del hormigón HA, ensayo ASTM1550. _____	97
Tabla 3. 34. Cargas de las probetas del hormigón HB, ensayo ASTM1550. _____	97
Tabla 3. 35. Energías de la probeta del hormigón HI, Placa 1. _____	103
Tabla 3. 36. Energías de las probetas del hormigón HA, placa 1. _____	103
Tabla 3. 37. Energías de las probetas del hormigón HB, placa 1. _____	103
Tabla 3. 38. Cargas de la probeta HI, placa 1. _____	104
Tabla 3. 39. Cargas de las probetas del hormigón HA, placa 1. _____	104
Tabla 3. 40. Cargas de las probetas del hormigón HB, placa 1. _____	104
Tabla 3. 41. Energías de la probeta del hormigón HI registradas en cada uno de los captadores, placa 2. _____	113
Tabla 3. 42. Energías de las probetas HA1 y HA2 del hormigón HA registradas en el captador 1, Placa 2. _____	113
Tabla 3. 43. Energías de las probetas HA1 y HA2 del hormigón HA registradas en el captador 2, Placa 2. _____	113
Tabla 3. 44. Energías de las probetas HA1 y HA2 del hormigón HA registradas en el captador 3, Placa 2. _____	114
Tabla 3. 45. Energías de las probetas HB1 y HB2 del hormigón HB registradas en el captador 1, Placa 2. _____	114
Tabla 3. 46. Energías de las probetas HB1 y HB2 del hormigón HB registradas en el captador 2, Placa 2. _____	114
Tabla 3. 47. Energías de las probetas HB1 y HB2 del hormigón HB registradas en el captador 3, Placa 2. _____	115
Tabla 3. 48. Cargas de la probeta del hormigón HI registradas en cada uno de los captadores, Placa 2. _____	115
Tabla 3. 49. Cargas de las probetas HA1 y HA2 del hormigón HA registradas en el captador 1, Placa 2. _____	116
Tabla 3. 50. Cargas de las probetas HA1 y HA2 del hormigón HA registradas en el captador 2, Placa 2. _____	116
Tabla 3. 51. Cargas de las probetas HA1 y HA2 del hormigón HA registradas en el captador 3, Placa 2. _____	116
Tabla 3. 52. Cargas de las probetas HB1 y HB2 del hormigón HB registradas en el captador 1, Placa 2. _____	117
Tabla 3. 53. Cargas de las probetas HB1 y HB2 del hormigón HB registradas en el captador 2, Placa 2. _____	117
Tabla 3. 54. Cargas de las probetas HB1 y HB2 del hormigón HB registradas en el captador 3, Placa 2. _____	117

CAPÍTULO 4. ESTUDIO NUMÉRICO

Tabla 4. 1. Parámetros considerados en el modelo. _____	137
Tabla 4. 2. Planteamiento de las simulaciones. _____	141
Tabla 4. 3. Volumen y mallado de los elementos simulados. _____	142
Tabla 4. 4. Restricciones de desplazamiento de los elementos simulados. _____	144
Tabla 4. 5. Comparación de los datos experimentales y numéricos del ensayo propuesto por EN14651, obtenidos con el modelo de Huang (1995). _____	145
Tabla 4. 6. Comparación de los datos experimental y numéricos, obtenidos con el modelo de Huang (1995) y el modelo propuesto, ASTM1018. _____	146

