



**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>

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

# 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.
$f_{eq,ctd,l/l}$	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.
$\nu$	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.
$\overline{\rho}_s$	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.
$\overline{\beta}_{BZ}$	Resistencia a tracción del hormigón incrementado en un 15%.
$\beta_{BZ}$	Resistencia a tracción del hormigón.
$\overline{\beta}_s$	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.
$\Upsilon_{ct}^f$	Factor de seguridad.

# **1**

## **INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**





## **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 1.

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1. INTRODUCCIÓN.

El hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA, en adelante), es un material compuesto con fibras metálicas embebidas en la matriz de hormigón, cuyas propiedades dependen de la geometría, la distribución y el volumen de las fibras, (ACHE, 2000). Este material ha permitido la construcción de estructuras laminares ligeras y resistentes, así como estructuras desafiantes gracias a sus principales características como la capacidad de absorción de tensiones de flexo-tracción y el aumento de la ductilidad (capacidad de disipación de energía).

El uso extendido del HRFA en elementos estructurales está encaminado a colaborar en aspectos como:

- El control de la fisuración,
- El comportamiento ante ciclos de carga y descarga,
- El impacto,
- La retracción,
- Las tracciones debidas a gradientes térmicos.

El HRFA se ha empleado en casos donde el armado del hormigón no es esencial para la seguridad y la integridad de la estructura, por ejemplo: las losas de pavimentos y las capas de rodadura o recubrimiento de superficies mediante hormigón proyectado; consiguiendo reducir su espesor y/o mejorar sus propiedades.

Gracias a sus propiedades mecánicas se ha tenido en cuenta en otras aplicaciones, tales como tableros de puentes, túneles, bunkers, vigas prefabricadas, uniones viga-columna y pantallas estructurales (Di prisco y Colombo, 2006; Barros y Figueiras, 2001).

Sin embargo, diseños vanguardistas han difundido el uso de láminas delgadas en la construcción, siendo la flexión y la fisuración los mayores problemas para tales estructuras. Con la introducción de fibras metálicas, tales láminas se comportan mejor estructuralmente. No obstante, hay pocos estudios sobre el análisis no lineal con elementos finitos de láminas de HRFA, (Zhu et al, 2002; Strack, 2008). Por ello, el

HRFA requiere un estudio más detallado y particular encaminado al desarrollo de modelos numéricos que representen y simulen su comportamiento.

Atendiendo las necesidades de comprender el comportamiento post-fisuración del HRFA, diversos grupos de investigación han desarrollado tanto pruebas mecánicas como leyes de comportamiento. Tal es el caso de RILEM (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures), ASTM (American Standard Testing Materials), ACI (American Concrete Institute), DBV-Merkblatt (Sociedad Alemana del Hormigón y Tecnología de la Construcción), CNR-DT (Sociedad Italiana del Hormigón) y EHE (Instrucción del Hormigón Estructural) con el anejo 14 para el caso de España.

En la teoría, un modelo de diseño ideal para HRFA debería describir perfectamente el comportamiento uni-axial del material, pero en la práctica este comportamiento no es uniforme. Algunas causas de este fenómeno se deben a que el comportamiento post-fisuración del HRFA varía como resultado de su heterogeneidad; es decir, la variación de la capacidad de absorción de energía depende de la resistencia de la matriz y la cantidad de fibras de la sección transversal, lo que se relaciona directamente con el volumen de fibras y su distribución.

Además, las pruebas de comportamiento mecánico del HRFA ensayado en el laboratorio difieren de las condiciones estructurales de la práctica, esto obedece al hecho que las pruebas de laboratorio se llevan a cabo de una forma simplificada. Por ejemplo, para el caso del ensayo según la norma EN 14651 (viga estáticamente determinada), el elemento es sometido a una carga puntual en un período de tiempo relativamente corto; mientras que, en la práctica estas condiciones difieren a las del laboratorio (Dupont y Vandewalle, 2003; Thomeé et al, 2006).

Otros autores también argumentan que aún cuando las condiciones estructurales son similares a las del laboratorio, la diferencia en los procesos de producción de ambos puede dejar grandes variaciones. El proceso de colocación del hormigón y vibrado influye en la cantidad y distribución de las fibras en una sección transversal. Así como también, la dirección de flujo del vertido del HRFA y la vibración influyen en la orientación de las fibras (Lok y Xiao, 1998; Kovács y Balázs, 2004; Dozio, 2008).

El método de elementos finitos y la ayuda de los ordenadores han permitido que se desarrollen procesos de cálculo que representen el comportamiento post-fisuración de elementos de HRFA. El análisis no-lineal de elementos de HRFA y el desarrollo de un modelo empleando un programa comercial son el propósito de la presente tesis doctoral.

En este trabajo se han desarrollado un *estudio experimental* y un *estudio numérico*. En el *estudio experimental* se contemplan tres tipos de hormigón (HI, HA, HB) con los que se fabrican diversos elementos de HRFA. En el *estudio numérico* se reproducen las condiciones de los ensayos experimentales.

El *estudio experimental* incluye analizar el comportamiento de varias piezas que bajo carga presentan diferentes estados tensionales. Las pruebas mecánicas realizadas corresponden a: EN 14651 (2005), ASTM C 1018 (1997)/ASTM C 1609 (2007), y ASTM C 1550 (2005). Además de las pruebas normalizadas se plantean y llevan a cabo dos pruebas no normalizadas, consistentes en dos placas delgadas una con carga puntual en el centro y otra con dos líneas de carga.

El *estudio numérico* se desarrolla empleando el programa comercial de elementos finitos ANSYS® V.11. El hormigón se modela utilizando un elemento finito específico para materiales frágiles y considerando el efecto de las fibras al modificar los parámetros definidos por defecto en el programa. Las fibras son consideradas como armado equivalente distribuido en el elemento finito.

El *estudio numérico* contempla tres etapas: la primera son los estudios preliminares, que consisten en un acercamiento al programa con el fin de familiarizarse con su interfase y comandos, establecer el volumen, mallado y condiciones de apoyo de los elementos, y efectuar simulaciones previas comparables con el comportamiento experimental de los elementos considerados; en la segunda etapa, se realiza un análisis de varianza para identificar los parámetros que intervienen en las propiedades aportadas por las fibras al hormigón y que por tanto deben ser ajustados; finalmente, en la tercera etapa se realiza una profundización y análisis de los parámetros principales, evaluándolos de forma aislada y conjunta. Las tres etapas tienen en cuenta las propiedades mecánicas del hormigón inicial (HI).

Los resultados numéricos se obtienen para cada combinación de parámetros principales en busca de la o las mejores combinaciones. Las respuestas numéricas son contrastadas una a una con las experimentales y se eligen las combinaciones más ajustadas. Posteriormente, se realiza una extrapolación empleando las combinaciones numéricas seleccionadas bajo las condiciones del hormigón inicial (HI), a otras calidades de hormigón (HA y HB); sus respuestas se comparan con las experimentales y de esta manera, se valida tanto el modelo propuesto como el proceso de ajuste de los parámetros principales.

Es así como, la presente tesis doctoral aporta un modelo sencillo que permite simular el comportamiento pre y post-fisuración del HRFA, y ofrecer una respuesta estructural adecuada para elementos fabricados con este material. Con este aporte, se pretende generar nuevas líneas de investigación que fomenten el estudio de la simulación del HRFA.

## **1.2. HIPÓTESIS.**

Si bien hay aportaciones que permiten analizar la respuesta estructural de elementos fabricados con Hormigón Reforzado con Fibras de Acero (HRFA en adelante) a partir de modelos numéricos, en la mayoría de los casos se parte ya sea de estudios complejos y con una exigencia experimental amplia, o con hipótesis difíciles de

contrastar. En este trabajo se plantea la hipótesis de que debe ser posible un planteamiento sencillo y práctico que permita obtener dicha respuesta en su etapa pre y post fisuración a partir de parámetros sencillos y claramente identificables experimentalmente con la utilización de un modelo numérico que pueda ser introducido en un programa comercial y accesible de forma rápida, sencilla y adaptable a cualquier tipo de diseño estructural.

### **1.3. OBJETIVOS.**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL.**

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo establecer un modelo numérico que permita reproducir el comportamiento del HRFA en la fase pre y post-fisuración por medio del programa de elementos finitos ANSYS® (2007).

Se pretende utilizar instrumentos disponibles en la biblioteca del programa de elementos finitos ANSYS, plantear un modelo de comportamiento para el hormigón de fibras que pueda quedar definido a partir de parámetros que se obtengan directamente de ensayos normalizados sencillos, especialmente la norma EN 14651, plantear un modelo numérico que pueda ser aplicable a cualquier estructura fabricada con hormigón de fibras y definir los parámetros necesarios para su puesta en marcha. La definición de los criterios para evaluar los parámetros del programa, detectando aquellos que realmente influyen en la respuesta, y la verificación de su adecuación a distintos tipos estructurales o características del material constituyen el objetivo final de este trabajo.

La intención de estudiar el comportamiento a tracción del HRFA es comprender el material en las primeras fases de fisuración, para ello se emplea un software comercial de elementos finitos (ANSYS®) en el que se manipulan parámetros para caracterizar al material como la resistencia última a tracción ( $f_t$ ), o las resistencias residuales a tracción ( $f_{tr}$ ) para diferentes niveles de abertura de fisura. De este modo, se desea considerar condiciones que aseguren el servicio, la resistencia y la durabilidad de las estructuras.

El principal objetivo del proyecto de investigación es identificar los valores de los parámetros propios del programa y del modelo numérico que permitan simular el HRFA empleando el programa comercial de elementos finitos ANSYS® para ser utilizados en el cálculo y diseño estructural. La simulación de estructuras de HRFA permitirá conocer estados tensionales, deformaciones y flechas de estructuras que son complejas de ensayar en el laboratorio.

### 1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Preparar un estado del arte relativo al comportamiento del HRFA y a su simulación numérica.
- Analizar los parámetros que definen el comportamiento del HRFA.
- Simular el comportamiento de elementos de HRFA con diferentes geometrías (probetas prismáticas, panel circular y placas cuadradas) empleando el programa comercial de elementos finitos ANSYS® V.11.
- Identificar los parámetros influyentes en el comportamiento del HRFA.
- Profundizar y analizar el efecto de los parámetros principales en la simulación del HRFA.
- Extrapolar los resultados obtenidos con el modelo propuesto a otras calidades de hormigón.

### 1.4. ALCANCE.

El estudio analiza el HRFA en su etapa pre y post-fisuración, ajustando los parámetros que permiten su simulación en el programa comercial de elementos finitos ANSYS® V.11.

### 1.5. METODOLOGIA.

La metodología empleada en el presente estudio consiste en dos grandes partes: la búsqueda bibliométrica y el desarrollo de un programa de investigación; ésta última incluye a su vez tres etapas: el estudio experimental, el estudio numérico, y la extrapolación de los resultados a otras calidades de hormigón.

- Búsqueda bibliométrica: Consiste en la búsqueda documental de artículos de revistas, libros, tesis doctorales, que consideran las siguientes palabras: hormigón reforzado con fibras de acero “steel fiber reinforced concrete”, comportamiento a tracción “tensile behavior”, comportamiento mecánico “mechanical behavior”, simulación del material “material modeling”, simulación empleando el método de los elementos finitos “finite element modeling”, simulación numérica “numerical modeling”, desempeño post-fisuración a flexo-tracción “flexural post-cracking performance”, desempeño estructural “structural performance”, conceptos de fisuración “crack concepts”.

- Desarrollo de un programa de investigación: Se lleva a cabo en tres etapas: el estudio experimental, estudio numérico, y extrapolación a otras calidades de hormigón. Con el objeto de conocer la realidad del comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) se plantea un **estudio experimental**, que consiste en la elaboración de varios elementos de HRFA, correspondientes a los planteados por las normativas EN14651, ASTM 1018, ASTM 1550; además de elementos no normalizados y placas cuadradas. Una vez identificadas las diferentes variables y los parámetros, se procede con la puesta en marcha del **estudio numérico**, que consiste en la simulación numérica de los elementos elaborados en el programa experimental y en el ajuste de los diferentes parámetros empleando el programa comercial de elementos finitos ANSYS® V.11. Con la última etapa, **extrapolación a otras calidades de hormigón**, se pretende evaluar el comportamiento numérico de los elementos considerados fabricados con otros hormigones.

## 1.6. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.

El presente estudio se divide en seis partes principales:

El **Capítulo 1** contiene la introducción, en la que se destacan las principales características del comportamiento a tracción del HRFA; además, se plantean el objetivo general, los objetivos específicos de la investigación, la hipótesis, el alcance y la metodología empleada.

El **Capítulo 2** presenta los principales aportes realizados por diferentes autores en el campo del HRFA. Inicia describiendo una breve historia del material, sus propiedades físicas y mecánicas, las tecnologías de fabricación y modelos teóricos. Posteriormente, continúa con los modelos de comportamiento propuestos por varios autores y finaliza tratando los diferentes autores que han realizados simulaciones numéricas del material en cuestión.

El **Capítulo 3** contiene el *estudio experimental*, donde se definen las calidades de hormigón a estudiar, y los elementos a considerar. Además, se presentan los resultados de las pruebas de control del HRFA en estado endurecido y las pruebas mecánicas llevadas a cabo en los elementos normalizados y no normalizados.

En el **Capítulo 4** se expone el *estudio numérico* que consiste en la simulación numérica del HRFA empleando un programa comercial de elementos finitos ANSYS® V.11. Para lo cual, se propone un modelo numérico sencillo basado en modelos existentes. En este capítulo se explica el modelo propuesto, sus principales características, y las variables y parámetros que intervienen. El estudio numérico comprende tres fases: los estudios preliminares, la determinación de los parámetros influyentes y, la profundización y análisis de los efectos de los parámetros principales. Como resultado, se seleccionan la o las combinaciones numéricas más ajustadas al



comportamiento experimental de los elementos considerados bajo las condiciones del hormigón inicial (HI).

En el **Capítulo 5** se procede a *extrapolar los resultados a otras calidades de hormigón*, es decir se utilizan las combinaciones numéricas seleccionadas en el capítulo 3 y se analiza su respuesta para los elementos estudiados bajo otras condiciones de hormigón (HA y HB). Finalmente, se sugiere un rango de valores de los principales parámetros de acuerdo con el tipo de elemento que se desea estudiar.

El **Capítulo 6** cierra el presente estudio con las conclusiones producto del análisis de los resultados. Además, se enuncian las futuras líneas de investigación.

A continuación se presenta un listado con las referencias bibliográficas consultadas.

Finalmente, se incluyen los anejos que contienen la información complementaria sobre ciertos aspectos de la tesis doctoral.



**2**

**ESTADO DEL ARTE**



## 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.	40
<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 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO (HRFA).

El HRFA se define como un material en el que se encuentran fibras de acero dispersas de forma aleatoria dentro de la matriz de hormigón, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas. El HRFA se fabrica con cemento hidráulico, árido grueso, fino, agua, aditivos y fibras de acero discontinuas (ACI 544.1R-96). Al adicionar las fibras de acero se mejoran ciertas propiedades (Thomé et al, 2006), entre ellas:

- Aumenta la ductilidad y bloquea el crecimiento de la fisuración. Debido a las fibras, el HRFA se convierte en un material dúctil ya que tiene la habilidad de soportar esfuerzos a tracción aún en la presencia de fisuración.
- Aumento en la resistencia ante el impacto y explosiones.

La investigación sobre refuerzo espaciado a corta distancia y fibras metálicas aleatorias se inició a finales de los años 50 y comienzos de los años 60. La Tabla 2. 1 presenta un breve resumen de sus inicios.

**Tabla 2. 1.** Inicios de la investigación del HRFA.

AUTORES	AVANCE
Romualdi, Baston y Mandel (1964)	Patente del Hormigón Reforzado con Fibras de Acero.
Monfore (1968)	ACI investiga refuerzo con fibras.
Shah y Rangan (1971)	Se aplican los principios de materiales compuestos para estudiar el HRF.
Shah y Rangan (1971)	Las fibras aumentan la tenacidad más que la resistencia a la primera fisura.

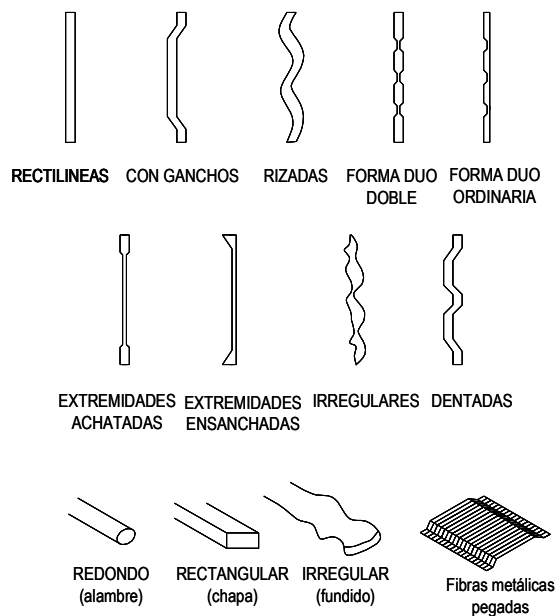
Las fibras de acero son pequeñas, con relación longitud/diámetro (esbeltez) desde 20 a 100, con varias secciones transversales y lo suficientemente pequeñas para quedar dispersas dentro de la matriz de hormigón. ASTM A 820 (1985) y la norma UNE 83500 (1989) proponen cuatro tipos de fibras de acuerdo al proceso usado en su fabricación.

- Trefilado en frío (Cold-draw wire).
- Corte de lámina (Cut sheet).
- Rascado en caliente (Melt-extracted).
- Otras fibras (Elaboradas por medio de otros procedimientos).

Mientras la Sociedad Japonesa de Ingeniería Civil (JSCE) las clasifica en tres tipos de acuerdo a su sección transversal (cuadrada, circular y creciente). Las normativas contemplan asimismo la posibilidad de que las fibras incluyan conformaciones (Figura 2. 1).



a)



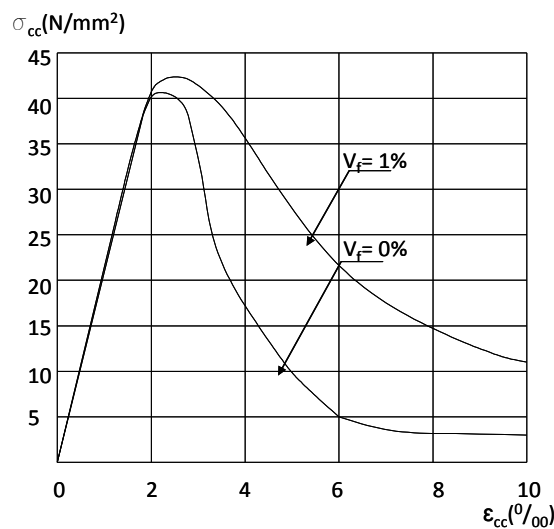
b)

**Figura 2. 1.** a) Superficie de fractura del HRFA, b) Ejemplo de fibras de diferentes formas.



### 2.1.1. COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN.

Las propiedades del hormigón a compresión se ven mejoradas por la presencia de fibras (Zhu et al, 2002). Las fibras de acero no pueden prevenir la propagación de micro fisuras (posiblemente existentes entre el mortero y los agregados). Cuando las micro fisuras llegan a ser macro fisuras, las fibras metálicas comienzan a colaborar evitando la propagación efectivamente. Así, las fibras metálicas mejoran significativamente el comportamiento a compresión del hormigón, retrasan el colapso y por lo tanto mejoran la ductilidad del hormigón (Zhu et al, 2002). La resistencia a compresión es más o menos igual a la de un hormigón tradicional/convencional, pero sí se destaca un aumento significativo de la ductilidad después de la fisuración para volúmenes de fibras de 1% (Maidl, 1995; König y Kützing, 1999) (Figura 2. 2).

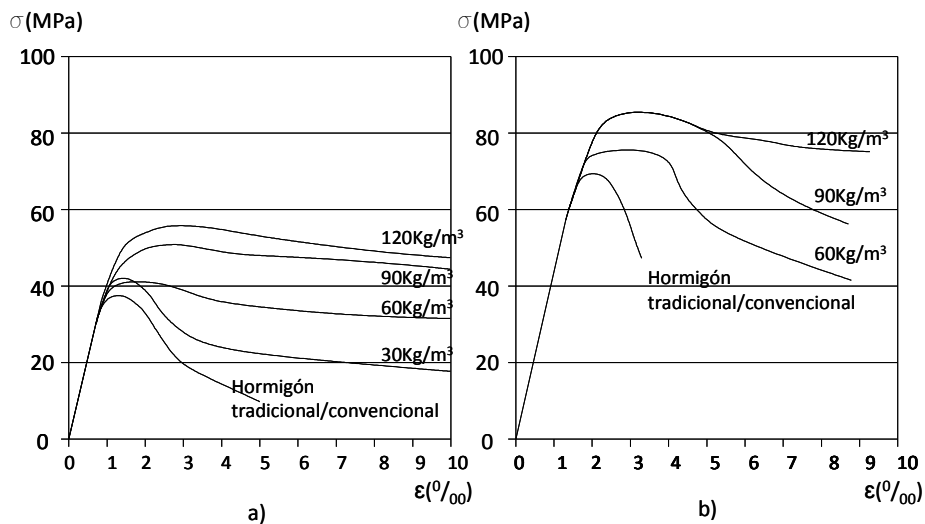


**Figura 2. 2.** Comportamiento típico de un HRFA a compresión  $f_{ctm} = 42\text{N/mm}^2$  (König y Kützing, 1999).

La resistencia ultima se ve poco afectada con la adición de fibras y tan solo se observan incrementos del 0 al 15% con volúmenes de fibras superiores a 1.5% (Johnston, 1974; Dixon y Mayfield, 1971).

