



**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](mailto:andresma23@hotmail.com)  
Teléfono: +34 667 88 54 55  
Valencia (España), 2011

# CONTENIDO

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

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

## CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

<b>2.1. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO (HRFA).</b>	<b>17</b>
2.1.1. COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN.	19
2.1.2. COMPORTAMIENTO A TRACCIÓN.	22
2.1.3. COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN.	25
<b>2.2. MODELOS DE COMPORTAMIENTO PARA EL HRFA.</b>	<b>27</b>
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
<b>2.3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE ELEMENTOS DE HRFA.</b>	<b>41</b>
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
<b>2.4. RESUMEN CRÍTICO Y CUESTIONES SIN RESOLVER.</b>	<b>64</b>

### **CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL**

<b>3.1. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.</b>	<b>71</b>
<b>3.2. VARIABLES DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.</b>	<b>73</b>
<b>3.3. PLANIFICACIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.</b>	<b>73</b>
<b>3.4. METODOLOGIA DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.</b>	<b>75</b>
<b>3.5. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS.</b>	<b>80</b>
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**

<b>4.1. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO NUMÉRICO.</b>	<b>129</b>
<b>4.2. PLANIFICACIÓN DEL ESTUDIO NUMÉRICO.</b>	<b>130</b>
<b>4.3. MODELO PROPUESTO.</b>	<b>132</b>
<b>4.4. VARIABLES Y PARÁMETROS DEL ESTUDIO NUMÉRICO.</b>	<b>137</b>
4.4.1. PARAMETROS QUE SE MANTIENEN FIJOS EN EL ESTUDIO.	137
4.4.2. PARÁMETROS VARIABLES DEL ESTUDIO.	139
<b>4.5. METODOLOGIA DEL ESTUDIO NUMÉRICO.</b>	<b>140</b>
<b>4.6. ESTUDIOS PRELIMINARES.</b>	<b>140</b>
<b>4.7. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL COMPORTAMIENTO DEL HRFA.</b>	<b>150</b>
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
<b>4.8. PROFUNDIZACIÓN Y ANÁLISIS DEL EFECTO DE LOS PARÁMETROS PRINCIPALES. _____</b>	<b>164</b>
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**

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

## **CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

<b>6.1. CONCLUSIONES. _____</b>	<b>255</b>
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
<b>6.2. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN. _____</b>	<b>258</b>

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

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

<b>Figura 2. 29.</b> Elemento COMBIN39.	54
<b>Figura 2. 30.</b> Detalle del modelo de elementos finitos (MEF).	55
<b>Figura 2. 31.</b> Principio de transferencia de carga discreta entre superficies de fractura y las fibras metálicas (Strack, 2008).	57
<b>Figura 2. 32.</b> Modelo de la rótula plástica (Strack, 2008).	58
<b>Figura 2. 33.</b> Aproximación de sección plana: explicación del modelo kinemático (Tomado de Dozio, 2008).	60
<b>Figura 2. 34.</b> Curva de Compresión Parabólica (Tomada de Dozio, 2008).	61
<b>Figura 2. 35.</b> 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
<b>Figura 2. 36.</b> 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
<b>Figura 2. 37.</b> Tercera ley constitutiva de tracción: modelo bi-lineal (bh/bs). (Tomado de Dozio, 2008).	63
<b>Figura 2. 38.</b> Diagrama tensión-deformación basado en la relación experimental fuerza de arrancamiento-deslizamiento.	63

### CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

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

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

#### **CAPÍTULO 4. ESTUDIO NUMÉRICO**

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

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

<b>Figura 4. 27.</b> 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
<b>Figura 4. 28.</b> Combinaciones de $f_s$ _Es más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, Placa 2.	170
<b>Figura 4. 29.</b> Combinaciones de $f_s$ _Es con forma similar pero nivel de carga mayor al experimental del hormigón HI, Placa 2.	171
<b>Figura 4. 30.</b> 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
<b>Figura 4. 31.</b> 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
<b>Figura 4. 32.</b> 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
<b>Figura 4. 33.</b> 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
<b>Figura 4. 34.</b> Combinaciones de $f_1$ _f2 más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, EN14651.	176
<b>Figura 4. 35.</b> 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
<b>Figura 4. 36.</b> 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
<b>Figura 4. 37.</b> Combinaciones de $f_1$ _f2 más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, Placa 1.	178
<b>Figura 4. 38.</b> 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
<b>Figura 4. 39.</b> Combinaciones de $f_1$ _f2 más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, Placa 2.	179
<b>Figura 4. 40.</b> 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
<b>Figura 4. 41.</b> Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 23 variaciones de $f_{cb}$ y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, EN14651.	182
<b>Figura 4. 42.</b> Combinaciones de $f_{cb}$ más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, EN14651.	183
<b>Figura 4. 43.</b> Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 23 variaciones de $f_{cb}$ y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, ASTM1018.	183
<b>Figura 4. 44.</b> Combinaciones de $f_{cb}$ más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, ASTM1018.	184
<b>Figura 4. 45.</b> 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

<b>Figura 4. 46.</b> Combinaciones de fcb más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, Placa 1.	185
<b>Figura 4. 47.</b> Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 23 variaciones de fcb y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, Placa 2.	185
<b>Figura 4. 48.</b> Cálculo de la diferencia de área bajo la curva (energía) entre la curva numérica y la media experimental para el tramo BC.	191
<b>Figura 4. 49.</b> 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
<b>Figura 4. 50.</b> 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
<b>Figura 4. 51.</b> 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
<b>Figura 4. 52.</b> 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
<b>Figura 4. 53.</b> 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
<b>Figura 4. 54.</b> 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
<b>Figura 4. 55.</b> 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
<b>Figura 4. 56.</b> 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
<b>Figura 4. 57.</b> 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
<b>Figura 4. 58.</b> 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
<b>Figura 4. 59.</b> 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

<b>Figura 5. 1.</b> Relación de las combinaciones numéricas elegidas y los hormigones HI, HA y HB.	211
<b>Figura 5. 2.</b> 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

<b>Figura 5. 3.</b>	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
<b>Figura 5. 4.</b>	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
<b>Figura 5. 5.</b>	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
<b>Figura 5. 6.</b>	a) Fisuración de la probeta, y mapa de fisuración numérico b) combinación 107, y c) combinación 97, EN14651 HA. _____	220
<b>Figura 5. 7.</b>	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
<b>Figura 5. 8.</b>	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
<b>Figura 5. 9.</b>	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
<b>Figura 5. 10.</b>	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
<b>Figura 5. 11.</b>	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
<b>Figura 5. 12.</b>	a) Fisuración de la probeta, y mapa de fisuración numérico b) combinación 43, y c) combinación 93, ASTM1018 HB. _____	230
<b>Figura 5. 13.</b>	Diagrama de flecha y diagrama de posición inicial y final de la combinación a) 43 y b) 93, ASTM1018 HB. _____	231
<b>Figura 5. 14.</b>	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
<b>Figura 5. 15.</b>	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
<b>Figura 5. 16.</b>	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
<b>Figura 5. 17.</b>	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
<b>Figura 5. 18.</b>	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

<b>Figura 5. 19.</b> 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
<b>Figura 5. 20.</b> 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
<b>Figura 5. 21.</b> 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
<b>Figura 5. 22.</b> 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
<b>Figura 5. 23.</b> 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
<b>Figura 5. 24.</b> 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
<b>Figura 5. 25.</b> 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
<b>Figura 5. 26.</b> 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**