Tabla 4. 7.	Comparación de los datos experimental y numéricos, obtenidos con el modelo de Huang (1995) y el modelo propuesto, ASTM1550. _____	147
Tabla 4. 8.	Comparación de los datos experimentales y numéricos obtenidos con el modelo de Huang (1995) y el modelo propuesto, placa 1. _____	148
Tabla 4. 9.	Comparación de los datos experimentales y numéricos obtenidos con el modelo de Huang (1995), placa 2. _____	149
Tabla 4. 10.	Características a estudiar de cada elemento. _____	151
Tabla 4. 11.	Niveles o valores para cada parámetro. _____	151
Tabla 4. 12.	Pruebas numéricas, combinación de niveles de parámetros. _____	152
Tabla 4. 13.	Pruebas numéricas, combinación de niveles de parámetros con sus respectivos valores numéricos. _____	153
Tabla 4. 14.	Resultados del análisis de varianza ANOVA para la identificación de los parámetros más influyentes en cuanto a carga soportada por el elemento EN14651. _____	155
Tabla 4. 15.	Resultados del análisis de varianza ANOVA para la identificación de los parámetros más influyentes en cuanto a energía disipada en el ensayo del elemento EN14651. _____	155
Tabla 4. 16.	Resultados del análisis de varianza ANOVA para la identificación de los parámetros más influyentes en cuanto a carga soportada por el elemento ASTM1018. _____	157
Tabla 4. 17.	Resultados del análisis de varianza ANOVA para la identificación de los parámetros más influyentes en cuanto a energía disipada en el ensayo del elemento ASTM1018. _____	157
Tabla 4. 18.	Resultados del análisis de varianza ANOVA para la identificación de los parámetros más influyentes en cuanto a carga soportada por el elemento ASTM1550. _____	159
Tabla 4. 19.	Resultados del análisis de varianza ANOVA para la identificación de los parámetros más influyentes en cuanto a energía disipada en el ensayo del elemento ASTM1550. _____	160
Tabla 4. 20.	Resultados del análisis de varianza ANOVA para la identificación de los parámetros más influyentes en cuanto a carga soportada por el elemento placa 1. _____	161
Tabla 4. 21.	Resultados del análisis de varianza ANOVA para la identificación de los parámetros más influyentes en cuanto a energía disipada en el ensayo del elemento placa 1. _____	162
Tabla 4. 22.	Resumen de los parámetros más influyentes en la carga y energía para cada uno de los elementos analizados. _____	163
Tabla 4. 23.	Valores de los parámetros fijos para cada una de las variaciones de f_s y E_s . _	165
Tabla 4. 24.	Variación de los valores de f_s y E_s . _____	165
Tabla 4. 25.	Matriz de las 36 combinaciones resultantes de las variaciones de f_s y E_s . ____	166
Tabla 4. 26.	Valores de los parámetros fijos para cada una de las variaciones de f_1 y f_2 . _	174
Tabla 4. 27.	Variación de los valores de f_1 y f_2 . _____	175
Tabla 4. 28.	Matriz de las 26 combinaciones resultantes de las variaciones de f_1 y f_2 . ____	175
Tabla 4. 29.	Valores de los parámetros fijos para cada variación de f_{cb} . _____	181
Tabla 4. 30.	Variación de los valores de f_{cb} . _____	181
Tabla 4. 31.	Matriz de combinaciones para el ajuste de parámetros. _____	186
Tabla 4. 32.	Peso asignado a cada uno de los tramos para cada elemento. _____	191
Tabla 4. 33.	Cinco mejores combinaciones para cada elemento. _____	193
Tabla 4. 34.	Relación de los parámetros influyentes con las combinaciones elegidas. ____	200
Tabla 4. 35.	Valores de D_c con respecto a la curva media experimental de los hormigones HI, HA y HB, EN14651. _____	201

Tabla 4. 36. Valores de Dc con respecto a la curva media experimental de los hormigones HI, HA y HB, ASTM1018. _____	201
Tabla 4. 37. Valores de Dc con respecto a la curva media experimental de los hormigones HA y HB, Placa 1. _____	202
Tabla 4. 38. Valores de Dc con respecto a la curva media experimental del captador 2 para los hormigones HA y HB, Placa 2. _____	202
Tabla 4. 39. Valores de Dc obtenidos con las combinaciones numéricas 96 y 123 con reducción en la resistencia residual fr a un 55%. _____	203
Tabla 4. 40. Valores de Dc y posición dentro del ranking individual de las combinaciones elegidas. _____	204
Tabla 4. 41. Criterio de ordenación de las mejores combinaciones, para el conjunto de los cuatro elementos. _____	204
Tabla 4. 42. Mejores combinaciones para el conjunto de los cuatro elementos. _____	204
Tabla 4. 43. Coeficiente de Kendall (W) para grupo de elementos. _____	205