El incremento de la resistencia a compresión de un hormigón convencional/tradicional con respecto a un HRFA raramente llega a exceder el 25%, (Balaguru y Shah, 1992). Para aplicaciones comerciales, la cantidad de fibras en elementos de hormigón está limitada entre 50 y 60  $\text{kg/m}^3$ ; es decir, una fracción de volumen menor de 0,75% (Balaguru y Shah, 1992; Bekaert, 1994; Kausay, 1994). Para estos casos, el incremento de resistencia puede ser considerado sin importancia para efectos de diseño (Mansur et al, 1986; Narayan et al, 1993). En algunos casos especiales donde los contenidos de fibras están entre 100 y 120 $\text{kg/m}^3$  se pueden esperar y considerar incrementos en la resistencia (Sanat et al, 1985; Balaguru y Shah, 1992; Naaman y Reinhard, 1998). En la Figura 2. 3 se aprecia el incremento de resistencia para los distintos volúmenes de fibras. Sin embargo, otros investigadores

han encontrado decrecimientos de las resistencias del hormigón cuando se han adicionado fibras, debido a la porosidad del hormigón, al proceso de amasado y a un inapropiado diseño de las amasadas de hormigón (Falkner et al, 1984).



**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).

Otros factores a ser considerados en el diseño estructural son el módulo de elasticidad, la deformación en la carga pico, el comportamiento post-pico y la deformación a compresión última. Los cambios en el módulo de elasticidad pueden ser considerados sin importancia desde el punto de vista estructural (Balaguru y Shah, 1992). Por otra parte, las fibras realizan una contribución considerable a la tenacidad en compresión (Balaguru y Shah, 1992; Naaman y Reinhard, 1998; Reinhard y Naaman, 1999). La adición de las fibras aumenta la deformación en el pico de carga. A partir de ahí hasta la deformación última desciende lentamente de acuerdo al gráfico tensión deformación; lo que quiere decir que el HRFA absorbe más energía después de la fractura a compresión comparado con el hormigón convencional/tradicional (Balaguru y Shah, 1992; Naaman y Reinhard, 1998). Este comportamiento también puede observarse en la Figura 2. 3.

La mejora de la ductilidad y tenacidad depende de diferentes parámetros tales como el volumen de las fibras, la geometría de las fibras y las propiedades de la matriz de hormigón (Balaguru y Shah, 1992; Naaman y Reinhard, 1998; Reinhard y Naaman, 1999). Un aumento en el volumen de fibras provoca el incremento de la capacidad de absorción de energía. Sin embargo, para volúmenes de fibras de 0 a 0.7% no presenta incrementos significativos; mientras que, para volúmenes entre 1.0 a 2.0% se aprecian grandes incrementos (Balaguru y Shah, 1992; Naaman y Reinhard, 1998).

Con respecto a la geometría de la fibra, longitud, diámetro y esbeltez de la fibra: Para fibra rectas, si la esbeltez aumenta la ductilidad aumenta (Craig et al, 1986;

Erdélyi, 1993; El-Niema, 1991). Para el caso de fibras con ganchos en las puntas, éstas proveen una mejor capacidad para absorber energía. La esbeltez en estos casos también es importante (Erdélyi, 1993).

En hormigones de alta resistencia la fractura es mucho más frágil que la de un hormigón tradicional/convencional. Además, estos hormigones al contener humo de sílice proveen una mejor adherencia entre la matriz de hormigón y las fibras. En éstos, para poder incorporar las ventajas de las fibras se hace necesario utilizar fibras de alto límite elástico. De este modo, se obtiene un mejor desempeño estructural (Balaguru y Shah, 1992; Naaman y Reinhard, 1998).

La Tabla 2. 2 resume los aportes más destacados realizados por diversos autores referentes al comportamiento del HRFA a compresión entre los años 1971 y 1994.

**Tabla 2. 2.** Aportes más destacados del comportamiento del HRFA a compresión, entre los años 1971 y 1994.

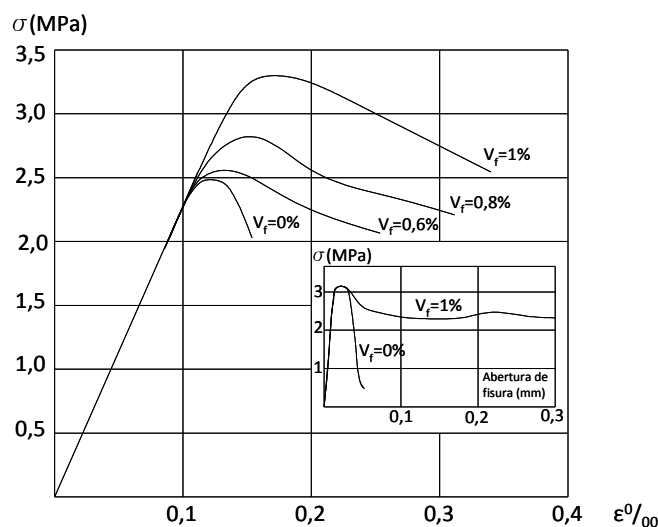
AUTOR (ES)	APORTE
Johnston, 1971; Williamson, 1974	Porcentajes de volumen de fibras entre 1.5 y 2% incrementan la resistencia a compresión entre un 0 a 15%.
Sanat et al, 1985	La resistencia a compresión aumenta con el incremento del contenido de fibras independientemente de las proporciones empleadas en las amasadas.
Mansur et al, 1986	Un pequeño aumento en la resistencia a compresión se da por el uso de fibras con ganchos.
Narayanan y Kareem-P., 1986	La resistencia a compresión aumenta proporcionalmente con el contenido de fibras empleado (medido en cubos de compresión).
Craig, 1986	La resistencia a compresión aumenta por el uso de fibras con relaciones de esbeltez de 100 ( $l_f/\phi_f$ ), mientras disminuye cuando se emplean fibras con relación de esbeltez de 60 ( $l_f/\phi_f$ ).
El-Niema, 1991	Se alcanzan altas resistencias a compresión con contenidos de fibra con relaciones de esbeltez alta.
Narayan et al, 1993	Aumentando el contenido de fibras se observaron incrementos en la resistencia a compresión, realizando pruebas en cubos de hormigón.
Erdélyi, 1993	La resistencia tanto en cubos como en cilindros se ve afectada por la relación de esbeltez ( $l_f/\phi_f$ ).
Falkner, 1994	Se observaron ligeras pérdidas de resistencia por el aumento del contenido de fibras con ganchos tanto para las pruebas en cubos como en cilindros.

### 2.1.1.2. COMPORTAMIENTO A TRACCIÓN.

El comportamiento del HRFA está influenciado por el contenido de fibras, el tipo de fibras, su distribución y orientación; además de las propiedades de la matriz de hormigón. Bajos contenidos de fibras dan paso a propiedades similares del hormigón tradicional. El objetivo de la adición de fibras de acero al hormigón es obtener un comportamiento de ruptura dúctil (Kooiman, 2000; Thomée, 2006).

Cuando el HRFA está sometido a esfuerzos de tracción, las fibras de acero reducen el riesgo del inicio de la fisuración; además, retardan la propagación de fisuras en el hormigón, realzando su resistencia. Después de la fisuración, a diferencia del hormigón convencional, las tensiones de tracción con el hormigón antes de la fisuración son transferidas a las fibras metálicas y éstas controlan la propagación de las fisuras mientras se deslizan del hormigón con los incrementos de carga. Esto permite mantener una resistencia residual en el hormigón figurado (Zhu et al, 2002).

El efecto de la adición de fibras sobre el comportamiento a tracción se puede observar claramente en la Figura 2. 4, donde relaciones típicas de la tensión a tracción uni-axial y abertura de fisura de un HRFA son comparadas con un hormigón tradicional/convencional (Serna, 1984).



**Figura 2. 4.** Curvas esfuerzo-deformación en tracción para el HRFA (Adaptado de Serna, 1984).

La clara diferencia entre el HRFA y el hormigón convencional/tradicional, es que, el primero después de alcanzar la resistencia máxima a primera fisura presenta un decrecimiento súbito de la capacidad de carga acompañada por una meseta de bajos niveles de carga causada por la fricción continua y al arrancamiento de las fibras; mientras que, en el segundo la ruptura es simplemente súbita y frágil.

Para analizar el comportamiento a tracción uni-axial del HRFA se compara con tres tipos de hormigones: el hormigón tradicional, el HRFA con contenido alto de fibras y el HRFA con contenido bajo de fibras (Figura 2. 5). Cuando se alcanza un 60% de la resistencia de la matriz de hormigón, la relación  $\sigma$ - $\epsilon$  es lineal, mas allá de este límite elástico se presenta una relación no-lineal debido a la presencia de micro fisuras.

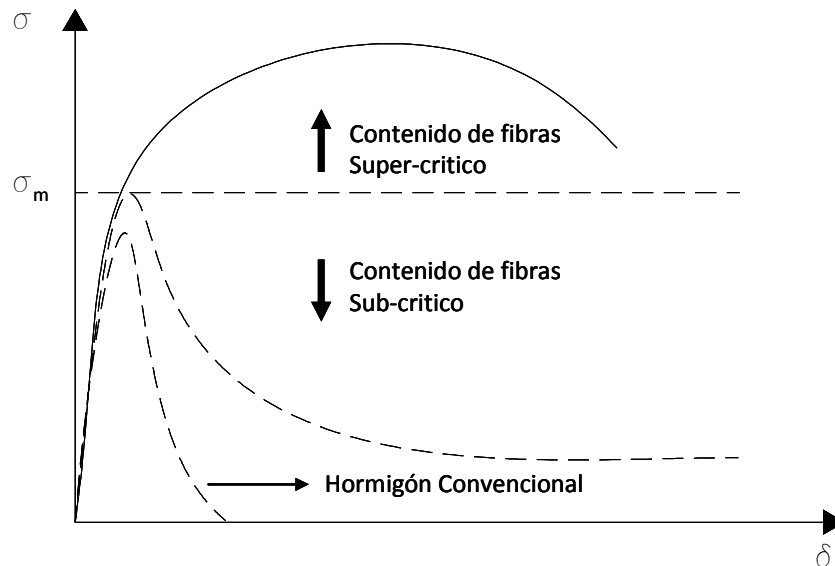


Figura 2. 5. Comportamiento a tracción uni-axial (Thomé, 2006).

Una vez alcanzada la resistencia de la matriz se observan diferentes comportamientos. Para el caso del hormigón tradicional rompe de forma frágil de modo que la tensión de tracción cae súbitamente. Para HRFA con contenidos de fibras altas, éstas son capaces de asumir todas las tensiones de tracción aún cuando la matriz está fisurada, algo similar al comportamiento del hormigón convencional con el mínimo refuerzo.

El HRFA con bajas cantidades es el más empleado en las aplicaciones prácticas. En este caso, las fibras son capaces de asumir todas las tensiones cuando la matriz está fisurada, lo que conlleva una súbita caída de la capacidad de soportar carga, en combinación de una única fisura localizada. Esta súbita caída es seguida por un nivel bajo denominado meseta de post-fisuración, resultado del continuo arrancamiento y de la fricción de las fibras metálicas.

Por lo anterior, una de las principales razones del uso de las fibras metálicas en el hormigón es mejorar la ductilidad del material. Dosificaciones que consideran cantidades suficientes de fibras aumentan la resistencia a flexo-tracción, aunque afectan la trabajabilidad del material. Así, desde un punto de vista estructural y para facilitar la manejabilidad del HRFA se consideran volúmenes de fibras relativamente bajos comprendidos entre  $20\text{Kg/m}^3$  a  $40\text{kg/m}^3$  (Bekaert, 1994; Kausay, 1994; Naaman y Shah, 1976). Sin embargo, para aplicaciones especiales de HRFA el contenido de fibras puede llegar al 2% o más, alcanzando resistencias a tracción significantes (Williamson,

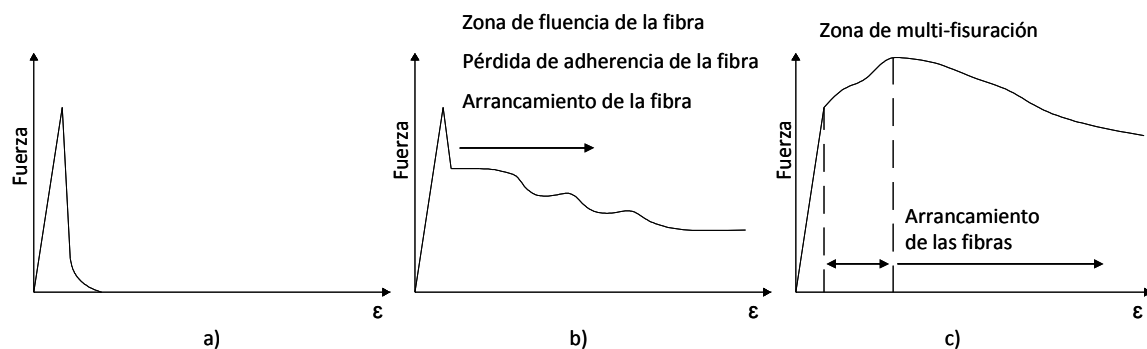
1974; Johnston y Gray, 1978; Naaman y Reinhard, 1998; Krstulovic-Opara y Malak, 1997).

Se pueden distinguir tres comportamientos diferentes del hormigón causados por el contenido de fibras (Figura 2. 6):

*Contenido bajo de fibras:* Caracterizados por alcanzar la fractura de forma brusca. Su comportamiento es muy similar al del hormigón tradicional/convencional; por lo tanto, no es significativo su desempeño estructural (Balaguru y Shah, 1992).

*Contenido medio de fibras:* Se caracterizan porque su capacidad de carga disminuye una vez alcanzada la fractura, pero puede continuar resistiendo cargas menores que la carga de primera fisura. En la etapa posterior a la fractura la carga es transmitida de la matriz a las fibras en la zona fisurada; así, la capacidad de carga depende de la transferencia mecánica de las fibras representada por: el deslizamiento y el arrancamiento de las fibras (Balaguru y Shah, 1992). Este contenido de fibras provee un aumento en la resistencia a tracción y un aumento significativo en cuanto a la ductilidad (Balaguru y Shah, 1992; Abrishami y Mitchel, 1996).

*Contenido alto de fibras:* Las fibras después de la fractura aumentan la capacidad de carga (Reinhardt y Naaman, 1999). Si hay una cantidad suficiente de fibras en la sección fisurada, éstas continuarán resistiendo cargas superiores a la primera fisura. Posteriormente, se encuentra una zona de multi-fisuración, donde la rigidez del material decrece debido a la baja contribución del hormigón (Naaman et al, 1991).



**Figura 2. 6.** Comportamiento a tracción uni-axial (Balaguru y Shah, 1992).

La pendiente del comportamiento post-fisuración depende del contenido de fibras y de las propiedades de adherencia de las fibras. Mientras se incrementa la carga, más fisuras empiezan a aparecer a lo largo de la longitud de la probeta. Finalmente, cuando las fibras inician el arrancamiento de la matriz de hormigón la capacidad de carga decrece. Este tipo de fractura representa un uso óptimo de la fibra y de las propiedades de la matriz.

De acuerdo con la Figura 2. 6 se distinguen tres zonas/ramas en los diagramas tensión-deformación:

- Elástica: representa el comportamiento pre-fisurado del material y es donde se puede definir el módulo elástico del hormigón ignorando el efecto de las fibras (Naaman et al, 1991).
- Inelástica o de múltiple fisuración: si existe puede ser considerada como una región donde las deformaciones no-lineales o plásticas ocurren. Esta zona está bien identificada entre el desarrollo de la primera fisura y la resistencia última del material (Reindhardt y Naaman, 1999). También es conocida como una zona de endurecimiento.
- Post-pico/post-fisuración: corresponde al mecanismo de arrancamiento de la fibra, depende de la geometría de la fibra, de la forma y del volumen (Naaman y Reindhardt, 1998). La resistencia post-fisuración puede variar desde un comportamiento frágil hasta uno perfectamente plástico (Balaguru y Shah, 1992).

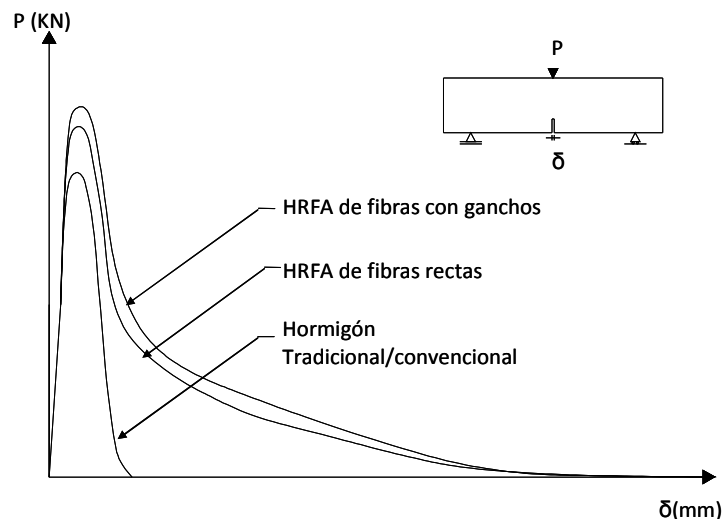
Estas tres partes no se obtienen siempre para todos los HRFA, ya que depende del hormigón y de las propiedades de las fibras como: la longitud, el diámetro, la forma, el contenido de fibras y las características de adherencia entre las fibras y el hormigón.

### 2.1.3. COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN.

Comprender el comportamiento del HRFA a flexo-tracción es la base de algunas aplicaciones en el campo de la ingeniería, además de ser importante para la adecuada modelización estructural del material. Ésta es la razón por la cual se han realizado esfuerzos por comprender las propiedades y las características del HRFA ante las tensiones de tracción y flexo-tracción.

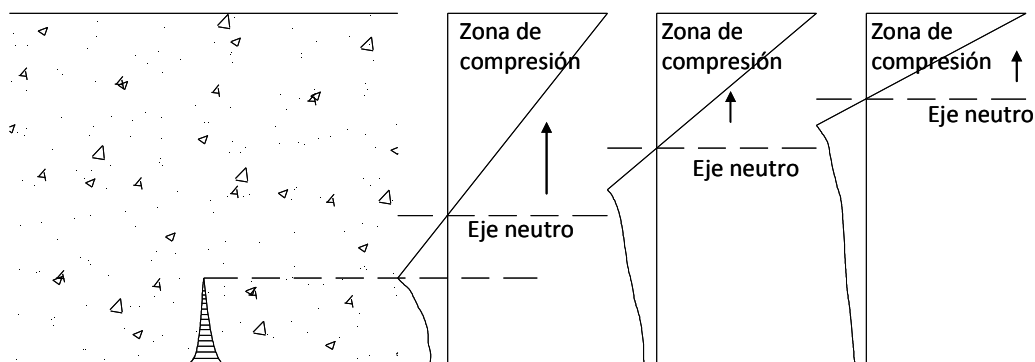
El incremento en la resistencia a flexo-tracción es sustancialmente mayor que en tracción directa y en compresión, ya que el comportamiento dúctil del HRFA en la zona traccionada altera sustancialmente la distribución de las tensiones y la deformación a lo largo del canto de una viga. La distribución de tensiones es plástica en la zona de tracción y elástica en la zona de compresión (Hannant, 1978).

En pruebas a flexo-tracción, la resistencia del HRFA es del 50 al 70% mayor que al de un hormigón tradicional/convencional (Dixon y Mayfield, 1971; Kar y Pal, 1972; Shah y Rangan, 1971), y puede duplicarse con dosificaciones mayores de fibras (Romualdi y Mandel, 1964).



**Figura 2. 7.** Comportamiento a flexo-tracción del HRFA (Kooiman, 2000).

El comportamiento post-pico del HRFA es fuertemente influenciado por la adición de las fibras. Para el caso de una sección transversal de HRFA que está sujeta a momentos de flexión, la post-fisuración o ablandamiento lleva a una redistribución de tensiones (Kooiman, 2000). En la Figura 2. 8 se puede observar cómo el eje neutro se desplaza hacia la zona de compresión en búsqueda de nuevos estados de equilibrio.