<b>Figura A. 1.</b> Curvas carga-flecha de las probetas de los hormigones: a) HI, b) HA y c) HB, EN14651. _____	268
<b>Figura A. 2.</b> Curvas carga-flecha de las probetas de los hormigones: a) HI, b) HA y c) HB, ASTM1018. _____	269
<b>Figura A. 3.</b> Curvas carga-flecha de las probetas de los hormigones: a) HI, b) HA y c) HB, ASTM1550. _____	270
<b>Figura A. 4.</b> Curvas carga-flecha de las probetas de los hormigones: a) HI, b) HA y c) HB, Placa 1. _____	271
<b>Figura A. 5.</b> 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**

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

<b>Figura B. 3.</b>	Valores de energía a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro f2, EN14651. _____	280
<b>Figura B. 4.</b>	Valores de energía a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro fcb, EN14651. _____	281
<b>Figura B. 5.</b>	Valores de energía a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro fs, EN14651. _____	282
<b>Figura B. 6.</b>	Valores de energía a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro Bt, EN14651. _____	282
<b>Figura B. 7.</b>	Valores de carga a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro Es, EN14651. _____	283
<b>Figura B. 8.</b>	Valores de carga a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro f1, EN14651. _____	284
<b>Figura B. 9.</b>	Valores de carga a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro f2, EN14651. _____	284
<b>Figura B. 10.</b>	Valores de carga a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro fcb, EN14651. _____	285
<b>Figura B. 11.</b>	Valores de carga a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro fs, EN14651. _____	286
<b>Figura B. 12.</b>	Valores de carga a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro Bt, EN14651. _____	286
<b>Figura B. 13.</b>	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
<b>Figura B. 14.</b>	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
<b>Figura B. 15.</b>	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
<b>Figura B. 16.</b>	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
<b>Figura B. 17.</b>	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
<b>Figura B. 18.</b>	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
<b>Figura B. 19.</b>	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
<b>Figura B. 20.</b>	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
<b>Figura B. 21.</b>	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
<b>Figura B. 22.</b>	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
<b>Figura B. 23.</b>	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
<b>Figura B. 24.</b>	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
<b>Figura B. 25.</b>	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
<b>Figura B. 26.</b>	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
<b>Figura B. 27.</b>	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
<b>Figura B. 28.</b>	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

<b>Figura B. 29.</b> 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
<b>Figura B. 30.</b> 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
<b>Figura B. 31.</b> 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
<b>Figura B. 32.</b> 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
<b>Figura B. 33.</b> 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
<b>Figura B. 34.</b> 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
<b>Figura B. 35.</b> 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
<b>Figura B. 36.</b> 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
<b>Figura B. 37.</b> 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
<b>Figura B. 38.</b> 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
<b>Figura B. 39.</b> 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
<b>Figura B. 40.</b> 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
<b>Figura B. 41.</b> 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
<b>Figura B. 42.</b> 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
<b>Figura B. 43.</b> 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
<b>Figura B. 44.</b> 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
<b>Figura B. 45.</b> 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
<b>Figura B. 46.</b> 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
<b>Figura B. 47.</b> 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
<b>Figura B. 48.</b> 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

<b>Figura C. 1.</b> 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
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

<b>Figura C. 2.</b>	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 $f_3E_s$ , elemento EN14651, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	332
<b>Figura C. 3.</b>	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 $f_3E_s$ , elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	334
<b>Figura C. 4.</b>	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 $f_3E_s$ , elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	335
<b>Figura C. 5.</b>	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 $f_3E_s$ , elemento Placa 1, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	338
<b>Figura C. 6.</b>	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 $f_3E_s$ , elemento Placa 1, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	339
<b>Figura C. 7.</b>	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 $f_3E_s$ , elemento Placa 2, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	342
<b>Figura C. 8.</b>	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 $f_3E_s$ , elemento Placa 2, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI. _____	343
<b>Figura C. 9.</b>	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
<b>Figura C. 10.</b>	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
<b>Figura C. 11.</b>	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
<b>Figura C. 12.</b>	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
<b>Figura C. 13.</b>	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
<b>Figura C. 14.</b>	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