CAPÍTULO 5. EXTRAPOLACIÓN A OTRAS CALIDADES DE HORMIGÓN

Tabla 5. 1. Comparación de las principales características de la curva carga flecha experimental y numérica (C 107) para los hormigones HI, HA y HB del elemento EN14651. _____	216
Tabla 5. 2. Comparación de las principales características de la curva carga flecha experimental y numérica (C 97) para los hormigones HI, HA y HB del elemento EN14651. _____	217
Tabla 5. 3. Comparación de la capacidad de disipación de energía entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 107), EN14651. _____	218
Tabla 5. 4. Comparación de la capacidad de disipación de energía entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 97), EN14651. _____	218
Tabla 5. 5. Comparación de la carga a diferentes niveles de flecha entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 107), EN14651. _____	219
Tabla 5. 6. Comparación de la carga a diferentes niveles de flecha entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 97), EN14651. _____	219
Tabla 5. 7. Comparación de las principales características de la curva carga flecha experimental y numérica (C 43) para los hormigones HI, HA y HB del elemento ASTM1018. _____	226
Tabla 5. 8. Comparación de las principales características de la curva carga flecha experimental y numérica (C 93) para los hormigones HI, HA y HB del elemento ASTM1018. _____	227
Tabla 5. 9. Comparación de la capacidad de disipación de energía entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 43), ASTM1018. _____	228
Tabla 5. 10. Comparación de la capacidad de disipación de energía entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 93), ASTM1018. _____	228
Tabla 5. 11. Comparación de la carga a diferentes niveles de flecha entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 43), ASTM1018. _____	229
Tabla 5. 12. Comparación de la carga a diferentes niveles de flecha entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 93), ASTM1018. _____	229
Tabla 5. 13. Valores de los parámetros para las modificaciones de la combinación 123. _	232
Tabla 5. 14. Comparación de la capacidad de disipación de energía entre los valores experimentales y los numéricos, obtenidos con la combinación C 123 con una reducción al 55% de la resistencia residual, Placa 1. _____	238

Tabla 5. 15. Comparación de la carga entre los valores experimentales y los numéricos, obtenidos con la combinación C 123 con una reducción al 55% de la resistencia residual, Placa 1. _____	238
Tabla 5. 16. Comparación de la capacidad de disipación de energía entre los valores experimentales y los numéricos, obtenidos con la combinación C 123 con una reducción al 55% de la resistencia residual, Placa 2. _____	246
Tabla 5. 17. Comparación de la carga entre los valores experimentales y los numéricos, obtenidos con la combinación C 123 con una reducción al 55% de la resistencia residual, Placa 2. _____	246

ANEJO B. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL COMPORTAMIENTO DEL HRFA

Tabla B. 1. Valores de energía y carga obtenidos con las 16 pruebas realizadas, EN14651. _____	278
Tabla B. 2. Valores de energía y carga obtenidos con las 16 pruebas realizadas, ASTM1018. _____	287
Tabla B. 3. Valores de Energía y Carga obtenidos con las 16 pruebas realizadas, ASTM1550. _____	300
Tabla B. 4. Valores de Energía y Carga obtenidos con las 16 pruebas realizadas, Placa 1. _____	313

ANEJO C. PROFUNDIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS PRINCIPALES