**Figura 2. 8.** Redistribución de tensiones en una sección transversal de HRFA sujeta a flexo-tracción (Kooiman, 2000).

Este mecanismo de fractura permite al HRFA soportar incrementos de carga aún cuando la zona en tracción está fisurada. El HRFA es mucho más dúctil que el hormigón tradicional/convencional y su capacidad de soportar momentos depende de algunos factores que influyen el comportamiento del arrancamiento de cada fibra y su redistribución (Stang et al, 1990; Kooiman, 2000).



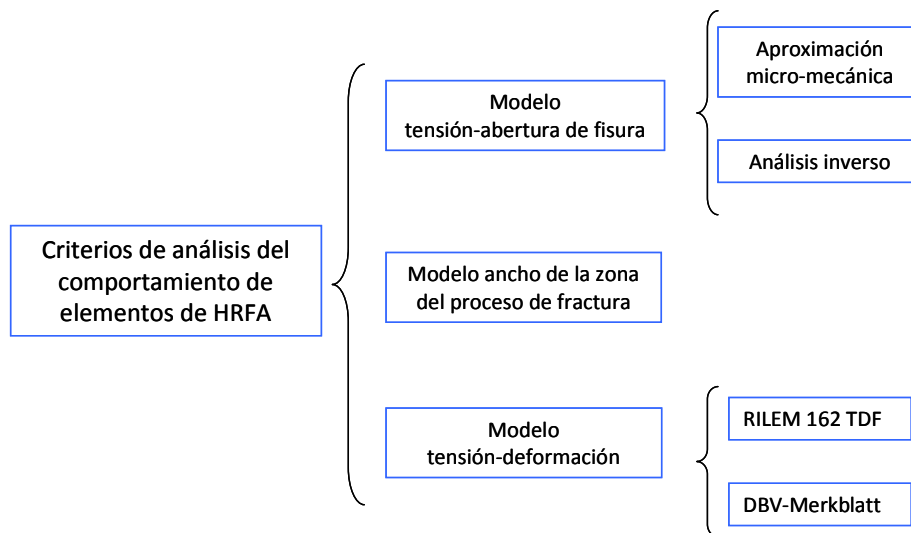
## 2.2. MODELOS DE COMPORTAMIENTO PARA EL HRFA.

El HRFA presenta un comportamiento complejo en la etapa de post-fisuración, razón por la cual no existe una única ley constitutiva que pueda representar su respuesta. En los siguientes apartados se enuncian brevemente los modelos de comportamiento propuestos por diversos investigadores en los últimos años, y aquellos contenidos en las normativas o estándares internacionales.

### 2.2.1. CRITERIOS DE ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS DE HRFA.

Se discuten tres criterios para el análisis del comportamiento de elementos de HRFA (Figura 2. 9).

- El primer criterio se caracteriza por analizar la relación *tensión-abertura de fisura*, basándose en el modelo de la fisura ficticia de Hillerborg et al, (1976). Se ha tratado de dos formas diferentes:
  - ✓ Por medio de una aproximación micro-mecánica desarrollada por Li et al, (1993). Para describir el comportamiento post-fisuración del HRFA se ha desarrollado un modelo semi- analítico basado en parámetros micro-mecánicos, determinados de forma experimental.
  - ✓ Obteniendo el comportamiento post-fisura a partir del análisis inverso de un ensayo de flexo-tracción. Se desarrolla un software especial para determinar la relación de ablandamiento.
- El segundo criterio de análisis se basa en la teoría del *ancho de la zona del proceso de fractura (crack band)* desarrollado por Bazant y Oh, (1983). Esta teoría define una zona donde se dispersan las micro fisuras. Esta zona es conocida como zona de proceso de fractura y su profundidad se tiene en cuenta en el modelo. Para esta zona en particular se aplica una relación tensión-deformación en lugar de una relación tensión-abertura de fisura.
- El tercer criterio también se basa en asumir una relación *tensión-deformación*. El punto de partida del método es que el compuesto cementante que envuelve la fibra homogénea es continuo, deformándose cuando es tensionado y llegando a la fractura cuando se excede el límite de tensión o deformación última (DBV-Merkblatt, 1992; RILEM TC 162-TDF, 2000).



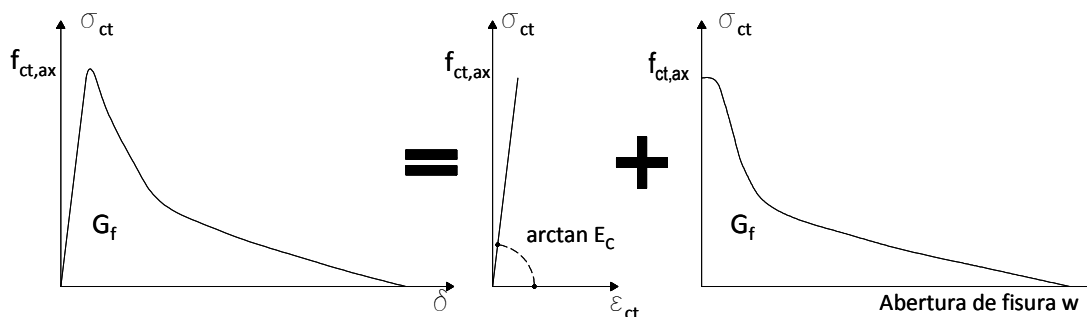
**Figura 2. 9.** Esquematización de los modelos de análisis.

### 2.2.1.1. Modelo Tensión-Abertura De Fisura.

La forma más directa para analizar el comportamiento post-fisuración del material es realizando el ensayo de tracción uni-axial con deformación controlada. El resultado de este ensayo es la relación tensión/abertura de fisura en tracción.

$$\sigma_{ct}(\delta) = \frac{P(\delta)}{A} \tag{2. 1}$$

De acuerdo con el modelo de la fisura ficticia de Hillerborg et al, (1976), la relación  $\sigma$ - $\delta$  (tensión-desplazamiento), puede ser expresada por medio de la relación tensión-deformación unitaria para el comportamiento elástico lineal del hormigón sin fisurar y la relación tensión-abertura de fisura para el comportamiento de la sección fisurada, Figura 2. 10.



**Figura 2. 10.** Modelo de la fisuración ficticia.

El modelo de fisuración ficticia asume que a partir de cierta longitud desde la punta de inicio de la fisura “ficticia” las tensiones son transferidas en una zona cohesiva hasta alcanzar un ancho de fisura crítico  $w_0$ , (Figura 2. 11).

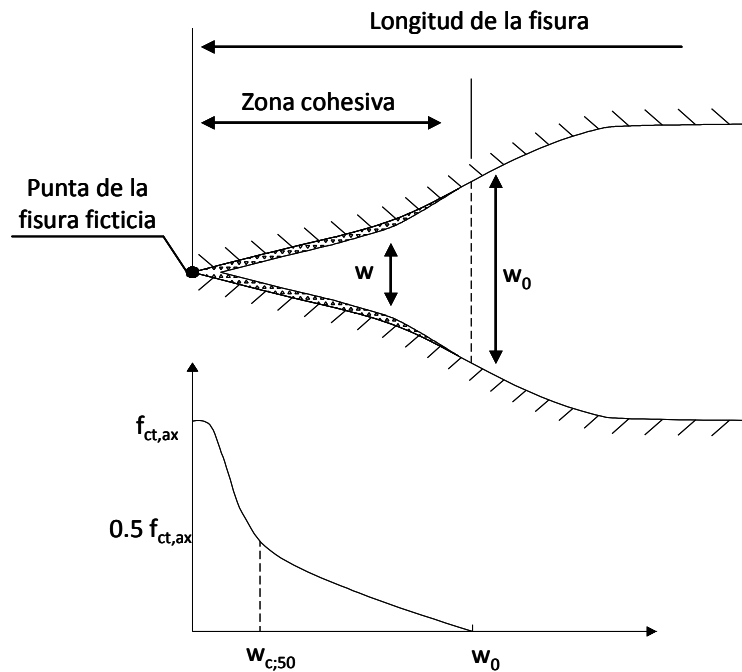


Figura 2. 11. Modelo de la fisuración ficticia.

La zona cohesiva puede ser mucho más grande con la adición de las fibras a la matriz de hormigón. La longitud de la zona cohesiva depende de la longitud de la fisura que es cosida por las fibras, (Figura 2. 12) (Kooiman et al, 1998; Hillerborg y Rots, 1989).

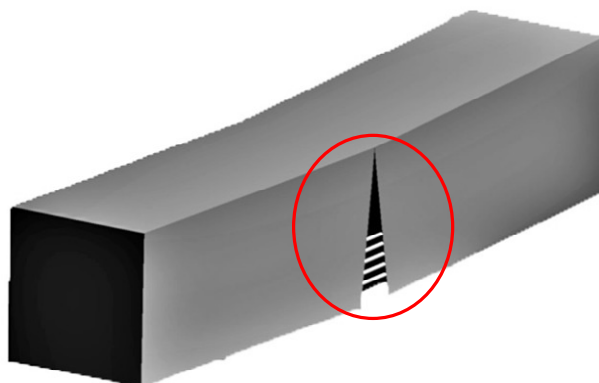


Figura 2. 12. Efecto de puente de las fibras. Mayor longitud de la zona cohesiva gracias a las fibras.

Análisis Micro – Mecánico.

Basado en el modelo de fisura ficticia de Hillerborg et al, (1976) y en conceptos micro mecánicos, Li et al, (1993) desarrollaron un procedimiento de análisis semi-analítico para obtener una relación post-fisuración del material para compuestos cementantes reforzados con fibras (HRFA). Para analizar el proceso de fractura en el HRFA bajo tracción uni-axial encontraron ecuaciones para determinar la relación tensión–apertura de fisura. Para el caso de una única fibra y no de un modelo de ruptura de fibra, Li et al, (1993) describen la resistencia a tracción  $\sigma_{fct}$  llevada a través de la fisura del HRF como función del ancho de fisura.

$$\sigma_{fct}(w) = \sigma_{ct}(w) + \sum_{i=1}^{nf} \sigma_f^i(w) + \sigma_{ps}(w) \quad (2.2)$$

$$\sigma_{ct}(w) = \frac{f_{ct,ax}}{1 + \left(\frac{w}{w_{c,50}}\right)^P} \quad (2.3)$$

En la ecuación 2.3,  $P$  es un factor de forma de la curva de ablandamiento y  $w_{c,50}$  es el ancho característico de la fisura, correspondiente a una reducción de la capacidad de soportar tensión a un 50% de la resistencia a tracción  $f_{ct,ax}$ . El factor de forma y el ancho característico de fisura deben ser determinados experimentalmente.

En el segundo término de la ecuación 2.2,  $nf$  es el número de diferentes fibras del sistema de arrancamiento (pull out) en la sección transversal considerada y  $\sigma_f^i$  es la contribución en forma de puente de la fibra en el sistema. Este comportamiento de arrancamiento puede ser modelado por una única interfase de cohesión en la cual la deformación de la matriz no es considerada.

El arrancamiento es modelado por una única interfase de cohesión y se ignora la deformación de la matriz. Esto permite una única relación entre la tensión de la fibra y el desplazamiento relativo de la fibra con respecto a la superficie fisurada.

El efecto de puente de la fibra es el caso proporcional a la resistencia de fricción  $T$  entre la matriz y la fibra. La resistencia a la fricción es función de sí misma. La relación adherencia-ablandamiento se tiene en cuenta cuando:

$$\tau = \tau_o \quad (2.4) \quad \text{Para} \quad \delta = \delta^*$$

Y la relación de adherencia-deslizamiento:

$$\tau = \tau_o + a_1 \delta + a_2 \delta^2 \quad (2.5) \quad \text{Para} \quad \delta > \delta^*$$

En las ecuaciones 2. 4 y 2. 5,  $\delta^*$  corresponde al ancho de fisura cuando el arrancamiento es total,  $\delta$  es el ancho de fisura sin el efecto Cook – Gordon. Este efecto induce una separación adicional a la matriz cuando la punta de una fisura alcanza la fibra (Figura 2. 13).

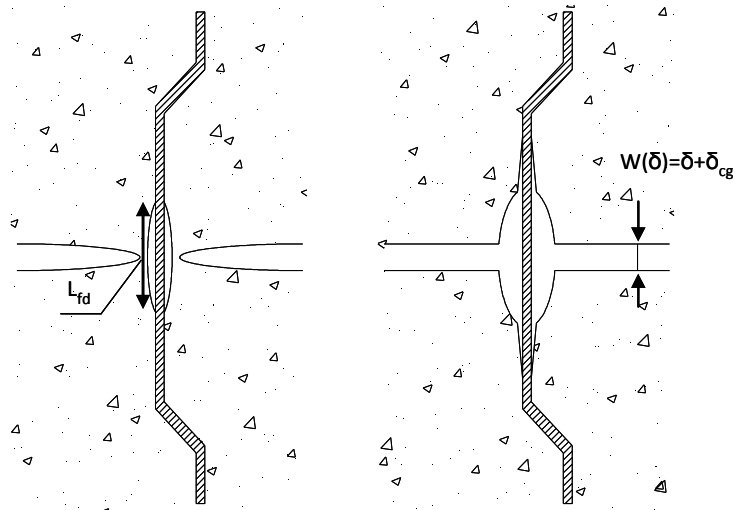


Figura 2. 13. Efecto Cook–Gordon (Li et al, 1993).

Cuando la punta de la fisura se aproxima a la fibra, ocurre un pre-arrancamiento en la interfase matriz–fibra. Cuando la punta de la fisura alcanza la fibra, el estiramiento elástico del segmento de la fibra y el arrancamiento por fricción de la interfase deja una abertura de fisura adicional. El desplazamiento de la abertura de fisura adicional puede ser estimado por la siguiente expresión:

$$\delta_{cg} = \frac{4L_{fd}P}{\pi d_f^2 E_f} * \sigma_f^i \quad (2.6)$$

De este modo, el ancho de fisura total es:

$$w(\delta) = \delta + \delta_{cg} \quad (2.7)$$

La tensión de las fibras que cosen la fisura  $\sigma_f^i$  de un sistema de fibra individual puede ser calculada indirectamente como una función del total del ancho de fisura  $w$ .

La determinación de la contribución total de las fibras que cosen la fisura (efecto de puente de las fibras, término  $\sum_{i=1}^n \sigma_f^i w$ ) es obtenido por la contribución individual de las fibras para todas las posibles posiciones y orientaciones de la fibra relativas a la fisura.

El tercer término de la ecuación 2.2 expresa que antes de alguna abertura de fisura, la fibra está tensada (en tracción). Este es el término llamado pre-tensión y tiene en cuenta que las fibras soportan carga a través de deformación elástica cuando la primera fisura es formada.

$$\sigma_{ps}(w) = f_{ps}^o \frac{w^* - w}{w^*} \quad (2.8) \quad \text{Para} \quad w \leq w^*$$

$$\sigma_{ps}(w) = 0 \quad (2.9) \quad \text{Para} \quad w > w^*$$

$w^*$  es el ancho de fisura donde la pre-tensión es eliminada y las fibras están completamente arrancadas.

$$w^* = \delta^* + \delta_{cg} \quad (2.10)$$

$$f_{ps}^o = \eta_\theta \eta_1 \epsilon_{ct} E_f V_f \quad (2.11)$$

En la ecuación 2.11,  $f_{ps}^o$  es el factor que define la cantidad de fibras,  $\eta_\theta$  y  $\eta_1$  la orientación y la longitud eficiente de estas.

Este modelo requiere de un entendimiento básico de la influencia de parámetros micro – mecánicos en la forma de la curva tensión–ancho de fisura.

Es necesaria una aproximación simplificada para la interpretación y aproximación de los datos experimentales.

### Análisis Inverso.

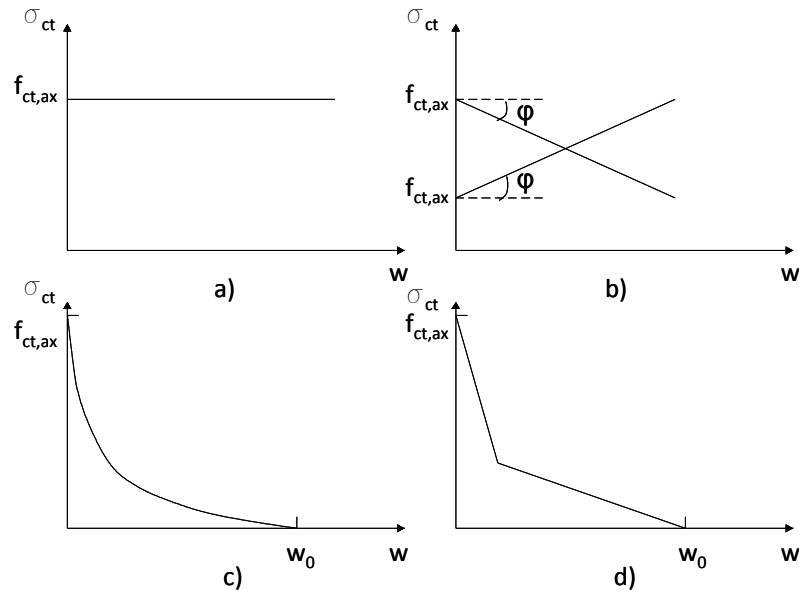
Para obtener la relación tensión–ancho de fisura para el HRFA se utiliza el análisis inverso. Es un proceso de análisis fácil de llevar a cabo con la ayuda de ordenadores.

Van Mier, (1997) lo describe así:

*“En un proceso de análisis inverso, se asume un diagrama de ablandamiento y un análisis numérico de la geometría de fractura considerada. Se calcula la desviación*

entre los resultados computacionales y los experimentales, dependiendo de esta desviación y del error permisible, el análisis se repite empleando un diagrama de ablandamiento modificado. El procedimiento es repetido hasta que el error ha llegado a ser tan pequeño que esté dentro de unos límites predeterminados”.

En el proceso de análisis inverso, el diagrama de ablandamiento puede ser esquematizado de formas diferentes. La relación se puede idealizar con un número diferente de grados de libertad (Figura 2. 14).



**Figura 2. 14.** Relaciones idealizadas tensión-abertura de fisura ( $\sigma$ - $w$ ).

La relación que ofrece una adecuada aproximación del comportamiento post-fisuración tiene tres o más parámetros.

Para el hormigón tradicional, Wolinski et al, (1987) propuso una ecuación con tres parámetros:

$$\sigma_{ct}(w) = f_{ct,ax} \left( 1 - \left( \frac{w}{w_0} \right)^P \right) \quad (2.12)$$

Donde:

$f_{ct,ax}$  = Resistencia a tracción axial.

$w_0$  = Ancho crítico de fisura.

$P$  = Factor de forma de la curva de ablandamiento.

Otros autores (Roelfstra y Wittmann, 1986) usan una aproximación bi-lineal para la relación de ablandamiento. Está descrita por cuatro parámetros:

$$\sigma_{ct}(w) = f_{ct,ax} - \frac{w}{w_c} (f_{ct,ax} - f_{ct,eq,bil}) \quad (2.13) \quad \text{Para} \quad w \leq w_c$$

$$\sigma_{ct}(w) = f_{ct,eq,bil} \frac{w_o - w}{w_o - w_c} \quad (2.14) \quad \text{Para} \quad w_c < w \leq w_o$$

Donde:

$w_c$  = Ancho de fisura característico.

$f_{ct,eq,bil}$  = Resistencia equivalente post-fisuración del HRFA en una relación de ablandamiento bi-lineal.

El procedimiento de análisis inverso es empleado para encontrar un diagrama adecuado de ablandamiento en tracción para el HRFA que describa la curva carga-abertura de fisura del ensayo de la EN14651 con una precisión adecuada. Una descripción adecuada de este comportamiento es necesaria para especificar el comportamiento a flexión de estructuras de HRFA en la práctica (Kooiman, 2000).

*“La parte interesante de un diagrama carga-flecha es la carga a primera fisura, ya que define la capacidad de carga de la sección transversal. En el caso de estructuras estáticamente indeterminadas, una pequeña parte de la curva carga-flecha, después de la carga de primera fisura es también importante, ya que se presenta la redistribución de tensiones en la estructura resultando un aumento en la capacidad de carga” (Kooiman, 2000).*

#### 2.2.1.2. Modelo Ancho de la Zona de Proceso de Fractura (*Crack Band*).

La teoría presentada por Bazant y Oh (1983), define una zona donde aparecen extendidas micro-fisuraciones (Figura 2. 15). El ancho de la zona es llamada zona en proceso de fractura, de la cual resulta una relación tensión-deformación para un ancho de fisuración particular en lugar de una relación tensión-ancho de fisura para una zona con un ancho infinitamente pequeño.