<b>Figura C. 15.</b> 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
<b>Figura C. 16.</b> 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
<b>Figura C. 17.</b> 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
<b>Figura C. 18.</b> 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
<b>Figura C. 19.</b> 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
<b>Figura C. 20.</b> 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
<b>Figura C. 21.</b> 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
<b>Figura C. 22.</b> 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
<b>Figura C. 23.</b> 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
<b>Figura C. 24.</b> 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

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

## CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

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

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

## **CAPÍTULO 4. ESTUDIO NUMÉRICO**

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

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

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

## CAPÍTULO 5. EXTRAPOLACIÓN A OTRAS CALIDADES DE HORMIGÓN

<b>Tabla 5. 1.</b> 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
<b>Tabla 5. 2.</b> 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
<b>Tabla 5. 3.</b> Comparación de la capacidad de disipación de energía entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 107), EN14651. _____	218
<b>Tabla 5. 4.</b> Comparación de la capacidad de disipación de energía entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 97), EN14651. _____	218
<b>Tabla 5. 5.</b> Comparación de la carga a diferentes niveles de flecha entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 107), EN14651. _____	219
<b>Tabla 5. 6.</b> Comparación de la carga a diferentes niveles de flecha entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 97), EN14651. _____	219
<b>Tabla 5. 7.</b> 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
<b>Tabla 5. 8.</b> 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
<b>Tabla 5. 9.</b> Comparación de la capacidad de disipación de energía entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 43), ASTM1018. _____	228
<b>Tabla 5. 10.</b> Comparación de la capacidad de disipación de energía entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 93), ASTM1018. _____	228
<b>Tabla 5. 11.</b> Comparación de la carga a diferentes niveles de flecha entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 43), ASTM1018. _____	229
<b>Tabla 5. 12.</b> Comparación de la carga a diferentes niveles de flecha entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 93), ASTM1018. _____	229
<b>Tabla 5. 13.</b> Valores de los parámetros para las modificaciones de la combinación 123. _	232
<b>Tabla 5. 14.</b> 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

<b>Tabla 5. 15.</b> 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
<b>Tabla 5. 16.</b> 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
<b>Tabla 5. 17.</b> 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**

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

## **ANEJO C. PROFUNDIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS PRINCIPALES**

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

<b>Tabla D. 1.</b>	Obtención de las mejores combinaciones numéricas, EN14651.	377
<b>Tabla D. 2.</b>	Obtención de las mejores combinaciones numéricas, ASTM1018.	382
<b>Tabla D. 3.</b>	Obtención de las mejores combinaciones numéricas, Placa 1.	387
<b>Tabla D. 4.</b>	Obtención de las mejores combinaciones numéricas, Placa 2.	392
<b>Tabla D. 5.</b>	Ranking de las combinaciones numéricas, resultante del estudio en conjunto.	397
<b>Tabla D. 6.</b>	Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para los cuatro elementos.	401
<b>Tabla D. 7.</b>	Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para las probetas prismáticas EN14651 y ASTM1018.	405
<b>Tabla D. 8.</b>	Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para las Placas 1 y 2.	409
<b>Tabla D. 9.</b>	Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para la ASTM1018 y Placa 1.	413
<b>Tabla D. 10.</b>	Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para la ASTM1018 y Placa 2.	417
<b>Tabla D. 11.</b>	Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para la EN14651 y Placa 1.	421
<b>Tabla D. 12.</b>	Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para la EN14651 y Placa 2.	425
<b>Tabla D. 13.</b>	Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para la EN14651 y las Placas 1 y 2.	429
<b>Tabla D. 14.</b>	Valores de Dc experimentales para los hormigones HI, HA y HB, EN14651.	433
<b>Tabla D. 15.</b>	Valores de Dc experimentales para los hormigones HI, HA y HB, ASTM1018.	434
<b>Tabla D.16.</b>	Valores de Dc experimentales para los hormigones HA y HB, Placa 1.	435
<b>Tabla D.17.</b>	Valores de Dc experimentales para los hormigones HA y HB, captador 2, Placa 2.	435
<b>Tabla D.18.</b>	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
<b>Tabla D.19.</b>	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 $\Theta$ .
$SR_i$	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.
$f_{eq,ctd,l/ll}$	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.
$\nu$	Coefficiente de Poisson.
$\nu_c$	Índice de Poisson del hormigón.
$\nu_s$	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