Tabla C. 1. Valores de energía y carga para las combinaciones de $f_s E_s$, elemento EN14651. _____	330
Tabla C. 2. Valores de energía y carga para las combinaciones de $f_s E_s$, elemento ASTM1018. _____	333
Tabla C. 3. Valores de energía y carga para las combinaciones de $f_s E_s$, elemento Placa 1. _____	336
Tabla C. 4. Valores de energía y carga para las combinaciones de $f_s E_s$, elemento Placa 2. _____	340
Tabla C. 5. Valores de energía y carga para las combinaciones de $f_1 f_2$, elemento EN14651. _____	346
Tabla C. 6. Valores de energía y carga para las combinaciones de $f_1 f_2$, elemento ASTM1018. _____	349
Tabla C. 7. Valores de energía y carga para las combinaciones de $f_1 f_2$, elemento Placa 1. _____	352
Tabla C. 8. Valores de energía y carga para las combinaciones de $f_1 f_2$, elemento Placa 2. _____	356
Tabla C. 9. Valores de energía y carga para las combinaciones de f_{cb} , elemento EN14651. _____	360
Tabla C. 10. Valores de energía y carga para las combinaciones de f_{cb} , elemento ASTM1018. _____	363
Tabla C. 11. Valores de energía y carga para las combinaciones de f_{cb} , elemento Placa 1. _____	366
Tabla C. 12. Valores de energía y carga para las combinaciones de f_{cb} , elemento Placa 2. _____	370

ANEJO D. RANKING DE COMBINACIONES, ESTUDIO EN CONJUNTO, VALORES DE MEDIA CORREGIDA Dc

Tabla D. 1.	Obtención de las mejores combinaciones numéricas, EN14651.	377
Tabla D. 2.	Obtención de las mejores combinaciones numéricas, ASTM1018.	382
Tabla D. 3.	Obtención de las mejores combinaciones numéricas, Placa 1.	387
Tabla D. 4.	Obtención de las mejores combinaciones numéricas, Placa 2.	392
Tabla D. 5.	Ranking de las combinaciones numéricas, resultante del estudio en conjunto.	397
Tabla D. 6.	Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para los cuatro elementos.	401
Tabla D. 7.	Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para las probetas prismáticas EN14651 y ASTM1018.	405
Tabla D. 8.	Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para las Placas 1 y 2.	409
Tabla D. 9.	Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para la ASTM1018 y Placa 1.	413
Tabla D. 10.	Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para la ASTM1018 y Placa 2.	417
Tabla D. 11.	Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para la EN14651 y Placa 1.	421
Tabla D. 12.	Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para la EN14651 y Placa 2.	425
Tabla D. 13.	Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para la EN14651 y las Placas 1 y 2.	429
Tabla D. 14.	Valores de Dc experimentales para los hormigones HI, HA y HB, EN14651.	433
Tabla D. 15.	Valores de Dc experimentales para los hormigones HI, HA y HB, ASTM1018.	434
Tabla D.16.	Valores de Dc experimentales para los hormigones HA y HB, Placa 1.	435
Tabla D.17.	Valores de Dc experimentales para los hormigones HA y HB, captador 2, Placa 2.	435
Tabla D.18.	Valores de Dc experimentales de las combinaciones C96 y C123 (con reducción de la resistencia residual en un 55%) para los hormigones HI, HA y HB, Placa 1.	436
Tabla D.19.	Valores de Dc experimentales de las combinaciones C96 y C123 (con reducción de la resistencia residual en un 55%) para los hormigones HI, HA y HB, Placa 2.	437