El modelo está basado en que la fractura en un material heterogéneo puede ser modelada como una zona paralela (cinta paralela o *band of parallel*) densamente distribuida con micro fisuras y en oposición a los modelos tensión-ancho de fisura, donde la zona cohesiva es asumida entre la punta de la fisura ficticia y la macro fisura.



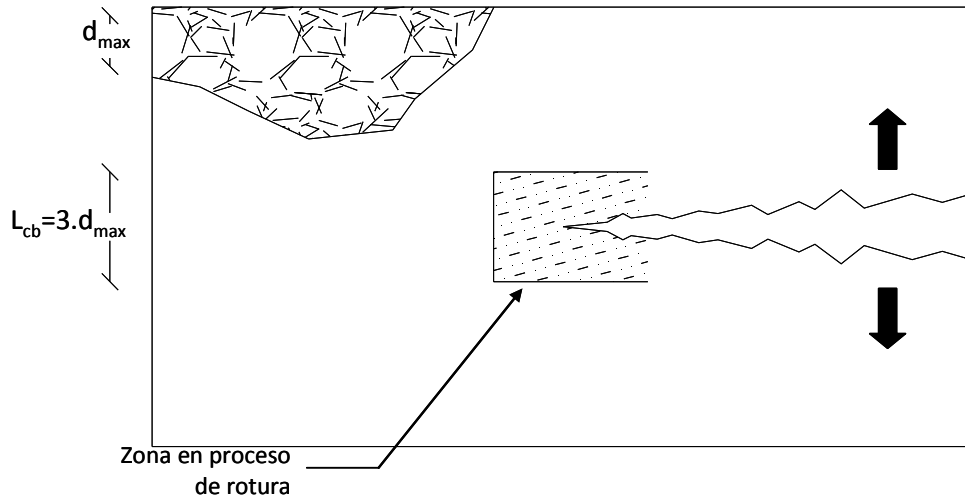


Figura 2. 15. Definición de la teoría del efecto de puente (Bazant y Oh, 1983).

Bazant y Oh (1983) resumen que si la relación de la tensión normal  $\sigma_{ct}$  y el desplazamiento relativo  $\delta$ , a través de la línea de fisura es idéntico a la relación de  $\sigma_{ct}$  y el desplazamiento  $\delta = \epsilon_c \cdot l_{cb}$  obtenido por la acumulación de deformaciones debidas a micro fisuras sobre el ancho de la zona de fisuración  $l_{cb}$ , el modelo de fisura es lineal y el modelo de zona de fisuración es equivalente.

En el análisis de elementos finitos de procesos de fractura, el modelo de la zona de fisuración es frecuentemente usado como una de las dos aproximaciones existentes para llevar a cabo esta clase de análisis. En contraste con los modelos de fisuración lineal empleados en la también llamada fisuración discreta, la relación tensión–deformación basada en la teoría de zonas de fisuración está asociada a la también llamada aproximación de fisuración distribuida.

La relación tensión–deformación empleada en la aproximación de fisuración distribuida está caracterizada por tres parámetros. En adición al método de zona de fisuración, las propiedades de fractura del material en este modelo se caracterizan por el límite de tensión uni-axial y la energía de fractura.

De acuerdo con Bazant y Oh (1983), la energía de fractura  $G_f$  es la energía consumida en la formación y abertura de todas las micro-fisuras por unidad de área del plano, y es definida por:

$$G_f = l_{cb} \cdot \int_{\epsilon(\sigma_{ct})}^{\epsilon^{(0)}} \sigma_c(\epsilon) \cdot d\epsilon_c \quad (2.15)$$

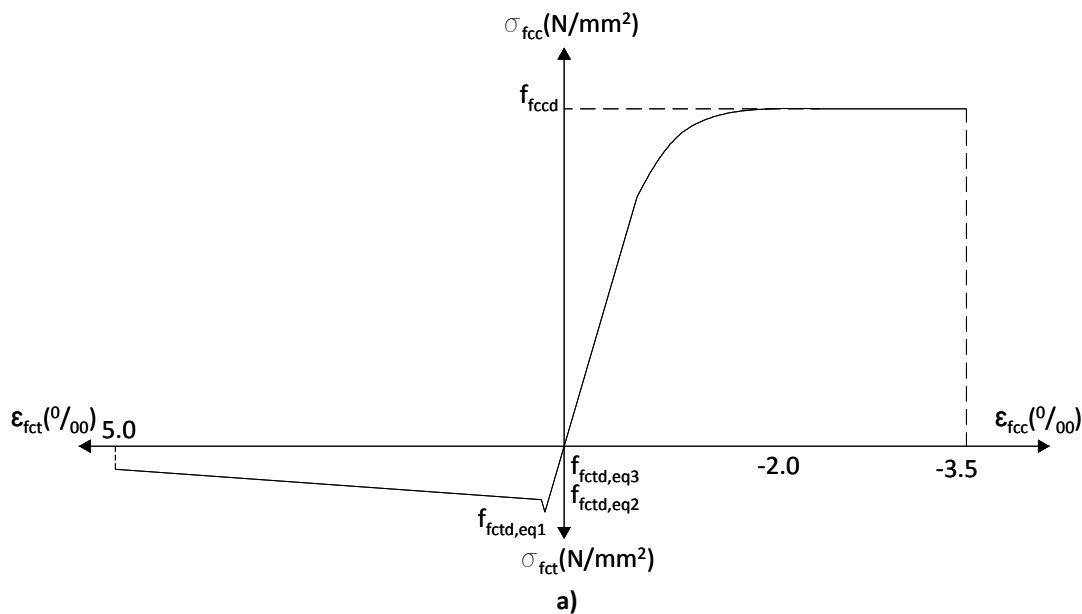
El ancho de la zona de fractura se determina computacionalmente, pero no es un parámetro objetivo; éste depende de la malla seleccionada y sus parámetros: tamaño,

forma, ángulo de la línea de la malla. El ancho de la zona de fisuración avanza con la dirección de la fisura.

### 2.2.1.3. Modelo Tensión - Deformación.

El comportamiento post-fisuración del HRFA está orientado al análisis de estructuras estáticamente indeterminadas sujetas a cargas de flexión. En esta clase de estructuras el comportamiento del material puede ser resultado de una redistribución de esfuerzos en la sección transversal fisurada como también en toda la estructura. Cuando el dimensionamiento es como estructura o como elemento estructural la forma ideal del análisis es modelar el comportamiento a compresión y tracción en una relación tensión-deformación.

Las normas DBV-Merkblatt, (1992) y RILEM TC 162-TDF (2000) presentan recomendaciones acerca del diseño y prueba del HRFA, basados en la relación tensión-deformación. La Figura 2. 16 muestra los diagramas tensión-deformación propuestos por ambas normas.



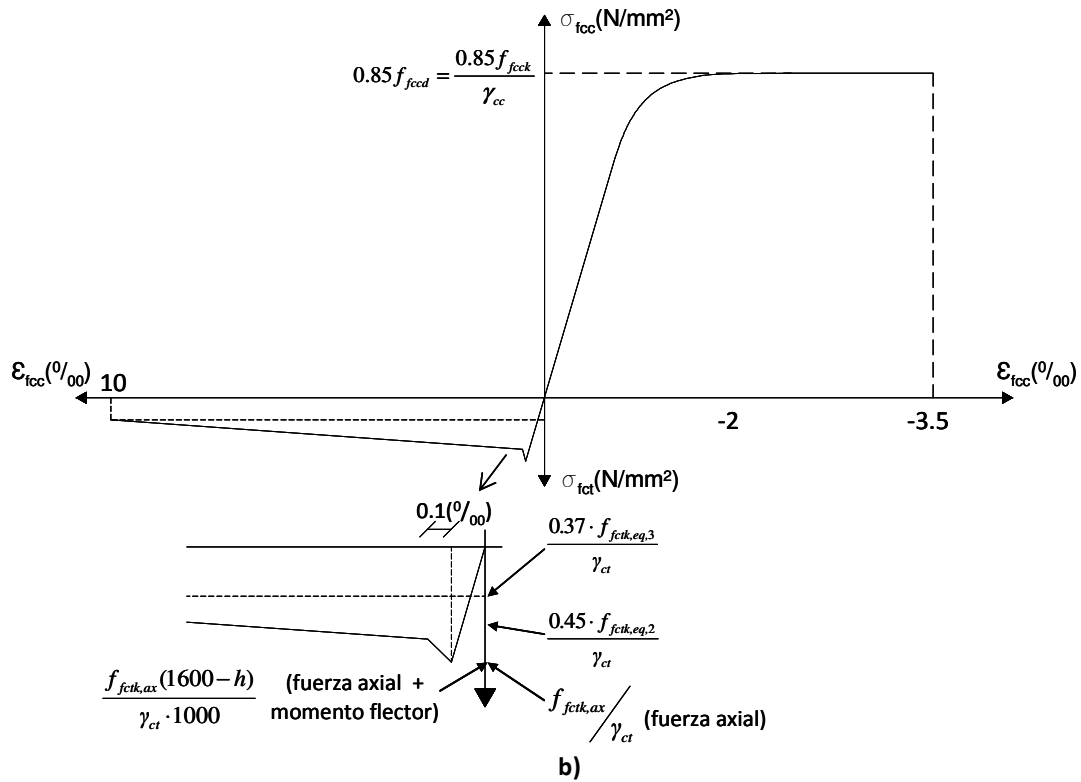


Figura 2. 16. Diagrama tensión–deformación; a) de acuerdo con DBV-Merkblatt (1992); b) de acuerdo con RILEM TC 162-TDF (2000).

### 2.2.2. MODELOS DE COMPORTAMIENTO PROPUESTOS EN LOS ÚLTIMOS AÑOS.

A pesar de las investigaciones realizadas en las últimas décadas, en la actualidad, no se ha encontrado una ley constitutiva de comportamiento del HRFA que unifique los aportes presentados por diversos investigadores. La mayoría de modelos que han sido propuestos presentan similitudes, como que, son diagramas simples, continuos y no diferenciables, caracterizados a través de propiedades macroscópicas por medio de procedimientos de análisis inverso. Se enfocan ya sea en la relación tensión-deformación ( $\sigma - \epsilon$ ) o tensión-abertura de fisura ( $\sigma - w$ ) (Laranjeira, 2010).

La Tabla 2. 3 resume algunos de los modelos constitutivos que han sido propuestos.

**Tabla 2. 3.** Modelos de comportamiento existentes para el HRFA.

	Autor	Diagrama
Tensión-deformación (σ-ε)	Lim et. al, 1987	
	Lok y Xíao, 1998	
	Dupont y Vandewalle, 2002	
	Cunha, 2009	
Tensión-abertura de fisura (σ-w)	Kooiman, 2000	
	Barragán, 2002	
	Di Prisco et. al, 2004	
	Dozio, 2008	
Laranjeira, 2010		

Algunos de los modelos enfocados en la relación tensión-deformación ( $\sigma - \epsilon$ ) son los de: Lim et al, (1987); Lok y Xiao (1998), Dupont y Vandewalle (2002), y Cunha (2009). Lim et al, (1987) propone una ley constitutiva analítica basada en el material cuantificable y en las propiedades de la mezcla; considera bajos contenidos de fibras y asume que bajo tales condiciones el aporte de las fibras es insignificante en el comportamiento pre-pico y lleva a un comportamiento constante post-pico. Lok y Xiao (1998) introducen una relación no lineal en la zona pre-pico e incluyen una mejor estimación de la resistencia residual. Dupont y Vandewalle (2002) proponen dos niveles en la relación tensión-deformación (basados en los modelos tri-lineales sugeridos por los códigos europeos) y tiene la particularidad de que en la zona post-pico la curva es independiente de la resistencia a tensión de la matriz. Cunha (2009) propone un modelo de comportamiento tensión-deformación basado en pruebas de arrancamiento de donde obtiene los parámetros que definen la curva y donde la adherencia de las fibras es asumida como perfecta. La relación tensión-deformación es obtenida de forma indirecta a través del comportamiento carga-arrancamiento; su diagrama es tri-lineal, con una relación lineal en la zona pre-pico y la zona post-pico compuesta por dos tramos. Los puntos de inflexión del diagrama son obtenidos de acuerdo con los ángulos de inclinación de las fibras.

En cuanto a los modelos que caracterizan el comportamiento post-fisuración y que se enfocan en la relación tensión-abertura de fisura ( $\sigma - w$ ), destacan: Kooiman (2000), Barragán (2002), Dozio (2008), Di Prisco et al, (2004) y Laranjeira (2010). Kooiman (2000) propone un diagrama bi-lineal para la respuesta de ablandamiento cuyos parámetros se obtienen a través de procedimientos de análisis inverso. Por su parte, Barragán (2002) propone un modelo tri-lineal basado en pruebas de tensión uni-axiales, no incluye una función de decrecimiento, sino al contrario un incremento en la resistencia residual con aberturas de fisura superiores a 2mm. Di Prisco et al, (2004) sugiere una curva bi-lineal, la primera parte está relacionada con la fisuración de la matriz y es igual a la propuesta por el código CEB-FIP, 1991; mientras, la segunda parte está relacionada con el arrancamiento de las fibras para dos tensiones y dos anchos de fisura. Dozio (2008) realiza modificaciones al diagrama de Di Prisco et al, (2004) y presenta un modelo bi-lineal, cuyo primer tramo se refiere al ablandamiento debido a la fisuración de la matriz y cuyo segundo tramo se refiere al arrancamiento de las fibras, caracterizado por considerar tensiones medias en dos rangos de abertura de fisura diferentes. Laranjeira (2010) presenta un método directo para predecir la respuesta a tracción del HRFA, lleva a cabo ensayos de tracción directa y analiza el proceso de arrancamiento de fibras inclinadas con y sin extremos conformados e identifica los parámetros con los que define dos modelos para predecir la respuesta del arrancamiento de las fibras para ambos casos. Por medio de un análisis estadístico plantea una metodología para definir la orientación de las fibras, introduciendo el concepto de perfil de orientación. Además, considera tres conceptos físicos del comportamiento a tracción del material, la contribución del hormigón, el refuerzo equivalente (estima la semejanza entre las fibras y el refuerzo de acero pero con menor eficiencia) y la resistencia de adherencia. Finalmente, formula y valida el modelo constitutivo comparando con los resultados experimentales y propone expresiones para el diseño del HRFA.

2.2.3. MODELOS DE COMPORTAMIENTO PROPUESTOS POR NORMATIVAS EUROPEAS.

Teniendo en cuenta que no existe aún una ley constitutiva ampliamente difundida y aceptada para el diseño estructural del HRFA, los códigos europeos proponen guías de diseño que requieren ser analizadas y discutidas (Laranjeira, 2010); además, existen dudas de los métodos propuestos en dichas normas (Di Prisco et al, 2004). La Tabla 2. 4 muestra un análisis comparativo de los códigos europeos sugerido por Blanco et al, (2009), en él se incluyen el diagrama, los parámetros que definen las leyes constitutivas, y sus métodos de prueba. Están contenidas las normas: española (EHE, 2008), alemana (DBV, 2001), italiana (CNR-DT 204, 2006); así como también lo propuesto por el comité RILEM (RILEM TC 162-TDF, 2003).

Tabla 2. 4. Modelos de comportamiento propuestos por normativas europeas (Blanco et al, 2009).

Norma	Diagrama	Parámetros	Configuración de la Prueba
EHE		$\sigma_1 = f_{ctRd} = 0,33 f_{R,3,d}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20^0 /_{00} flex.; 10^0 /_{00} tens.]$	UNE EN14651 Prueba flexión 3 puntos 
DBV		$\sigma_1 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctd,II} \times \alpha_c^f \times \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = 10^0 /_{00}$	NBN B 15-238 Prueba flexión 4 puntos 
CNR-DT-204		$\sigma_1 = f_{Fm} = f_{eq2} / 3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20^0 /_{00} abland.; 10^0 /_{00} endur.]$	UNI 11039 Prueba flexión 4 puntos 
DBV		$\sigma_1 = f_{eq,ctd,I} = f_{eq,ctd,I} \times \alpha_c^f \times \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_2 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctd,II} \times \alpha_c^f \times \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = 10^0 /_{00}$	NBN B 15-238 Prueba flexión 4 puntos 
CNR-DT-204		$\sigma_1 = f_{Fm} = 0,45 f_{eq1}$ $\sigma_2 = f_{Fm} = k [f_{Fm} - (w_u / w_{i2}) (f_{Fm} - 0,5 f_{eq2} + 0,2 f_{eq1})]$ $k = [0,7 tension\_pura; casos\_remanentes]$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = [20^0 /_{00} abland.; 10^0 /_{00} endur.]$	UNI 11039 Prueba flexión 4 puntos 
DBV		$\sigma_1 = f_{ctd}^f = \alpha_c^f \times f_{ct,fl} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_2 = f_{eq,ctd,I} = f_{eq,ctd,I} \times \alpha_c^f \times \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_3 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctd,II} \times \alpha_c^f \times \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}$ $\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0,1^0 /_{00}$ $\epsilon_3 = \epsilon_u = 10^0 /_{00}$	NBN B 15-238 Prueba flexión 4 puntos 
RILEM		$\sigma_1 = 0,7 f_{cm,fl} (1,6 - d)$ $\sigma_2 = 0,45 \times k_h \times f_{R,1}$ $\sigma_3 = 0,37 \times k_h \times f_{R,4}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}$ $\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0,1^0 /_{00}$ $\epsilon_3 = \epsilon_u = 2,5^0 /_{00}$	RILEM Prueba flexión 3 puntos 
EHE		$\sigma_1 = f_{ct,d} = 0,6 f_{ct,fl,d}$ $\sigma_2 = f_{ctR1,d} = 0,45 f_{R,3,d}$ $\sigma_3 = f_{ctR3,d} = k_1 (0,5 f_{R,3,d} - 0,2 f_{R,1,d})$ $\epsilon_2 = 0,1 + 1000 \times f_{ct,d} / E_{c,0}$ $\epsilon_3 = 2,5 / l_{cs} (l_{cs} : longitud\_crítica)$ $\epsilon_u = [20^0 /_{00} flex.; 10^0 /_{00} tens.]$	UNE EN14651 Prueba flexión 3 puntos 

Los códigos existentes se basan en diagramas continuos y simplificados, cuyos parámetros son definidos por medio de un análisis inverso; proponen tanto diagramas tensión-deformación como tensión-abertura de fisura.

### 2.3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE ELEMENTOS DE HRFA.

Diferentes autores han recurrido a los modelos anteriormente expuestos para la simulación numérica del comportamiento bajo tracción o flexo-tracción de elementos de HRFA. En los siguientes apartados se profundiza en estudios realizados a partir del año 1995 hasta la actualidad. La Tabla 2. 5 resume los autores, año de publicación y programa informático utilizado.

**Tabla 2. 5.** Simulación numérica del HRFA desde 1995 hasta 2010.

Autores	Año	Programa utilizado
Huang, V. Z.	1995	ANSYS
Padmarajaiah, S. K. & Ramaswamy, A.	2002	ANSYS 5.5
Zhu, E. C. et. al	2002	NAPS
Domingo, A.	2002	ABAQUS
Thomee, B. et. al	2006	ANSYS
Thomas, J. & Ramaswamy, A.	2006	ANSYS 5.5
Strack, M.	2008	ABAQUS
Dozio, D.	2008	DIANA 9.2
Cunha, V.M.C.F.	2009	FEMIX 4

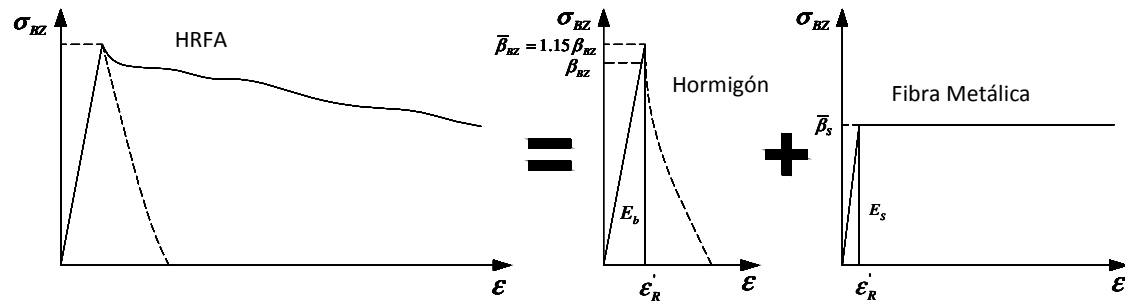
#### 2.3.1. MODELO DE HUANG, V. Z. (1995).

Para simular el comportamiento del HRFA se adiciona al comportamiento del hormigón sin refuerzo, el comportamiento a tracción de la fibra de acero equiparándolo a una armadura equivalente trabajando en las tres direcciones. Emplea ANSYS® en la simulación y utiliza el elemento finito SOLID 65 para simular placas cuadradas de 3000x3000x150mm apoyadas en toda su superficie y sometidas a una carga puntual en el centro. Como criterio de rotura utiliza Von Mises, tomando como límite elástico del hormigón su resistencia a compresión.