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

$\rho_f$	Relación del área de las fibras metálicas.
$\bar{\rho}_s$	Armadura equivalente.
$\rho_s'$	Valor modificado del armado equivalente.
$\delta$	Desplazamiento relativo.
$\delta$	Flecha de la viga.
$\delta_{cg}$	Desplazamiento de la abertura de fisura adicional.
$\delta_{el}$	Desplazamiento elástica.
$\delta_{pl}$	Desplazamiento plástica.
$\delta^*$	Ancho de fisura cuando el arrancamiento es total.
$\beta$	Parámetros del material.
$\beta_c$	Tensión de cizallamiento de fisuras cerradas.
$\beta_f$	Valores ajustados de $\beta$ .
$\beta_t$	Tensión de cizallamiento de fisuras abiertas.
$\bar{\beta}_{BZ}$	Resistencia a tracción del hormigón incrementado en un 15%.
$\beta_{BZ}$	Resistencia a tracción del hormigón.
$\bar{\beta}_s$	Límite elástico equivalente de la fibra metálica en tracción.
$\beta_{WN}$	Resistencia característica del hormigón a compresión.
$\beta_{z,f}$	Resistencia residual del HRFA.
$\varphi$	Rotación.
$\varphi_{pl}$	Rotación plástica.
$\Theta$	Capacidad de rotación de la rótula plástica.
$\Theta_{pl}$	Capacidad de rotación plástica.
$\Theta_{el}$	Capacidad de rotación elástica.
$\epsilon$	Deformación unitaria.
$\epsilon_c$	Deformación del hormigón.
$\epsilon_{c,cara}$	Deformación en la cara de compresión.
$\epsilon_{ct}$	Deformación lineal elástica del hormigón en tracción.
$\epsilon_{cmax}$	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.
$\epsilon_{fcc}$	Deformación lineal elástica del hormigón en compresión.
$\epsilon_{fct}$	Deformación lineal elástica del hormigón en tracción.
$\epsilon_{p1}$	Deformación plástica equivalente
$\epsilon_R$	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.
$\epsilon_{uf}$	Deformación última del HRFA.
$\epsilon_{up}$	Deformación en la cara superior de la probeta prismática.
$\epsilon'_R$	Deformación del hormigón a primera fisura.
$\epsilon_{w,\phi}$	Deformación del hormigón fisurado.
$\epsilon_{w0}$	Deformación unitaria.
$\epsilon^*_{el}$	Deformación lineal elástica del hormigón reforzado con fibras.
$\epsilon_1$	Deformación correspondiente a la resistencia a tracción a primera fisura.
$\epsilon_2$	Deformación correspondiente a la resistencia a tracción post-fisuración.
$\epsilon_3$	Deformación última.

$\eta_{\theta}$	Orientación de las fibras.
$\eta_1$	Longitud eficiente de las fibras.
$\tau$	Resistencia a la fricción.
$\tau_0$	Resistencia a la fricción inicial.
$\alpha$	Parámetros del material.
$\alpha'$	Factor de orientación.
$\alpha_c^f$	Coeficiente que considera el comportamiento de la resistencia a largo plazo.
$\alpha_c$	Deformación cuando la resistencia a compresión máxima es alcanzada.
$\alpha_{c/3}$	Deformación correspondiente a un tercio de la resistencia máxima a compresión.
$\alpha_f$	Valores ajustados de $\alpha$ .
$\alpha_{sys}$	Coeficiente que considera la desviación geométrica entre el espécimen de prueba y el tamaño real del elemento.
$\alpha_u$	Deformación del material cuando está completamente relajado.
$\gamma_{ct}^f$	Factor de seguridad.