NOTACIÓN

Mayúsculas Romanas

A_c	Área de la sección transversal de una probeta de HRFA.
A_{cr}	Área del hormigón fisurado.
A_{ct}	Área aferente de hormigón, sobre la cual la fibra es representada como un refuerzo discreto.
A_{ExoT}	Energía experimental del tramo.
A_f	Área aferente.
A_f	Área de sección transversal de la fibra.
A_{NumT}	Energía numérica del tramo.
\bar{A}_s	Área de acero equivalente.
A_{sec}	Área de la sección transversal.
CMOD	Abertura de fisura.
Dc	Media corregida.
D_{BZ}^f	Capacidad de absorción de energía.
D1	Media de la diferencia de energía numérica y experimental de los niveles de flecha a los que llega la curva.
D2	Media de la diferencia de energía numérica y experimental de todos los niveles de flecha.
$Dif_{Num-Exp}$	Diferencia de energía entre la curva numérica y la media experimental.
E	Módulo de elasticidad del HRFA.
E_b	Módulo de elasticidad del hormigón, según Huang, 1995.
E_c	Módulo de elasticidad del hormigón.
E_{cf}	Parámetro de rigidez equivalente del HRFA fisurado.
E_f	Módulo de elasticidad de la fibra.
E_{HRF}	Módulo de elasticidad del hormigón reforzado con fibras.
$Equ\beta_{BZ}$	Resistencia residual equivalente.
E_s	Módulo de elasticidad de la fibra metálica.
Est	Módulo tangente para el armado equivalente.
F_c	Tensión sobre la zona de compresión.
F_{ct}	Tensión sobre la zona de tracción no fisurada.
F_{eq}	Carga media soportada en el ensayo de flexo-tracción tras fisuración
F_{fc}	Tensión sobre la zona de tracción fisurada.
F_j	Valor de carga correspondiente a aberturas de fisura (CMOD) 1, 2, 3 y 4 definidos por la norma EN14651.
F_u	Carga a la primera fisura.
G_f	Energía de fractura.
I_1	Primera constante. Tensión de tracción.
I_1'	Primer constante de deformación en tensión.

J_2	Segunda constante. Derivada de la tensión de tracción.
J_2'	Segunda constante de deformación en tensión.
K_I y K_{II}	Factores de eficiencia.
L	Distancia entre los apoyos.
L_b	Ancho de fisura que cose la fibra.
L_{cb}	Ancho de la zona de fisuración.
L_{cs}	Longitud crítica
L_{eq}	Longitud equivalente del elemento.
L_{fd}	Longitud de adherencia.
M_{ELS}	Momento flector para el estado límite de servicio.
M_{ELU}	Momento flector para el estado límite último.
$N1$	Número de tramos hasta donde llega la curva carga-flecha numérica.
$N2$	Número de tramos considerados de la curva carga-flecha.
P	Fuerza de arrancamiento, según Cunha, 2009.
P	Factor de forma de la curva de ablandamiento.
P_{eq}	Carga equivalente.
$P_{N,\Theta}$	Carga total de arrancamiento para n fibras a un ángulo de inclinación Θ .
SR_i	Suma de la posiciones dentro del ranking para cada combinación numérica.
SR	Media de todos los SR_i .
V_f	Volumen de fibras.
W	Coefficiente de concordancia Kendall.
Z_F	Fuerza equivalente del hormigón.
Z_S	fuerza equivalente del acero.

Minúsculas Romanas

b	Ancho de la probeta.
d_f	Diámetro de la fibra.
d_{max}	Diámetro máximo de árido.
f_c	Resistencia última a compresión uni-axial del hormigón.
f_{cb}	Resistencia a compresión bi-axial del hormigón.
f_{ct}	Resistencia a tracción del hormigón.
$f_{ct,ax}$	Resistencia a tracción axial.
f_{ctd}^f	Valor de diseño de la resistencia a tracción del hormigón reforzado con fibras, según DBV-Merkblatt, 1992.
$f_{ct,d}$	Valor de diseño de la resistencia a tracción del hormigón reforzado con fibras, según EHE, 2008.
$f_{ct,eq,bil}$	Resistencia equivalente post-fisuración del HRFA en una relación de ablandamiento bi-lineal.
$f_{ct,l}$	Resistencia a flexo-tracción, a primera fisura.
f_{ctm}	Resistencia a tracción promedio de la matriz.
$f_{ctm,eq,bil}$	Tracción equivalente.
$f_{ctm,fl}$	Resistencia a flexo tracción del hormigón reforzado con fibras.
f_{ctRd}	Resistencia residual a tracción de cálculo.