El modelo precisa definir los parámetros módulo de elasticidad ( $E_c$ ) y su coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Huang asume los valores por defecto para los coeficientes

de tensión de cizallamiento tanto para fisuras abiertas ( $\beta_t$ ) como cerradas ( $\beta_c$ ), y toma como módulo tangente la centésima parte del módulo de elasticidad.

La suma del efecto del hormigón a tracción y la de la armadura equivalente se idealiza en la Figura 2. 17).



**Figura 2. 17.** Descripción del comportamiento del HRFA (Huang, V.Z., 1995).

Utiliza como parámetros:

$\sigma_{BZ}$  = Resistencia a tracción.

$\epsilon$  = Deformación unitaria.

$\epsilon'_R$  = Deformación del hormigón a primera fisura. Se asume  $\epsilon'_R = 0,1\%$ .

$\overline{\beta}_{BZ}$  = Resistencia a tracción del hormigón incrementado en un 15%.

$\beta_{BZ}$  = Resistencia a tracción del hormigón.

$\overline{\beta}_s$  = Límite elástico equivalente de la fibra metálica en tracción.

$E_b$  = Módulo de elasticidad del hormigón.

$E_s$  = Módulo de elasticidad de la fibra metálica.

El HRFA se simula teniendo en cuenta la resistencia a tracción del hormigón a primera fisura ( $\beta_{BZ}$ ) (calculada a través del ensayo a flexo-tracción y considerando un diagrama triangular de tensiones). La capacidad de disipación de energía ( $D^F_{BZ}$ ) aportada por las fibras de acero después de la primera fisura se incluye considerando la resistencia residual equivalente ( $Eq\beta_{BZ}$ ) (Figura 2. 18).

Para su cálculo se utiliza la carga media soportada en el ensayo de flexo-tracción tras fisuración ( $Feq$ ) y se considera una distribución triangular de tensiones en la sección de rotura.

$$Feq = \frac{D^F_{BZ}}{L/200} \quad (2. 16)$$



$$Equ\beta_{BZ} = \frac{6ML}{bd^2} \tag{2.17}$$

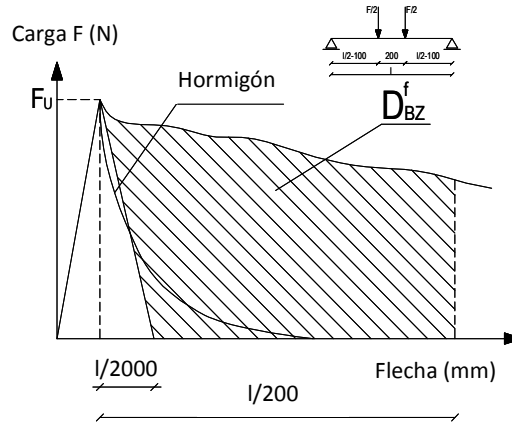


Figura 2. 18. Diagrama para la determinación de  $Equ\beta_{BZ}$  y  $D_{BZ}^f$  (Huang, V.Z., 1995).

El comportamiento posterior a la fisuración se evalúa como se indica en la Figura 2. 19. La resistencia residual del HRFA ( $\beta_{z,f}$ ) es calculada en función de la resistencia equivalente ( $Equ\beta_{BZ}$ ), igualando  $M^I$  (Momento aplicado) y  $M^{II}$  (Momento interno posterior a la fisuración), considerando una distribución de tensiones como la indicada en la Figura 2. 19.

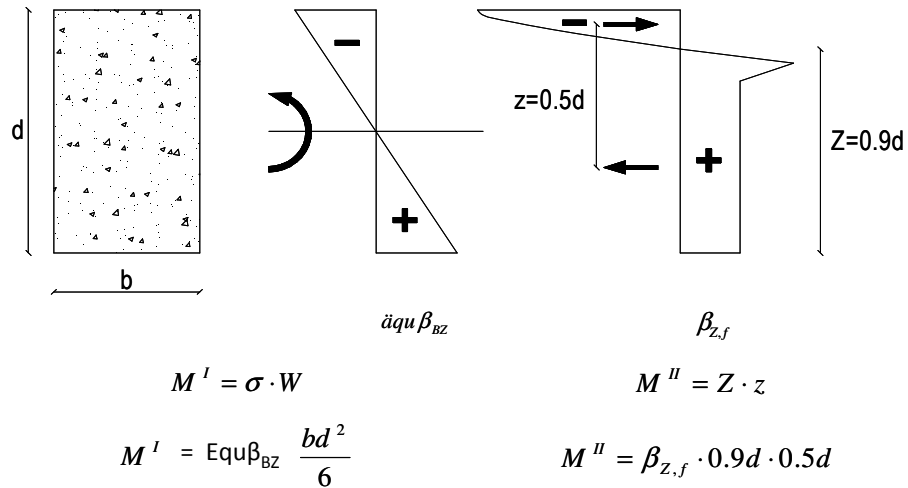


Figura 2. 19. Determinación de la resistencia del hormigón después de fisurar (Huang, V.Z., 1995).

Con lo que:

$$\beta_{z,f} = 0.37 \times Equ\beta_{BZ} \tag{2.18}$$

Adicionalmente, propone una fórmula empírica, en el caso de no tener ensayo experimental disponible, para calcular la resistencia residual ( $\beta_{Z,f}$ ) en función del tipo de fibras ( $k$ ), el volumen de fibras ( $V_f$ ) y la resistencia característica del hormigón a compresión ( $\beta_{WN}$ ).

$$\beta_{Z,f} = k \cdot V_f \cdot (1 - k \cdot V_f) \cdot \beta_{WN}^{2/3} \quad (2.19)$$

$$k = 0,3l/d, \text{ siendo } l/d \text{ la esbeltez de la fibra.} \quad (2.20)$$

Para la simulación numérica, la incorporación de las fibras la realiza considerando una armadura equivalente ( $\bar{\rho}_s$ ), que se determina por medio del diagrama de la Figura 2. 20; y se obtiene igualando la fuerza equivalente del hormigón  $Z_F$  y la fuerza equivalente aportada por las fibras  $Z_S$ .

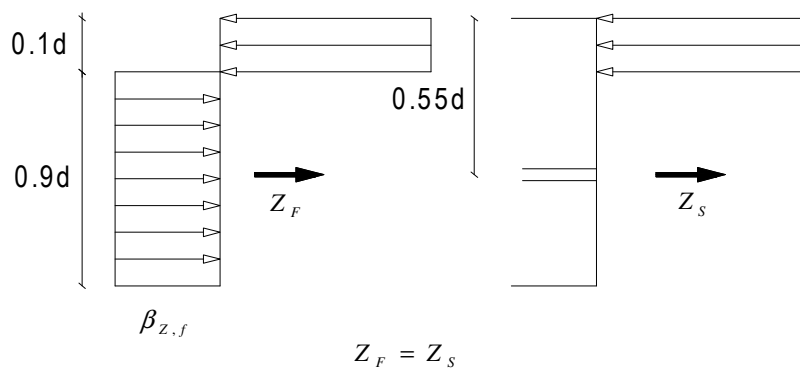


Figura 2. 20. Determinación de la armadura equivalente (Huang, V.Z., 1995).

$$\begin{aligned} Z_F &= Z_S \\ \beta_{Z,f} \cdot 0.9db &= \bar{A}_s \cdot \bar{\beta}_s \end{aligned} \quad (2.21)$$

como:

$$\bar{\rho}_s = \frac{\bar{A}_s}{0.9 \cdot db} \quad (2.22)$$

Se tiene:

$$\bar{\rho}_s = \frac{\beta_{Z,f}}{\beta_s} = \frac{0.37 \cdot Equ \beta_{BZ}}{\beta_s} \quad (2.23)$$

La cantidad de armadura equivalente ( $\overline{\rho_s}$ ) está en función de la resistencia residual ( $\beta_{z,f}$ ) y del límite elástico de la fibra ( $\overline{\beta_s}$ ), y es distribuida en las tres direcciones ortogonales. Como criterio de rotura de la armadura equivalente se utiliza también Von Mises.

### 2.3.2. MODELO DE PADMARAJIAH, S.K. & RAMASWAMY, A. (2002).

Estudian el comportamiento a flexión de vigas de hormigón de alta resistencia parcial y totalmente pre-tensadas con diferentes contenidos de fibras de acero (0, 0,5, 1, 1,5%), con el fin de optimizar la utilización de fibras de acero y presentar modelos que incluyan el efecto de las fibras sobre el hormigón, la adherencia de las fibras y los efectos de puente entre fisuras.

El comportamiento es descompuesto en dos etapas: primero, un estado de tensión multi-axial en el hormigón debido a la presencia de las fibras, que se simula usando los parámetros que describen la superficie de fractura del hormigón; y segundo, las fibras a lo largo de la longitud de la viga que se modelan como elementos que resisten las fisuras por medio de una acción de puente.

La superficie de fractura que emplean es la propuesta por William y Warnke (1975), definida por cinco parámetros: resistencia a tracción uni-axial ( $f_t$ ), resistencia última a compresión uni-axial ( $f_c$ ), resistencia a compresión bi-axial ( $f_{cb}$ ), resistencia bi-axial a compresión en un ambiente de estado de tensión hidrostático ( $f_1$ ) y resistencia uni-axial a compresión en un ambiente de estado de tensión hidrostático ( $f_2$ ).

**Tabla 2. 6.** Elementos de la librería del ANSYS® 5.5 utilizados por Padmarajaiah y Ramaswamy, (2002).

Elemento	Tipo de elemento	Representa
SOLID 65	Tri-dimensional	Hormigón sin refuerzo
LINK 8	Uni-dimensional	Fibras
COMBIN14	Muelle lineal	Adherencia y tensión remanente en la interfase hormigón-fibras

La simulación numérica la realizan en el programa ANSYS® 5.5 por medio de elementos finitos, y utilizan los elementos de la librería descritos en la Tabla 2. 6 e ilustrados en la Figura 2. 21. El modelo considera la adherencia y la tensión remanente del hormigón con fibras usando un resorte (Figura 2. 22). Emplean la ecuación propuesta por Parviz y Lee (1990) para incorporar las fibras. Las fibras son ubicadas a lo largo del eje longitudinal de la viga. Para definir las propiedades no lineales de la fibra emplean la opción *Rate Independent No Lineal*. Los coeficientes de tensión de

cizallamiento para fisuras abiertas ( $\beta_t$ ) y fisuras cerradas ( $\beta_c$ ), necesarios en la definición del elemento finito en ANSYS® 5.5, fueron asumidos entre 0,1-0,5, y 0,7-0,9, respectivamente. Los parámetros del modelo fcb, f1, f2,  $\beta_t$  son evaluados por medio de tanteos y comparación con resultados experimentales.

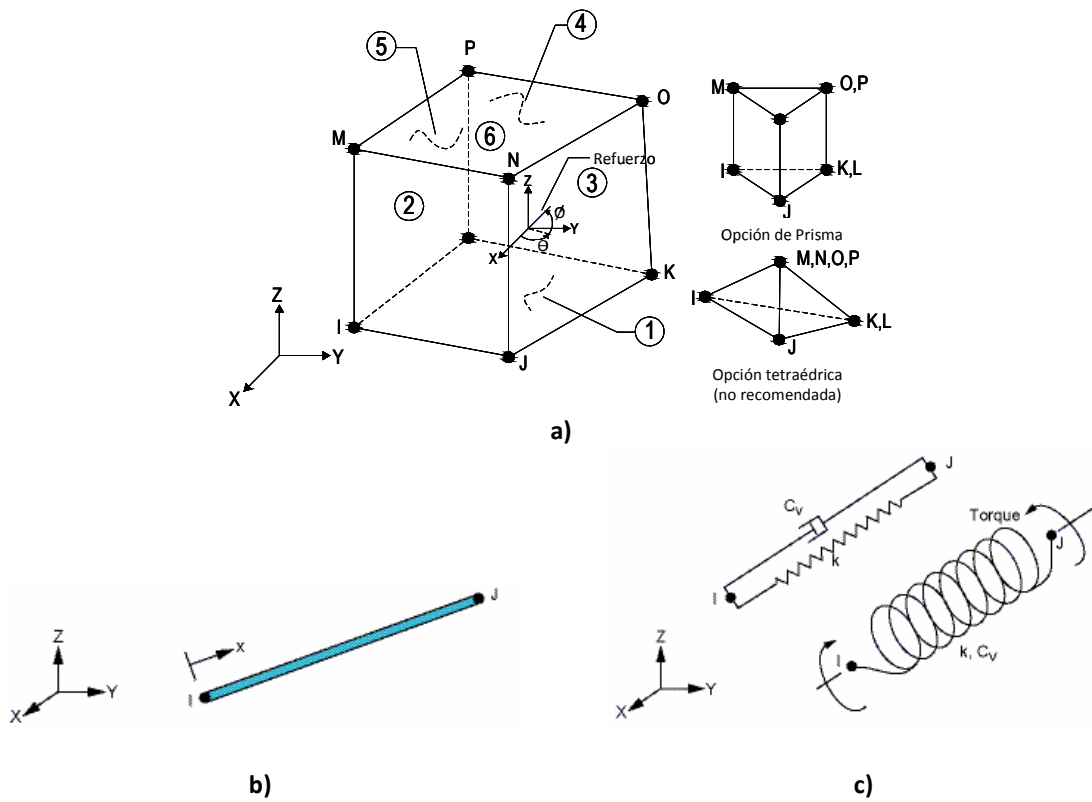


Figura 2. 21. Elemento de la librería del ANSYS® 5.5: a) SOLID65, b) LINK8, y c) COMBIN14.

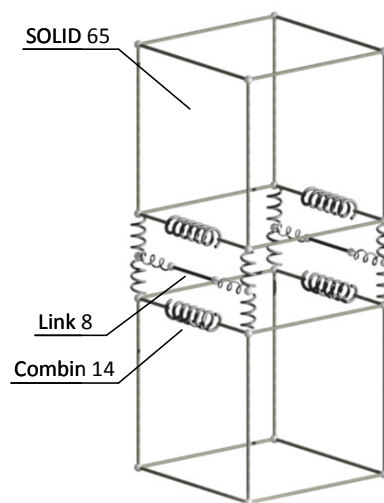


Figura 2. 22. Representación de un elemento de hormigón pre-tensado reforzado con fibras de acero (Adaptado de Padmarajaiah y Ramaswamy, 2002).

Finalmente, comparan las curvas carga-flecha numéricas y experimentales. Los resultados numéricos presentan un poco más de rigidez antes de alcanzar la carga pico y presentan flecha menores a las experimentales. Evidencian que la adición de fibras, aumenta la resistencia última, reduce la fisuración y deformación, detienen la propagación de las fisuras e incrementan la ductilidad del elemento.

### 2.3.3. MODELO DE ZHU, E.C. ET AL, (2002).

Establecen un modelo constitutivo para HRFA con el cual es posible analizar estructuras laminares de HRFA empleando el análisis no lineal de elementos finitos y desarrollan un programa computacional que tiene en cuenta tanto la geometría como la no linealidad del material NAPS (*Non-linear Analysis Program for Shells*). Con el programa, analizan algunos hormigones y láminas de HRFA y prueban una lámina cilíndrica de HRFA para hacer una validación más acertada de la modelización. De lo anterior, obtienen buenas correlaciones entre los resultados numéricos y experimentales.

Las láminas cilíndricas ensayadas son de 3000x1000x15mm, con áridos inferiores a 5mm, reforzadas con dos capas de mallas de acero de 1,2mm de diámetro y espaciadas 100mm, con un volumen de fibras de 1,5%,  $E_c = 246\text{Pa}$ ,  $f_c = 27,4\text{ MPa}$ ,  $f_y = 300\text{MPa}$ . La lámina se sujetó por sus dos lados rectos y fue cargada en ocho puntos.

Plantean modelos constitutivos elasto perfectamente plásticos y elasto-plásticos con endurecimiento para tratar la no linealidad del acero. El modelo constitutivo del HRFA para la compresión está basado en el del hormigón convencional/tradicional. La función de plasticidad de un modelo constitutivo de deformación endurecida para hormigón convencional puede ser expresado como:

$$f(I_1, J_2) = [\beta(3J_2) + \alpha I_1]^{1/2} - \sigma_o = 0 \quad (2. 24)$$

Donde:

- $I_1$  = Primera constante. Tensión de tracción.
- $J_2$  = Segunda constante. Derivada de la tensión de tracción.
- $\beta$  = 1,355 Parámetros del material.
- $\alpha$  = 0,355 Parámetros del material.
- $\sigma_o$  = 0,3fc Tensión inicial de plasticidad del hormigón.

Si  $\alpha = 0$  y  $\beta = 1$ . Esta ecuación se simplifica a la función de plasticidad de Von Mises para acero bajo en carbono. Como las fibras metálicas aumentan la plasticidad del hormigón, es razonable ajustar los valores de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  para que tomen en cuenta el efecto de las fibras. Los parámetros del HRFA son  $\alpha_f$  y  $\beta_f$ , sus valores se obtienen por la interpolación entre  $V_f = 0$  y  $V_f = 1$ .  $V_f = 0$  para hormigón convencional,

así  $\alpha_f = \alpha$  y  $\beta_f = \beta$ . Cuando  $V_f = 1$ , este es el caso para acero que satisface el criterio de plasticidad Von Mises, luego  $\alpha_f = 0$  y  $\beta_f = 1$ . Cuando  $V_f$  varíe entre 0 y 1 por interpolación, se tiene que:

$$\alpha_f = (1 - V_f)\alpha \quad (2.25)$$

$$\beta_f = (1 - V_f) + V_f \quad (2.26)$$

La función de plasticidad del HRFA es obtenida sustituyendo  $\alpha$  y  $\beta$  por  $\alpha_f$  y  $\beta_f$ ,  $\sigma_0$  se mantendrá sin cambios si las fibras no realzan la resistencia a compresión.

El criterio de fractura a compresión está definido a partir del hormigón convencional, el cual, colapsará cuando su deformación equivalente alcanza su valor de deformación última. El criterio de fractura es expresado como:

$$\alpha \cdot I_1' + \beta \cdot (3 \cdot J_2') = \epsilon_u^2 \quad (2.27)$$

Donde:

$$\epsilon_u = 0,0033 - 0,004$$

$I_1'$  = Primer constante de deformación en tensión.

$J_2'$  = Segunda constante de deformación en tensión.

Puesto que las fibras aumentan la ductilidad del hormigón, es necesario determinar el valor de la deformación última del HRFA,  $\epsilon_{uf}$ . Según Gao (1989) la ecuación empírica para  $\epsilon_{uf}$  está dada por:

$$\epsilon_{uf} = \epsilon_u + 0,002 \cdot V_f \cdot \frac{l}{d} \quad (2.28)$$

Donde  $\frac{l}{d}$  es la esbeltez de la fibra.

Finalmente, el criterio de fractura a compresión del HRFA se obtiene sustituyendo  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\epsilon_u$  por  $\alpha_f$ ,  $\beta_f$ , y  $\epsilon_{uf}$  en la ecuación (2.26).

Una vez transcurrida la fisuración inicial, tensiones de tracción previamente asumidas por el hormigón son transferidas a las fibras metálicas que cosen las fisuras, y las tensiones en las fibras pueden aumentar hasta que se deslicen del hormigón.

Se asume que las fibras metálicas con un volumen cúbico  $V_f$  son uniformemente distribuidas en un cubo de hormigón. El área de la superficie  $\rho_f$  del cubo de las fibras metálicas es:

$$\rho_f = V_f^{2/3} \quad (2.29)$$

Donde  $\rho_f$  puede ser referido como la relación del área de las fibras metálicas. Si el área del hormigón fisurado es  $A_{cr}$ , la rigidez de tracción de las fibras metálicas dentro del área fisurada es:

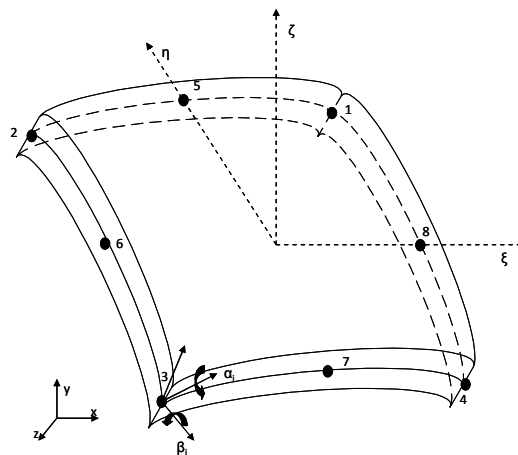
$$E_f \cdot \rho_f \cdot A_{cr} = E_{cf} \cdot A_{cr} \quad (2.30)$$

Además:

$$E_{cf} = E_f \cdot \rho_f = E_f \cdot V_f^{2/3} \quad (2.31)$$

$E_{cf}$  es tomada como un parámetro de rigidez equivalente del HRFA fisurado, y es usado para calcular la matriz de rigidez de un elemento fisurado.

Para la simulación emplearon dos elementos: uno, tipo lámina (shell) de ocho nodos, cuadrilátero iso-paramétrico, y otro elemento de tres nodos iso-paramétrico, para simular las estructuras laminares, Figura 2. 23.



**Figura 2. 23.** Cuadrilátero iso-paramétrico de ocho nodos para la simulación de láminas delgadas (Zhu et al, 2002).

Para lograr el equilibrio de las iteraciones, emplearon el método de *longitud de arco* (*arc-length method*), en el que incrementos de carga y desplazamientos son buscados simultáneamente.

En términos generales obtienen una buena correlación entre los datos numéricos y los experimentales. A pesar de que la carga de pandeo numérica es superior a la experimental (diferencia atribuida a las imperfecciones geométricas y del material de las láminas y a la simplificación del modelo), y a las discrepancias en la última fase de las curvas carga-flecha.

#### 2.3.4. MODELO DE DOMINGO, A. (2002).

Propone un modelo de comportamiento para el HRFA basado en la obtención de resistencia máxima a tracción ( $\sigma_t$ ) y la resistencia residual ( $\sigma_f$ ) de forma indirecta mediante el ensayo de flexo-tracción (ASTM C 1018-89), simplificando el proceso de obtención de las características mecánicas. Lo implementa en un programa comercial de cálculo de estructuras por el método de elementos finitos, ABAQUS®.

Asimismo, lleva a cabo una serie de ensayos experimentales sobre placas de HRFA con tres contenidos de fibras 50 Kg/m<sup>3</sup>, 70 Kg/m<sup>3</sup> y 90Kg/m<sup>3</sup>. Las placas son sometidas a tres sistemas de solicitaciones: flexión en una dirección, flexión igual en dos direcciones perpendiculares y flexiones desiguales en dos direcciones perpendiculares. Además, fabrica probetas prismáticas para la caracterización del material.

A partir de los ensayos experimentales obtiene los parámetros necesarios del modelo de comportamiento propuesto. En el programa de cálculo introduce las características mecánicas del HRFA, las geométricas, contorno y la solicitación de las placas. Adicionalmente, realiza un estudio de sensibilidad sobre los parámetros significativos del modelo (resistencia máxima a tracción  $\sigma_t$  y  $\sigma_f$  resistencia residual) para conocer la influencia de su posible variabilidad.

El modelo de comportamiento del HRFA a tracción propuesto (Figura 2. 24) y los parámetros fundamentales que lo caracterizan se presenta a continuación.



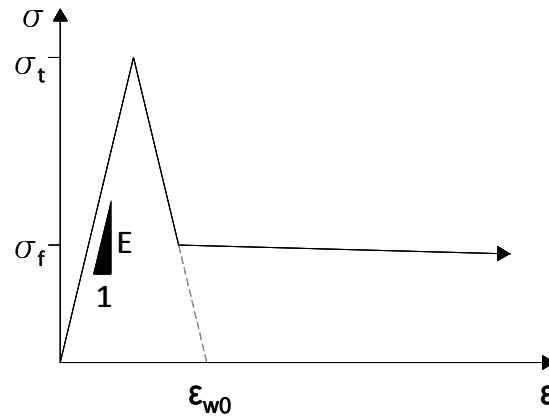


Figura 2. 24. Modelo propuesto por A. Domingo, 2002 para el HRFA en tracción.

Los parámetros resistencia máxima a tracción antes de la fisuración ( $\sigma_t$ ), módulo de elasticidad del HRFA ( $E$ ), resistencia residual ( $\sigma_f$ ) y deformación unitaria ( $\epsilon_{w0}$ ), están definidos así:

La resistencia a tracción antes de la fisuración ( $\sigma_t$ ) se define a partir de la prueba de flexo-tracción, Figura 2. 25.

$$\sigma_t = 0.6 \cdot \sigma_{ct} \quad (2. 32)$$

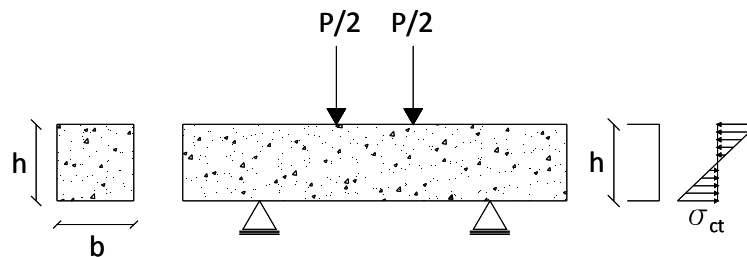


Figura 2. 25. Comportamiento de la sección central de la probeta instantes antes de la fisuración.

Donde  $\sigma_{ct}$  es la tensión desarrollada por las fibras en el borde más traccionado. Tras la fisuración, la hipótesis consiste en que el bloque de compresiones se puede reducir prácticamente a que sólo las fibras superiores están comprimidas y el resto de la sección tiene una tracción uniforme rectangular, Figura 2. 26. Así, la resistencia residual ( $\sigma_f$ ) queda definida como:

$$\sigma_f = \frac{PL}{3 \cdot b \cdot h^2} \quad (2. 33)$$

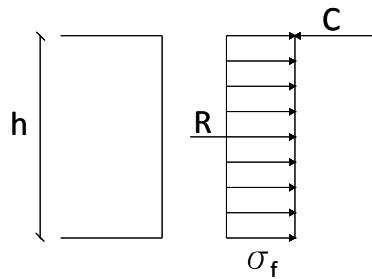


Figura 2. 26. Distribución de tensiones de la sección tras la fisuración.

Considera una curva de respuesta a flexo-tracción simplificada, asumiendo un comportamiento rígido-plástico para analizar niveles altos de deformación.

$$\sigma_f = \frac{P_{eq} L}{3 \cdot b \cdot h^2} = 1/3 \cdot \sigma_{ct,eq,150} \tag{2. 34}$$

El parámetro  $\epsilon_{w0}$  corresponde a la abertura de fisura para un hormigón sin fibras (0,02mm) relacionada con la longitud característica, y el módulo de elasticidad (E) lo determina por medio de pruebas experimentales.

2.3.5. MODELO DE THOMEE, B. ET AL, (2006).

Propone un modelo constitutivo tri-dimensional para el HRFA. El modelo elasto-plástico constitutivo se basa en la teoría de la fluencia plástica (*flow plasticity*). Para modelar el comportamiento del HRFA en compresión y en tracción, la superficie de plasticidad (*yield surface*) está compuesta por dos superficies. En tracción la fractura se modela por medio del criterio suavizado de Rankine en combinación con una ley de ablandamiento isotrópica. En compresión se emplea el criterio de Drunker–Prager con endurecimiento isotrópico y ablandamiento. Para ambos casos la relación de ablandamiento se caracteriza basándose en la energía de fractura.

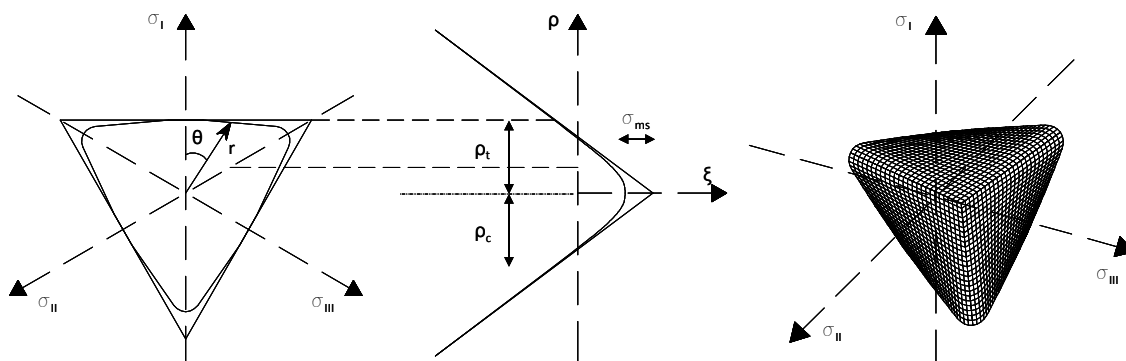
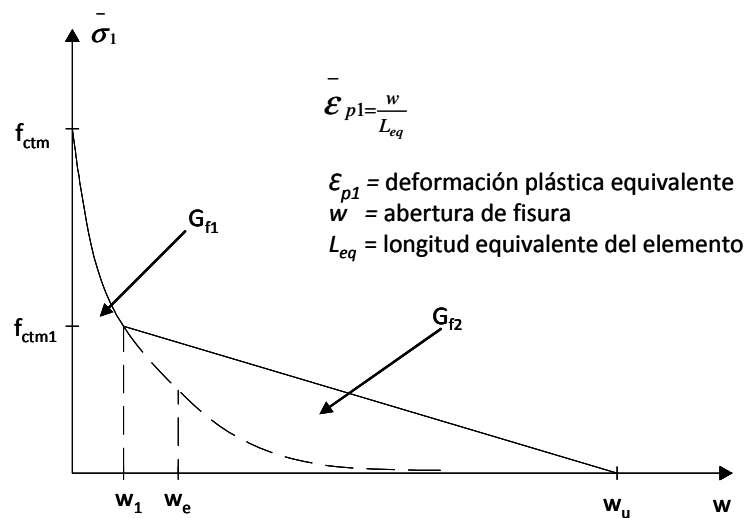


Figura 2. 27. Criterio suavizado de Rankine, sección de tensión diferencial, sección media y tensiones principales tridimensionales.

Por medio de las relaciones de endurecimiento y ablandamiento, el modelo constitutivo se adapta al comportamiento uni-axial del HRFA. Se asume un comportamiento elástico-lineal antes de alcanzar la resistencia a tracción  $f_{ctm}$ . Luego de alcanzar la carga pico, se presentan una disminución repentina de tensiones seguido por un meseta post-fisuración debido al continuo arrancamiento de las fibras. Los parámetros que definen la primera parte del comportamiento son la resistencia a tracción  $f_{ctm}$  y la energía de fractura  $G_{f1}$ . La segunda parte está influenciada por las fibras y depende de la resistencia post fisuración  $f_{ctm1}$  y la energía de fractura de las fibras  $G_{f2}$ .



**Figura 2. 28.** Dos partes que componen la relación tensión-abertura de fisura para HRFA (Hofstetter y Mang, 1995).

Thomee (2006) realiza la simulación de tres ensayos en el ANSYS: ensayo brasileño de tracción indirecta, pruebas de tracción indirecta en dovelas de túneles y análisis no lineal de revestimiento de túneles, obteniendo buenos resultados. Adicionalmente, simula el ensayo de *tracción modificado* (MTT) desarrollado por Blümel (2000).

Obtiene los parámetros de la relación esfuerzo-abertura de fisura a través del análisis inverso, empleando la prueba de flexo-tracción de los cuatro puntos (DBV-Merkblatt, 2001).

Las curvas carga-deformación de las pruebas de tracción indirecta en dovelas de túneles evidencian una buena aproximación con los resultados experimentales. El análisis no lineal del revestimiento de túneles implica la posibilidad de reducir los momentos de flexión y realizar diseños más económicos.

## 2.3.6. MODELO DE THOMAS, J. &amp; RAMASWAMY, A. (2006).

Realizan un análisis de elementos finitos a cortante de 11 vigas T con diferentes resistencias a compresión, parcialmente pre-tensadas, con fibras de acero distribuidas parcial y totalmente en su altura. Las dimensiones de las vigas son 375x350x3850mm.

Presenta similitudes con el modelo de Padmarajaiah y Ramaswamy (2002), ya que emplean el ANSYS® 5.5, utilizan los mismos elementos de la librería del programa para representar al hormigón y las fibras, pero difieren en el elemento finito que representa la adherencia entre las fibras y el hormigón, al emplear el COMBIN 39, un elemento tipo muelle no lineal. Así mismo, emplean la superficie de fractura propuesta por William y Warnke (1975) definida por los cinco parámetros. Para definir las propiedades de las fibras de acero emplean la opción de endurecimiento isotrópica multi-lineal (*MISO*) con el criterio Von Mises. El módulo de Young tomado es de 200GPa y la relación de Poisson es 0,3.

Las características dadas al elemento COMBIN39 (Figura 2. 29) se basan en las pruebas realizadas por Namur y Namman (1989). Los coeficientes de transferencia de tensión de cizallamiento para fisuras abiertas ( $\beta_t$ ) y cerradas ( $\beta_c$ ), necesarios en la definición del elemento finito, son asumidos de 0,35, 0,40 y 0,65 para el primero y de 0,75, 0,80 y 0,90 para el segundo. Teniendo en cuenta un volumen de fibras del 1,5% ( $V_f$ ) y una resistencia del hormigón normal de 35MPa, una moderada de 65MPa y una alta de 85MPa.

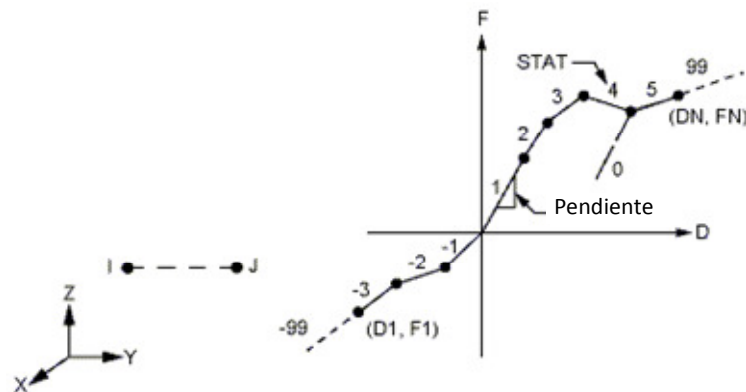
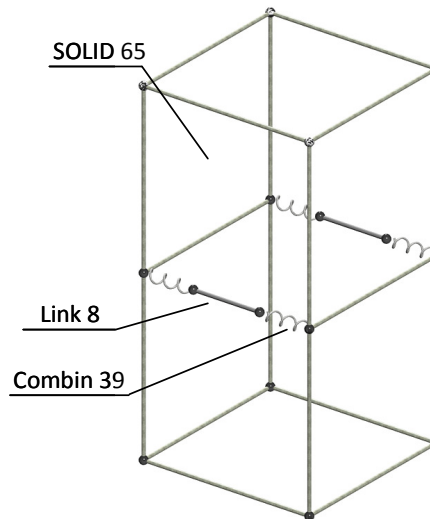


Figura 2. 29. Elemento *COMBIN39*.



**Figura 2. 30.** Detalle del modelo de elementos finitos (MEF).

El modelo tiene en cuenta las no-linealidades como: el deslizamiento de las armaduras longitudinales, el endurecimiento a tracción del hormigón después de la fractura, la transferencia de tensiones a través del hormigón fisurado y el efecto de la carga transmitida debida a la acción de puente de las fibras de acero.

Para calcular el área del elemento se empleó el concepto del área aferente y la siguiente ecuación:

$$A_f = \alpha' V_f A_{ct} \quad (2. 35)$$

Donde:

$\alpha'$  = Factor de orientación, asumido 0.64.

$V_f$  = Fracción del volumen de fibras.

$A_{ct}$  = Área aferente de hormigón, sobre la cual la fibra es representada como un refuerzo discreto.

Al comparar las curvas carga-flecha numéricas con las experimentales, observaron gran coincidencia ya que el modelo permite predecir la carga a primera fisura, las regiones críticas de fisura, y las cargas y flechas para varios tipos de fractura a cortante en vigas de este tipo. Sin embargo, los resultados numéricos alcanzaron niveles de flecha inferiores a los experimentales, debido al modelo de adherencia empleado.

2.3.7. MODELO DE STRACK, M. (2008).

Emplea el criterio de análisis tracción-abertura de fisura basado en el modelo de la fisuración ficticia de Hillerborg (1980), y desarrolla un nuevo modelo de comportamiento para el HRFA (Figura 2. 31). Dicho modelo es definido por la energía de fractura del hormigón y por el efecto de las fibras. Éste último, se define teniendo en cuenta la transmisión de carga de las fibras a través de dos caras de hormigón fisurado que depende del comportamiento de arrancamiento de una fibra.

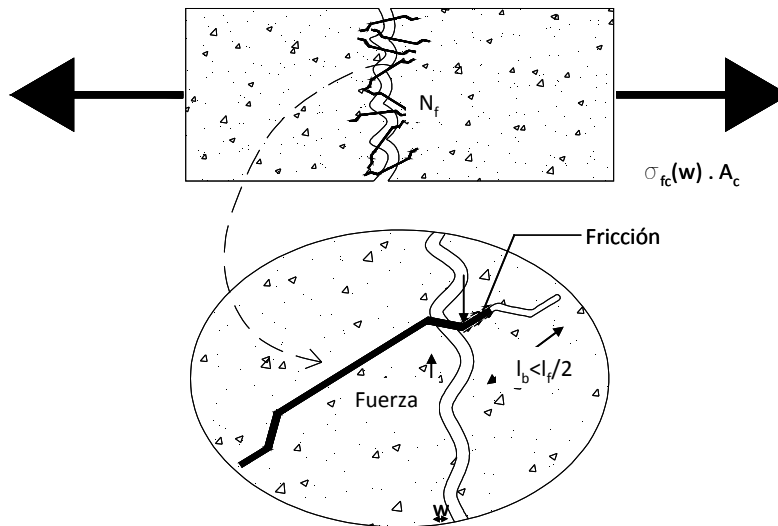


Figura 2. 31. Principio de transferencia de carga discreta entre superficies de fractura y las fibras metálicas (Strack, 2008).

Donde:

- $\sigma_{fc}(w)$  = Tensión total del HRFA.
- $A_c$  = Área de la sección transversal de una probeta de HRFA.
- $l_b$  = Longitud de adherencia.
- $l_f$  = Longitud de la fibra.

Con el inicio de la micro-fisuración en el HRFA, las fuerzas pueden ser transmitidas por el engranaje (trabazón) de los áridos y por las fibras metálicas. Para la definición de la curva tracción-abertura de fisura ( $\sigma$ - $W$ ) es necesario determinar el área bajo la curva, que es equivalente a la energía de fractura  $G_f$  (que depende del diámetro máximo del árido empleado) y a las tensiones transferidas entre la matriz de hormigón y la fibra (debidas a la adherencia, fricción, forma y orientación de las fibras).

$$\sigma_{fc}(w) = \sigma_{ct}(w) + \sigma_f(w) = f_{ct} \cdot e^{-w f_{ct} / G_f} + K_I \cdot f_{ct} \cdot K_{II} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot w}{l_f}\right)^2 \quad (2.36)$$

Donde:

$\sigma_{ct}(w)$  = Tensión de tracción del hormigón.

$f_{ct}$  = Resistencia a tracción del hormigón.

$G_f$  = Energía de fractura.

$W$  = Ancho de fisura.

$\sigma_f(w)$  = Tensión entre las fibras y el hormigón.

$K_I$  y  $K_{II}$  = Factores de eficiencia.

Para estudiar la influencia de las fibras en la capacidad de carga de vigas de HRFA sujetas a flexión (RILEM TC 162-TDF) emplea el programa de elementos finitos ABAQUS®. En el programa se introducen las propiedades del material descritas anteriormente. Realiza un estudio de los parámetros variando la geometría del elemento y las propiedades del material. Debido a que en las pruebas Strack observó que las caras planas no permanecen planas (hipótesis de Bernoulli), establece una región de discontinuidad ( $s=2h$ ) y considera una distribución lineal de tensiones fuera de esta región.

Las deformaciones de la cara superior e inferior de la viga son promediadas a lo largo de la zona de discontinuidad  $s$ . La deformación promedio para la zona en tracción  $\epsilon_{t,\phi}$ , está compuesta por la deformación elástica del hormigón sin daños  $\epsilon_{el,\phi}$  y la abertura de fisura  $w_{COD}$  y se expresa así:

$$\epsilon_{t,\phi} = \epsilon_{el,\phi} + \epsilon_{w,\phi} = \frac{1}{2h} * \left( \int_{-h}^h \epsilon_{t,cara}(u) du + w_{COD} \right) \quad (2.37)$$

$$\epsilon_{t,\phi} \approx \frac{w_{COD}}{2h}$$

Donde:

$\epsilon_{t,\phi}$  = Deformación promedio en la zona de tracción.

$\epsilon_{el,\phi}$  = Deformación elástica del hormigón.

$\epsilon_{w,\phi}$  = Deformación del hormigón fisurado.

$h$  = Altura de la probeta.

$\epsilon_{t,cara}$  = Deformación en la cara de tracción.

$w_{COD}$  = Abertura de fisura.