f_{150}^D	Resistencia residual a flexo-tracción del hormigón para nivel de flecha de 2mm.
f_{600}^D	Resistencia residual a flexo-tracción del hormigón para nivel de flecha de 0,5mm.
$f_{eq,ctd,l/l}$	Valores característicos de la resistencia a tracción equivalente.
f_{fccd}	Valor de diseño de la resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibras, según DBV-Merkblatt, 1992.
$f_{fctd,eq}$	Tensión de post – fisuración.
f_{Ft}	Resistencia a tracción uni-axial del hormigón reforzado con fibras de acero.
f_{Fts}	Resistencia residual a tracción de servicio del hormigón reforzado con fibras de acero.
f_{Ftu}	Resistencia residual a tracción última del hormigón reforzado con fibras de acero.
f_p	Resistencia a flexo-tracción, a primera fisura.
f_{ps}^0	Factor que define la cantidad de fibras.
f_r	Resistencia residual a flexo-tracción del hormigón con fibras de acero.
$f_{R,1}$	Resistencia residual a flexo-tracción del hormigón con fibras de acero para una abertura de fisura de 0,5mm.
$f_{R,2}$	Resistencia residual a flexo-tracción del hormigón con fibras de acero para una abertura de fisura de 1,5mm.
$f_{R,3}$	Resistencia residual a flexo-tracción del hormigón con fibras de acero para una abertura de fisura de 2,5mm.
$f_{R,4}$	Resistencia residual a flexo-tracción del hormigón con fibras de acero para una abertura de fisura de 3,5mm.
f_r'	Resistencia residual modificada.
f_t	Resistencia a tracción uni-axial del hormigón.
f_y	Resistencia a la fluencia de la fibra.
f_1	Resistencia del hormigón a compresión bi-axial superpuesta en estado de tensión hidrostático.
f_2	Resistencia del hormigón a compresión uni-axial superpuesta en estado de tensión hidrostático.
h	Altura de la probeta.
h_{sp}	Distancia entre el borde superior de la entalla y la parte superior de la probeta.
k	Número de elementos estudiados para el cálculo del coeficiente de Kendall.
k	Tipo de fibras, según Huang, 1995.
k_h	Factor de tamaño.
$\frac{l}{d}$	Esbeltez de la fibra.
l_b	Longitud de adherencia.
l_f	Longitud de la fibra.
l_p	Zona en tracción fisurada.
n	Número de combinaciones numéricas.
nf	Número de fibras del sistema de arrancamiento en la sección transversal considerada.
s	Zona de discontinuidad, según Strack, 2008.

s	Deslizamiento de la fibra.
t	Zona en tracción no fisurada.
ν	Coefficiente de Poisson.
ν_c	Índice de Poisson del hormigón.
ν_s	Índice de Poisson del armado equivalente.
w	Abertura de fisura.
w_{COD}	Abertura de fisura.
w_c	Ancho de fisura característico.
$w_{c,50}$	Ancho característico de la fisura correspondiente a una reducción de la capacidad de soportar tensión a un 50%.
w_{min}	Abertura de fisura mínima.
w_u	Abertura de fisura última.
w_0	Ancho de fisura crítico.
w_1	Abertura de fisura inicial.
w^*	Ancho de fisura donde la pre-tensión es eliminada
x	Zona de compresión.

Minúsculas Griegas

σ	Tensión.
σ_{BZ}	Resistencia a tracción.
σ_c	Resistencia a tracción de la matriz de hormigón.
σ_{ct}	Tensión de tracción uni-axial del hormigón.
$\sigma_{ct,eq,150}$	Resistencia a tracción equivalente para una deformación de 2mm.
σ_f	Resistencia residual.
σ_f	Tensión entre las fibras y el hormigón.
σ_{fc}	Tensión total del HRFA.
σ_{fct}	Resistencia a tracción llevada a través de la fisura.
σ_f^i	Tensión de las fibras que cosen la fisura.
σ_{Ft1}	Tensión máxima en un rango comprendida entre 0 y 0,6mm de abertura de fisura.
σ_{Ft2}	Tensión máxima en un rango comprendida entre 0,6 y 3,0mm de abertura de fisura.
σ_h	Estado de tensión en un ambiente hidrostático.
σ_o	Tensión inicial de plasticidad del hormigón.
σ_{ps}	Resistencia de pre-esfuerzo de la fibra.
σ_m	Tensión resultante de la matriz.
σ_{min}	Resistencia a tracción correspondiente a una abertura de fisura mínima.
σ_{SFRC}	Resistencia a tracción del hormigón reforzado con fibras.
σ_{SF}	Resistencia a tracción de las fibras de acero.
σ_t	Resistencia máxima a tracción antes de la fisuración.
σ_{tu}	Resistencia máxima post-fisuración.
σ_{xp}	Tensión principal en el eje X.
σ_{yp}	Tensión principal en el eje Y.
σ_{zp}	Tensión principal en el eje Z.