Para la deformación promedio en la zona a compresión  $\epsilon_{c,\phi}$ , es necesario tener en cuenta los aumentos de la deformación en la zona de discontinuidad  $s$ , dando la siguiente formulación:

$$\epsilon_{c,\phi} = -\frac{1}{2h} \int_{-h}^h |\epsilon_{c,cara}(u)| du \tag{2.38}$$

Donde:

$\epsilon_{c,\phi}$  = Deformación promedio en la zona a compresión.

$\epsilon_{c,cara}$  = Deformación en la cara de compresión.

La zona de discontinuidad  $s$  es modelada como una rótula plástica. La deformación de un elemento HRFA sujeto a cargas de flexo-tracción está compuesta por dos partes. La primera, una deformación elástica que puede ser determinada por medio de las leyes clásicas de la mecánica de vigas, y la segunda, una deformación plástica localizada en la zona de discontinuidad. La Figura 2. 32 muestra el modelo de la rótula plástica para la región de discontinuidad.

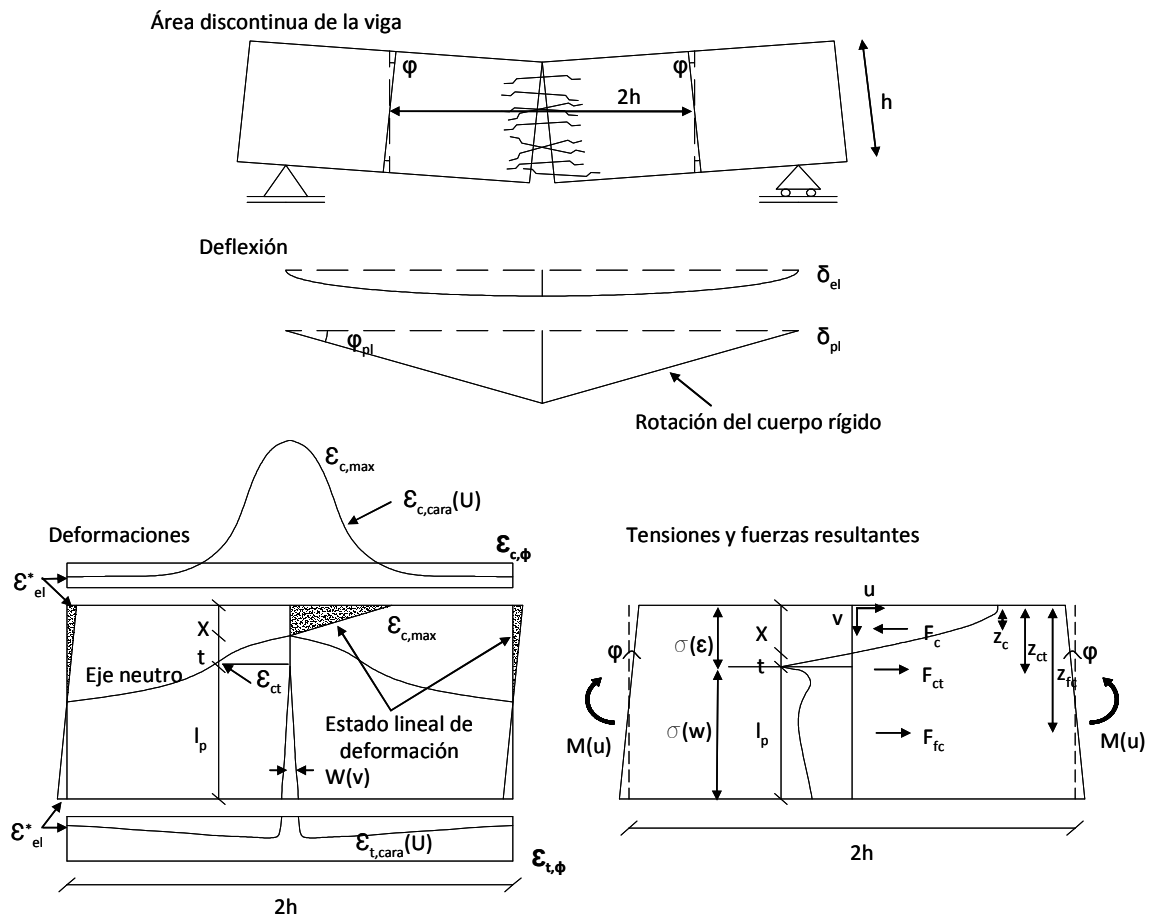


Figura 2. 32. Modelo de la rótula plástica (Strack, 2008).

Para la determinación de la capacidad de rotación de la rótula plástica  $\Theta$  se lleva a cabo la siguiente formulación:



$$\theta = 2 \cdot \varphi = (\varepsilon_{t,\phi} + |\varepsilon_{c,\phi}|) \cdot \frac{s/h}{h} = 2 \cdot (\varepsilon_{t,\phi} + |\varepsilon_{c,\phi}|) \quad (2.39)$$

La capacidad de rotación plástica  $\Theta_{pl}$ , se define sustrayendo la parte elástica  $\Theta_{el}$ . De este modo se tiene:

$$\theta_{pl} = \theta - \theta_{el} = 2 \cdot \varphi_{pl} = 2 \cdot (\varepsilon_{t,\phi} + |\varepsilon_{c,\phi}| - 2 \cdot |\varepsilon_{el,\phi}|) \quad (2.40)$$

Así, la flecha de la viga  $\delta$  es la superposición de la flecha elástica  $\delta_{el}$  y la flecha plástica  $\delta_{pl}$  que es determinada de la rotación de los dos cuerpos rígidos.

$$\delta = \delta_{el} + \delta_{pl} = \delta_{el} + (l \cdot \theta_{pl}) / 4 \quad (2.41)$$

La sección transversal se divide en tres zonas: la zona de compresión  $x$ , una zona en tracción no fisurada  $t$  y una zona en tracción fisurada  $l_p$ , definidas así:

$$x = h \cdot |\varepsilon_{c,\phi}| / (2 \cdot \varepsilon_{t,\phi}) \quad (2.42)$$

$$t = x \cdot \varepsilon_{ct} / |\varepsilon_{c,\max}| \quad (2.43)$$

$$l_p = h - (x + t) \quad (2.44)$$

Para la zona  $x$  y  $t$  se asume una distribución lineal de deformación. Para la zona  $l_p$ , se asume un crecimiento lineal de abertura de fisura  $w_{COD}$ . La distribución de tensiones en la sección transversal fisurada está relacionada con las deformaciones definidas de las propiedades del material. Las tensiones son determinadas por la deformación  $\varepsilon$  o por el ancho de fisura  $w$  ( $v$ ). Por medio de la integración se obtienen las tensiones sobre las áreas de cada zona ( $F_c$ ,  $F_{ct}$  y  $F_{fc}$ ) y los resultados parciales en términos de fuerza:

$$F_c = \int_0^{\varepsilon_{c,\max}} \sigma_c(\varepsilon) d\varepsilon \cdot \frac{x \cdot b}{\varepsilon_{c,\max}} \quad (2.45)$$

$$F_{ct} = \int_0^{\varepsilon_{ct}} \sigma_{ct}(\varepsilon) d\varepsilon \cdot \frac{t \cdot b}{\varepsilon_{ct}} \quad (2.46)$$

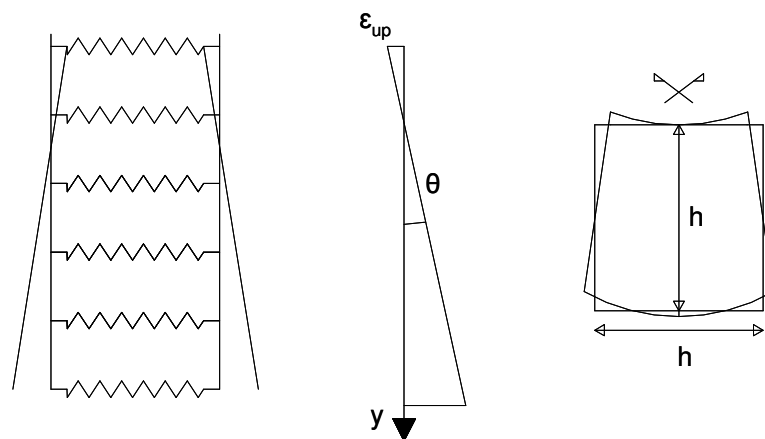
$$F_{fc} = \int_0^{w(v=h)} \sigma_{fc}(w) dw \cdot \frac{l_p \cdot b}{w(v=h)} \quad (2.47)$$

Finalmente, para generar las condiciones de equilibrio de la sección transversal se determinan los puntos de aplicación de las fuerzas. Así, la capacidad de carga en flexotracción se determina empleando las condiciones de equilibrio ( $\Sigma M=0$  y  $\Sigma F=0$ ).

Con el modelo propuesto, el autor obtiene resultados aceptables y sugiere su aplicabilidad en otras estructuras sujetas a flexión.

### 2.3.8. MODELO DE DOZIO, D. (2008).

Realiza una simulación numérica de vigas pretensas reforzadas de HRFA empleando el programa *Diana 9.2* y desarrolla un modelo denominado cinemático con el objetivo de predecir el comportamiento a flexión del HRFA, empleando la aproximación de las secciones planas (Hordijk, 1991) y el método de elementos finitos, Figura 2.33. El programa *Diana* asume un ancho de banda de fisura  $h$  por defecto, cuando no se le especifica este valor. Además, asume el valor de  $h$  variable a lo largo del ancho de la zona de fractura, siendo esto último una diferencia con respecto al modelo realizado por Kooiman (2000).



**Figura 2.33.** Aproximación de sección plana: explicación del modelo kinemático (Tomado de Dozio, 2008).

Para la compresión asume las leyes constitutivas del material de acuerdo a CEB MC90 (1990). La curva de compresión parabólica del *DIANA 9.2* está descrita por tres valores característicos (Figura 2.34).

$$\alpha_{c/3} = -\frac{1}{3} \frac{f_c}{E} \quad (2.48)$$

$$\alpha_c = -\frac{5}{3} \frac{f_c}{E} \quad (2.49)$$

$$\alpha_u = -\frac{3}{2} \frac{G_c}{hf_c} \quad (2.50)$$

Donde  $\alpha_{c/3}$  es la deformación correspondiente a un tercio de la resistencia máxima a compresión,  $\alpha_c$ , es la deformación cuando la resistencia a compresión máxima es alcanzada y finalmente  $\alpha_u$  es la deformación del material cuando está completamente relajado.

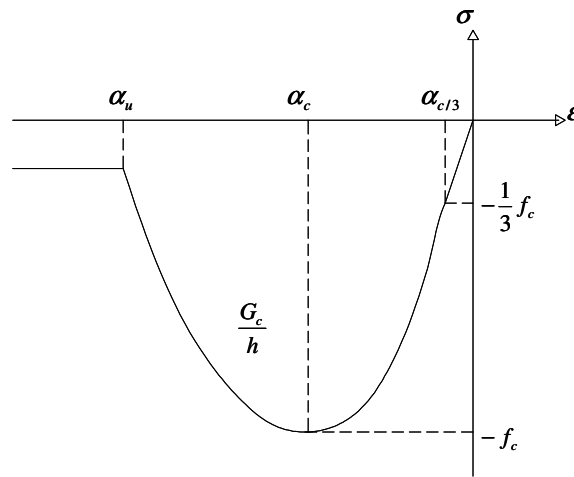


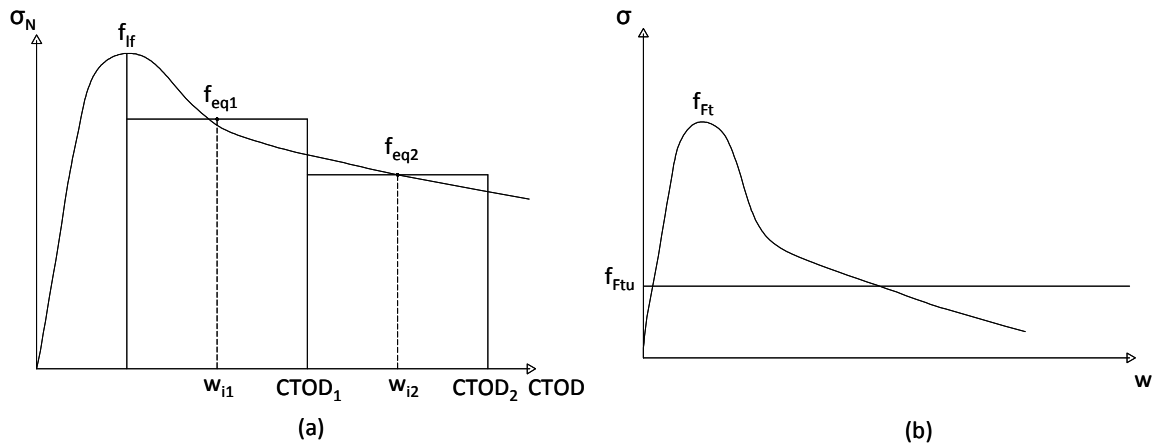
Figura 2. 34. Curva de Compresión Parabólica (Tomada de Dozio, 2008).

$$\sigma_c(\varepsilon) = \begin{cases} -f_c \frac{1}{3} \frac{\varepsilon}{\alpha_{c/3}} & \text{Si } \alpha_{c/3} \angle \varepsilon \leq 0 \\ -f_c \frac{1}{3} \left( 1 + 4 \left( \frac{\varepsilon - \alpha_{c/3}}{\alpha_c - \alpha_{c/3}} \right) - 2 \left( \frac{\varepsilon - \alpha_{c/3}}{\alpha_c - \alpha_{c/3}} \right)^2 \right) & \text{Si } \alpha_c \angle \varepsilon \leq \alpha_{c/3} \\ -f_c \left( 1 - \left( \frac{\varepsilon - \alpha_c}{\alpha_u - \alpha_c} \right)^2 \right) & \text{Si } \alpha_u \angle \varepsilon \leq \alpha_c \\ 0 & \text{Si } \alpha_u \angle \varepsilon \leq \alpha_c \end{cases} \quad (2.51)$$

Para la tracción tiene en cuenta las leyes constitutivas de comportamiento según el modelo rígido plástico y el modelo lineal propuesto por las normativas de diseño italianas (CNR-DT 204), además el modelo bi-lineal propuesto por Di Prisco et al, (2004) (Figura 2. 35).

El modelo rígido plástico esta caracterizado por el parámetro  $f_{Ftu}$  y definido por la siguiente ecuación para el estado limite último (ELU).

$$f_{Ftu} = \frac{f_{eq2}}{3} \tag{2.52}$$

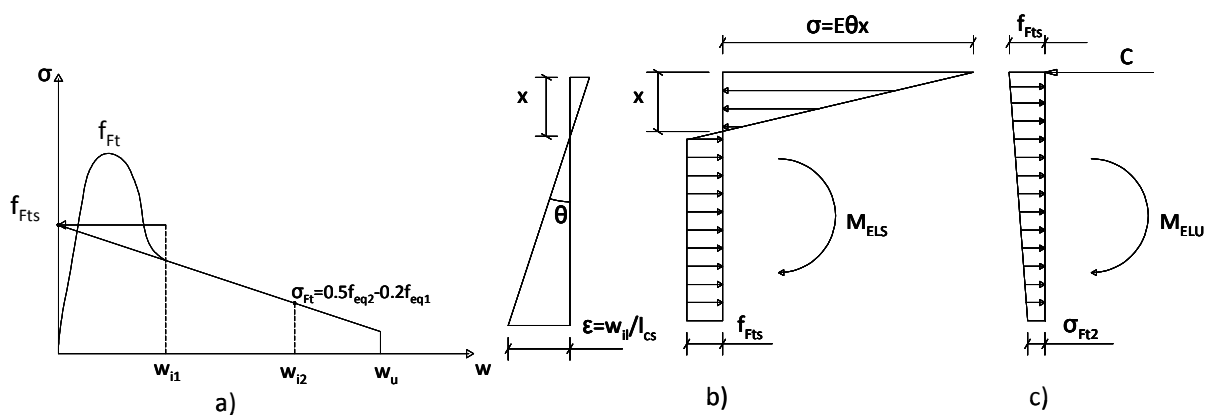


**Figura 2. 35.** Prueba de los cuatro puntos: a) curva tracción- apertura de fisura en la punta de la entalla (CTOD), b) modelo rígido plástico. (Tomado de Dozio, 2008).

El modelo lineal ignora la contribución de la matriz y considera únicamente la rama de ablandamiento debida al arrancamiento de las fibras. Considera dos parámetros, para estado limite de servicio (ELS)  $f_{Fts}$  y para estado limite último  $f_{Ftu}$  (ELU) (Figura 2. 36).

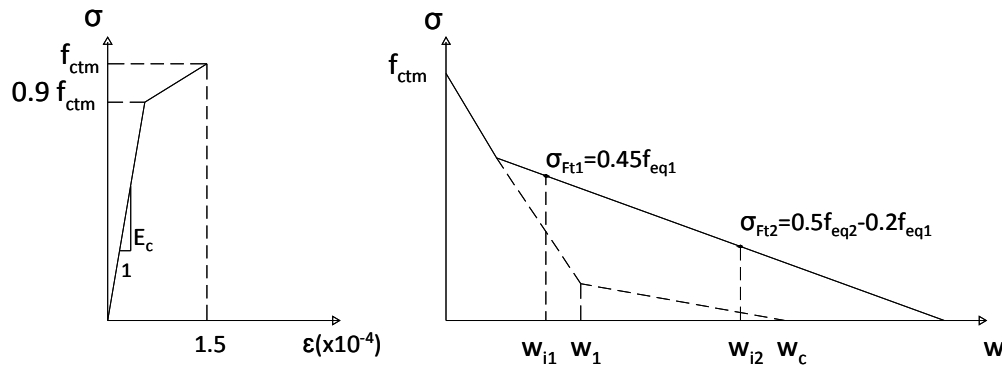
$$f_{Fts} = 0.45 \cdot f_{eq1} \tag{2.53}$$

$$f_{Ftu} = k \cdot \left[ f_{Fts} - \frac{w_u}{w_{i2}} \cdot (f_{Fts} - 0.5 \cdot f_{eq2} + 0.2 \cdot f_{eq1}) \right] \geq 0 \tag{2.54}$$



**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).

El modelo bi-lineal considera la contribución de la resistencia a tracción de la matriz de hormigón. El primer tramo se refiere al ablandamiento y es debido a la fisuración de la matriz y es tomado de igual manera que el propuesto por el código modelo (CEB-FIP, 1991) para hormigón convencional. El segundo tramo se refiere al arrancamiento de las fibras y se caracteriza por considerar tensiones medias en dos rangos de abertura de fisura diferentes (Figura 2. 37).

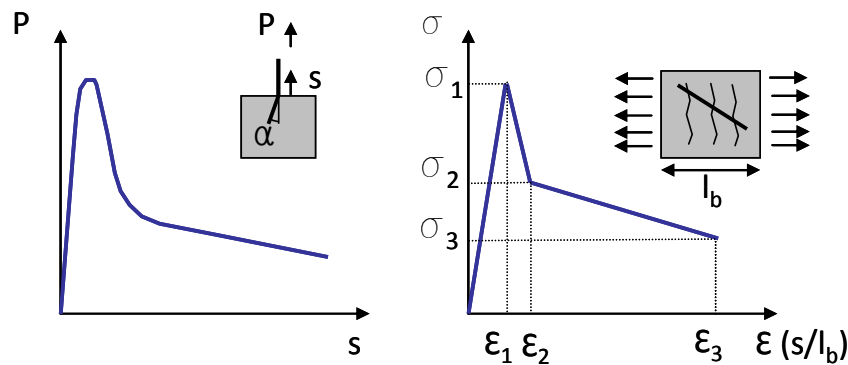


**Figura 2. 37.** Tercera ley constitutiva de tracción: modelo bi-lineal (bh/bs).  
(Tomado de Dozio, 2008).

### 2.3.9. MODELO DE CUNHA, V.M.C.F. (2009).

A partir de pruebas de arrancamiento de fibras (*pullout test*), define un modelo de comportamiento para el hormigón auto compactable reforzado con fibras de acero. Las pruebas de arrancamiento las realiza para diferentes ángulos de orientación de las fibras ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $60^\circ$ ), fibras con ganchos (extremos conformados) y con una longitud de anclaje de 15mm.

Cunha (2009) propone un diagrama tri-lineal tensión-deformación ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) a partir de la relación fuerza de arrancamiento-deslizamiento (P-s) (Figura 2. 38). Las tres relaciones de  $\sigma$  -  $\epsilon$ , corresponden a los ángulos de inclinación de las fibras  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $60^\circ$ . El procedimiento para obtener el diagrama se muestra en la Figura 2. 38.



**Figura 2. 38.** Diagrama tensión-deformación basado en la relación experimental fuerza de arrancamiento-deslizamiento.

Donde:

$\varepsilon$  = Deformación de la fibra.