ρ_f	Relación del área de las fibras metálicas.
$\bar{\rho}_s$	Armadura equivalente.
ρ_s'	Valor modificado del armado equivalente.
δ	Desplazamiento relativo.
δ	Flecha de la viga.
δ_{cg}	Desplazamiento de la abertura de fisura adicional.
δ_{el}	Desplazamiento elástica.
δ_{pl}	Desplazamiento plástica.
δ^*	Ancho de fisura cuando el arrancamiento es total.
β	Parámetros del material.
β_c	Tensión de cizallamiento de fisuras cerradas.
β_f	Valores ajustados de β .
β_t	Tensión de cizallamiento de fisuras abiertas.
$\bar{\beta}_{BZ}$	Resistencia a tracción del hormigón incrementado en un 15%.
β_{BZ}	Resistencia a tracción del hormigón.
$\bar{\beta}_s$	Límite elástico equivalente de la fibra metálica en tracción.
β_{WN}	Resistencia característica del hormigón a compresión.
$\beta_{z,f}$	Resistencia residual del HRFA.
φ	Rotación.
φ_{pl}	Rotación plástica.
Θ	Capacidad de rotación de la rótula plástica.
Θ_{pl}	Capacidad de rotación plástica.
Θ_{el}	Capacidad de rotación elástica.
ϵ	Deformación unitaria.
ϵ_c	Deformación del hormigón.
$\epsilon_{c,cara}$	Deformación en la cara de compresión.
ϵ_{ct}	Deformación lineal elástica del hormigón en tracción.
ϵ_{cmax}	Deformación máxima en la cara de compresión.
$\epsilon_{c,\phi}$	Deformación promedio en la zona a compresión.
$\epsilon_{el,\phi}$	Deformación elástica del hormigón sin daños.
ϵ_{fcc}	Deformación lineal elástica del hormigón en compresión.
ϵ_{fct}	Deformación lineal elástica del hormigón en tracción.
ϵ_{p1}	Deformación plástica equivalente
ϵ_R	Deformación a primera fisura para el hormigón.
$\epsilon_{t,cara}$	Deformación en la cara de tracción.
$\epsilon_{t,\phi}$	Deformación promedio para la zona en tracción.
ϵ_{uf}	Deformación última del HRFA.
ϵ_{up}	Deformación en la cara superior de la probeta prismática.
ϵ'_R	Deformación del hormigón a primera fisura.
$\epsilon_{w,\phi}$	Deformación del hormigón fisurado.
ϵ_{w0}	Deformación unitaria.
ϵ^*_{el}	Deformación lineal elástica del hormigón reforzado con fibras.
ϵ_1	Deformación correspondiente a la resistencia a tracción a primera fisura.
ϵ_2	Deformación correspondiente a la resistencia a tracción post-fisuración.
ϵ_3	Deformación última.

η_{θ}	Orientación de las fibras.
η_1	Longitud eficiente de las fibras.
τ	Resistencia a la fricción.
τ_0	Resistencia a la fricción inicial.
α	Parámetros del material.
α'	Factor de orientación.
α_c^f	Coeficiente que considera el comportamiento de la resistencia a largo plazo.
α_c	Deformación cuando la resistencia a compresión máxima es alcanzada.
$\alpha_{c/3}$	Deformación correspondiente a un tercio de la resistencia máxima a compresión.
α_f	Valores ajustados de α .
α_{sys}	Coeficiente que considera la desviación geométrica entre el espécimen de prueba y el tamaño real del elemento.
α_u	Deformación del material cuando está completamente relajado.
Υ_{ct}^f	Factor de seguridad.