$L_b$  = Ancho de fisura que cose la fibra.

$s$  = Deslizamiento de la fibra.

$\sigma$  = Es la tensión calculada por medio de la fuerza de arrancamiento  $P$ , dividida por el área de la sección transversal de la fibra  $A_f$ .

Además, realiza simulaciones numéricas en tres dimensiones de las pruebas de tracción directa y de flexo tracción con un programa propio denominado FEMIX 4. Para la matriz de hormigón sin refuerzo emplea el modelo de fisuración distribuida y la distribución aleatoria de las fibras la simula por medio de un algoritmo basado en el método de Monte Carlo. De este modo da una distribución real de las fibras dentro del elemento.

#### **2.4. RESUMEN CRÍTICO Y CUESTIONES SIN RESOLVER.**

En este capítulo se han recopilado las principales características del HRFA, su comportamiento a compresión, tracción, y flexión, y se han comparado los modelos de comportamiento tanto de autores como los propuestos por normativas y guías de diseño. Además, teniendo en cuenta el objetivo principal de la presente tesis doctoral, se han revisado los aportes de diferentes autores referentes a la simulación de este material.

Diversos autores resaltan las bondades del HRFA, destacando el aumento en la ductilidad, la menor propagación de la fisuración y la mejora en la respuesta ante cargas de impacto y explosión. Su comportamiento a compresión se ve poco afectado por la presencia de fibras; a diferencia de su comportamiento a tracción y especialmente a flexo-tracción donde el HRFA presenta sus mayores ventajas. Por este motivo, se emplea en pavimentos, estabilización de túneles, y en los últimos años en aplicaciones estructurales de elementos tipo láminas, forjados, muros y tuberías, etc.

En cuanto a los modelos de comportamiento propuestos para el HRFA, se evidencia el interés de conocer tanto las características como las propiedades del material. Sin embargo, la falta de unificación de los modelos revela la incertidumbre que aún se tiene de su comportamiento. Diferentes códigos europeos han propuesto ecuaciones constitutivas que caracterizan el comportamiento a tracción del HRFA, lo que ha aumentado su utilización como solución estructural.

Algunos autores han realizado estudios de cómo simular elementos de HRFA, empleando ya sea programas propios, comerciales o no comerciales; en su mayoría han estudiado elementos tipo viga, con un mismo tipo de hormigón y en dos dimensiones (bi-dimensionales). Lo que da soporte al punto de partida de la presente

tesis doctoral y evidencia la importancia de los objetivos planteados. A continuación, se destacan los pro y contra de cada uno de los autores considerados.

Entre los modelos propuestos por otros investigadores, el de Huang se caracteriza porque sólo emplea un tipo de elemento finito para representar el comportamiento del HRFA y con el que obtiene resultados numéricos aceptables. Mientras que, el modelo de Padmarajaiah y Ramaswamy (2002) precisa definir tres tipos de elementos finitos para representar el comportamiento del HRFA, lo que hace que el modelo sea muy robusto (es necesario un elemento finito para representar la acción de puente de las fibras y ocho elementos tipo muelle que representen la adherencia y el deslizamiento entre los dos elementos finitos que representan el hormigón), aunque presenta mejores ajustes. Thomas y Ramaswamy (2006) realizan una pequeña variación al modelo presentado por Padmarajaiah y Ramaswamy en 2002, pero continúan empleando tres elementos finitos para considerar el efecto de las fibras en el hormigón.

Zhu et al (2002), presenta un estudio en el que ensaya láminas cilíndricas y las simula en un programa propio, pero no comercial; ajusta por medio de interpolación los parámetros  $\alpha_f$  y  $\beta_f$  para aumentar la plasticidad del material y así tener en cuenta el efecto de las fibras; sin embargo, carece de un estudio de sensibilidad de los parámetros influyentes en su modelo. Por lo tanto, no hace posible considerar hormigones con fibras de otras características, al igual que los modelos propuestos por Cunha (2009) y Thomee (2006).

Por su parte, el modelo propuesto por Domingo (2002) evalúa placas con contenidos de fibras distintos y las prueba bajo diferentes sollicitaciones, realiza un análisis de sensibilidad a dos de los cuatro parámetros que definen su modelo de comportamiento de material. Sin embargo, a pesar de realizar ensayos de probetas sometidas a flexo tracción, no realiza su simulación, así que no prueba su modelo bajo elementos con estas características geométricas.

Strack (2008) simula probetas prismáticas sujetas a flexo tracción empleando el programa ABAQUS®, no considera otros tipos de elementos, pese a que realiza un estudio paramétrico donde interviene la influencia del canto y de la luz de la probeta, además de las propiedades mecánicas (resistencia a compresión y la resistencia a tracción). A pesar de plantear un modelo ingenioso y basado en un planteamiento novedoso, requiere definir muchos parámetros, cinco relacionados con las propiedades mecánicas y dos factores de eficiencia, que involucran de forma indirecta otros seis parámetros. Algo similar ocurre con los modelos de Dozio (2008) y Thomee (2006), que requieren la definición de muchos parámetros, haciendo esto poco práctico.

Tras la revisión de la literatura científica relativa a la simulación del HRFA, se observan algunas cuestiones que aún no se han estudiado a profundidad o sobre las que existen diversas posturas. Con la presente tesis doctoral se pretende reducir la

brecha de desconocimiento acerca del tema y proponer un modelo numérico que permita la simulación del HRFA.



**3**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL**



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

<b>3.1. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.</b>	<b>71</b>
<b>3.2. VARIABLES DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.</b>	<b>72</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 FLEJO-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 3.

# ESTUDIO EXPERIMENTAL

El desarrollo de la investigación está compuesto por dos apartados principales el estudio experimental y el estudio numérico (Figura 3. 1). El primero es abordado en el presente capítulo, y el segundo en el capítulo 4.



Figura 3. 1. Estructura del desarrollo de la investigación.

El estudio experimental consiste en toda la etapa realizada en el laboratorio del departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Este capítulo marca el inicio del tratamiento de datos, resultados y análisis. Está dividido en cinco apartados: justificación, variables, planificación, metodología y resultados de las pruebas mecánicas.

### 3.1. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.

Con el fin de validar la hipótesis propuesta, se plantea un estudio experimental que consiste en la elaboración y ensayo de cinco elementos, tres de los cuales responden a configuraciones propuestas por normativas europeas y americanas, y dos que obedecen a la necesidad de evaluar el comportamiento de elementos no normalizados.

Para la presente tesis doctoral se llevan a cabo los ensayos propuestos por las normas EN14651 (2005), ASTM C 1018 (1997) (equivalente a la ASTM C 1609 (2007)/UNE83509 (2004)) y ASTM C 1550 (2005). Además, se realizan ensayos no

normalizados a dos placas delgadas, la primera de ellas cargada en el centro con una carga puntual y la segunda con dos líneas de carga laterales. Las dimensiones de las probetas fabricadas se presentan en la Tabla 3. 1.

Se ha planteado el programa experimental de este modo con el fin de analizar respuestas estructurales diferentes y buscar modelos numéricos y sus parámetros que sean aplicables a todas las tipologías ensayadas.

**Tabla 3. 1.** Dimensiones de los elementos elaborados y ensayados.

Ensayo	Ancho (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)	Diámetro (mm)
EN14651	150	150	550	-
ASTM 1018	100	100	500	-
ASTM 1550	-	75	-	800
Placa cuadrada con carga central, Placa 1	1000	75	1000	-
Placa cuadrada con dos líneas de carga, Placa 2	1000	75	1000	-
Cilindros de compresión	-	300	-	150

Además, se fabricaron probetas cilíndricas de 150mm de diámetro y 300mm de altura, como acompañamiento para controlar la resistencia a compresión y el módulo de deformación del hormigón.

En este apartado, se plantean las variables consideradas, los materiales empleados, la descripción de los ensayos y el programa de ensayos realizados.

### 3.2. VARIABLES DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.

A continuación se definen las variables de los materiales que componen el HRFA. De este modo, se tienen variables relativas al hormigón y a las fibras metálicas de acero; y además, un grupo de variables que obedece a los elementos elaborados.

En las Tabla 3. 2 y Tabla 3. 3 se relacionan las variables referentes al hormigón, a las fibras y a los elementos elaborados, para cada uno de los tres hormigones fabricados.

**Tabla 3. 2.** Variables correspondientes al hormigón y a las fibras para los tres tipos de hormigón.

Hormigón Composición	Hormigón HI	Hormigón HA	Hormigón HB
Tipo de cemento	I - 52,5R	I - 52,5R	II/B-M - 42,5R
Relación A/C	0,5	0,5	0,6
Resistencia a compresión $f_c$ (MPa)	50	50	30
Diámetro del árido (mm)	12	12	20
Tipo de fibra	35/80	35/80	45/50
Cantidad de fibra (kg/m <sup>3</sup> )	50	60	40

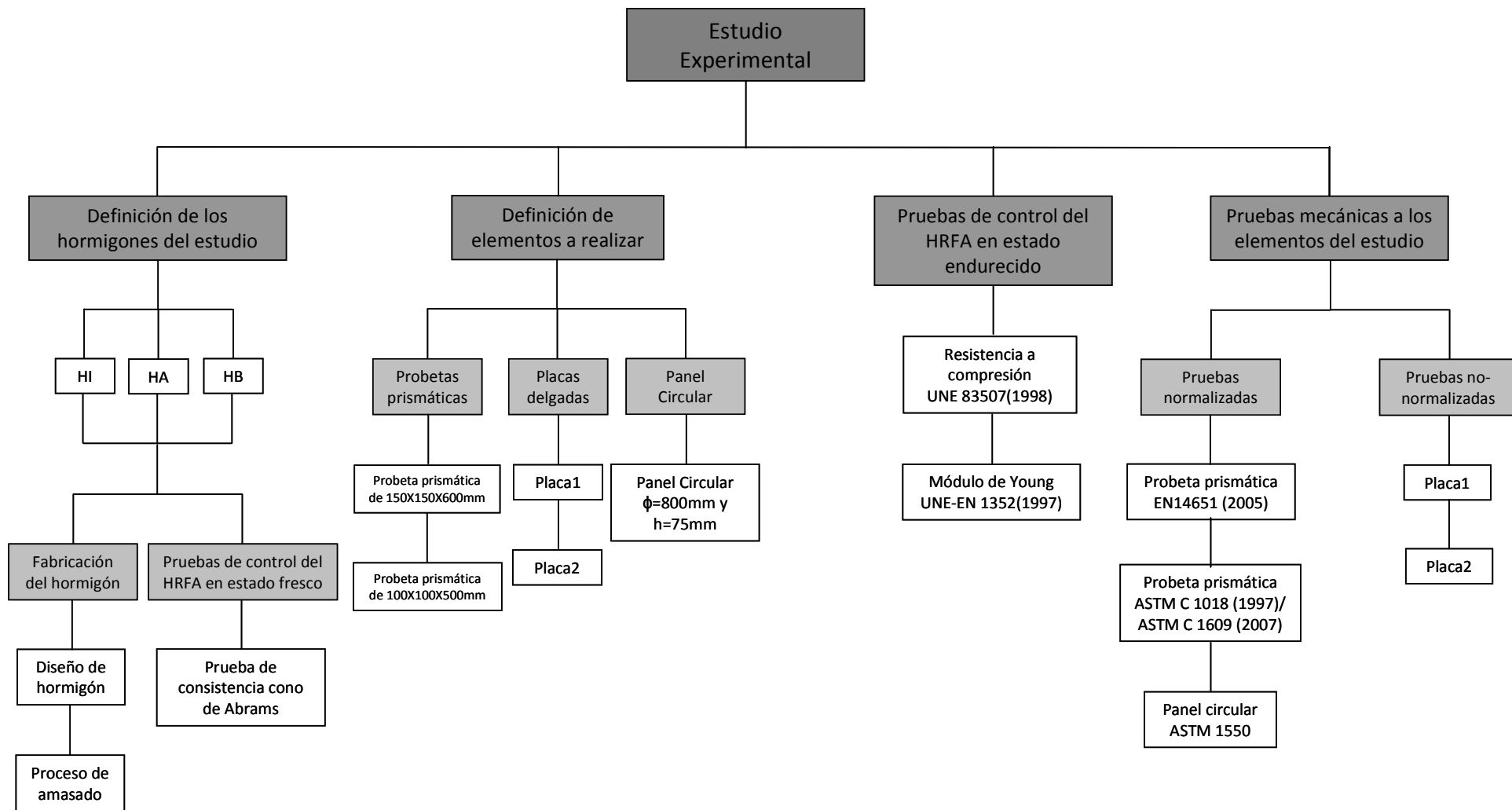
**Tabla 3. 3.** Variables correspondientes a los elementos elaborados.

Hormigón Elemento	Hormigón HI	Hormigón HA	Hormigón HB
Probeta prismática EN14651	X	X	X
Probeta prismática ASTM 1018	X	X	X
Panel circular ASTM 1550	X	X	X
Placa cuadrada con carga central, Placa 1	X	X	X
Placa cuadrada con dos líneas de carga, Placa 2	X	X	X

Pese a que todos los HRFA son elaborados con aditivos, esto no se considera como variable debido a que el empleo de uno u otro obedece a la función que se le quiera dar (alcanzar la fluidez necesaria), y la variación de la cantidad es en función de la consistencia deseada.

### 3.3. PLANIFICACIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.

Para llevar a cabo el estudio experimental se plantea una estructura de descomposición de tareas (Figura 3. 2).

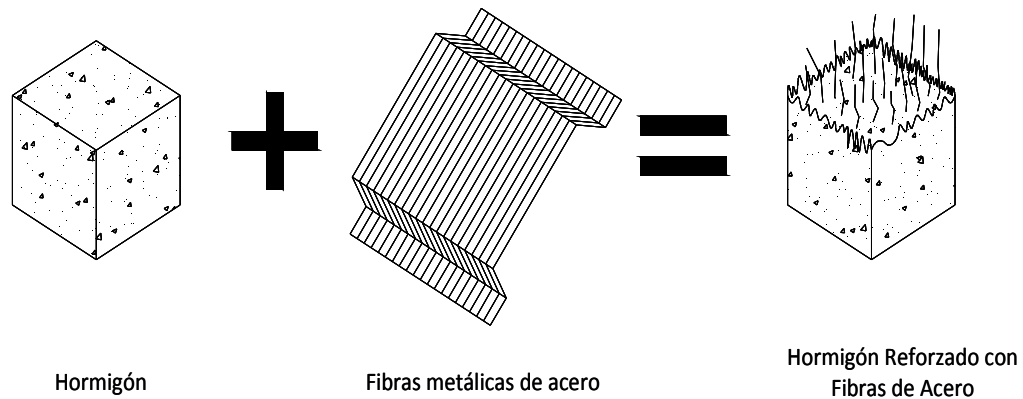


**Figura 3. 2.** Estructura de descomposición de tareas del estudio experimental.



### 3.4. METODOLOGIA DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.

Para la elaboración de los elementos se tienen en cuenta las propiedades de los materiales que constituyen el HRFA. Es decir, el hormigón y las fibras metálicas de acero, Figura 3. 3.



**Figura 3. 3.** Ilustración de los componentes del HRFA.

Se plantean tres tipos de hormigón: un hormigón inicial (HI), un hormigón A (HA) y un hormigón B (HB). Sus dosificaciones se presentan en la Tabla 3. 4.

**Tabla 3. 4.** Dosificación de los hormigones HI, HA y HB.

Hormigón		HI	HA	HB
Material				
Hormigón	Grava 4/7 (Kg/m <sup>3</sup> )	237	219,91	-
	Grava 7/12 (Kg/m <sup>3</sup> )	712	659,72	539,98
	Grava 12/20 (Kg/m <sup>3</sup> )	-	-	359,98
	Arena (Kg/m <sup>3</sup> )	1021	977,363	999,95
	Cemento (Kg/m <sup>3</sup> )	350	375	325
	Agua (L/m <sup>3</sup> )	141,46	203,814	216,144
	Aditivo (L/m <sup>3</sup> )	5,78	5,813	0.48
Fibras	Tipo de Fibras	Tipo 1 Trefilado en frio	Tipo 1 Trefilado en frio	Tipo 1 Trefilado en frio
	Volumen (Kg/m <sup>3</sup> )	50	60	40
	Forma	Con Ganchos	Con Ganchos	Con Ganchos
	Esbeltez (l/d)	80	80	45
	Longitud (mm)	35	35	50

Nota: Para HI y HA se ha utilizado aditivo Glenium C355 y para HB aditivo Pozzolith 651N.

Se definen los elementos y la cantidad a realizar (Tabla 3. 5):

**Tabla 3. 5.** Cantidad de elementos realizados con cada hormigón.

Elemento \ Hormigón	Número de elementos con hormigón inicial (HI)	Número de elementos con HA	Número de elementos con HB
Probeta prismática/EN14651	2	3	3
Probeta prismática/ASTM 1018	4	4	4
Panel circular/ASTM 1550	1	2	2
Placa cuadrada con carga central, Placa 1	1	2	2
Placa cuadrada con dos líneas de carga, Placa 2	1	2	2
Cilindros de compresión	4	3	3

Con las dosificaciones definidas y el número de elementos se procede a realizar las amasadas para cada uno de los hormigones definidos (Tabla 3. 6). Para el hormigón HI se emplean dos amasadoras de eje planetario con capacidad nominal de 60L (Figura 3. 4) y, considerando como una sola amasada el producto de las dos amasadoras trabajando simultáneamente, se realizan cuatro amasadas. Para los hormigones HA y HB se emplea una amasadora con capacidad nominal de 150L (Figura 3. 4) y se realizan cinco amasadas para cada uno. El procedimiento de amasado es igual para todas las amasadas, y se presenta en la Tabla 3. 7.

**Tabla 3. 6.** Distribución de amasadas para cada hormigonera.

Amasada \ Hormigón	Amasada 1	Amasada 2	Amasada 3	Amasada 4	Amasada 5
HI	1 Probeta prismática de 100x100x500mm, 1 Placa cuadrada de 1000x1000x75mm, 1 Cilindro de 150mm de Øx300mm	1 Probeta prismática de 100x100x500mm, 1 Placa cuadrada de 1000x1000x75mm, 1 Cilindro de 150mm de Øx300mm	1 Panel circular de 800mm de Øx75mm, 1 Cilindro de 150mm de Øx300mm	3 Probetas prismáticas de 150x150x550mm, 2 Probetas prismáticas de 100x100x500mm, 1 Cilindro de 150mm de Øx300mm	-
Volúmen fabricado	90L	90L	45L	45L	-
HA	2 Placas cuadradas de 1000x1000x75mm, 2 Cilindros de 150mm de Øx300mm	2 Probetas prismáticas de 100x100x500mm, 1 Placa cuadrada de 1000x1000x75mm, 1 Cilindro de 150mm de Øx300mm	1 Panel circular de 800mm de Øx75mm, 1 Placa cuadrada de 1000x1000x75mm	1 Probeta prismática de 150x150x550mm, 1 Placa cuadrada de 1000x1000x75mm, 1 Cilindro de 150mm de Øx300mm	2 Probetas prismáticas de 150x150x550mm, 2 Probetas prismáticas de 100x100x500mm, 1 Panel circular de 800mm de Øx75mm
Volúmen fabricado	100L	100L	120L	100L	100L
HB	1 Placa cuadrada de 1000x1000x75mm, 2 Cilindros de 150mm de Øx300mm	2 Probetas prismáticas de 100x100x500mm, 1 Placa cuadrada de 1000x1000x75mm, 1 Cilindro de 150mm de Øx300mm	1 Panel circular de 800mm de Øx75mm, 1 Placa cuadrada de 1000x1000x75mm	2 Probetas prismáticas de 100x100x500mm, 1 Placa cuadrada de 1000x1000x75mm, 1 Cilindro de 150mm de Øx300mm	3 Probetas prismáticas de 150x150x550mm, 1 Panel circular de 800mm de Øx75mm
Volúmen fabricado	100L	100L	120L	100L	120L



a)

b)

**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.

**Tabla 3. 7.** Procedimiento de amasado.

Tiempo (min)	Material adicionado	Observación
0	Grava y arena	Adicionar en orden de tamaño descendente
2	Cemento	Durante medio minuto
4	Agua	Durante un minuto
6	Aditivo	Durante un minuto
8	Fibras	Durante medio minuto
12	Fin de la amasada	Fibras dispersas adecuadamente; Control de consistencia (Cono de Abrams)

En cada amasada se controla la consistencia. Los resultados del ensayo cono de Abrams (Figura 3. 5) para el hormigón en estado fresco se presentan en la Tabla 3. 8.



**Figura 3. 5.** Ensayo de cono de Abrams.

**Tabla 3. 8.** Resultados del ensayo cono de Abrams para los hormigones HI, HA y HB.

Hormigones	Nombre de la amasada	Cono de Abrams (cm)
HI	Amasada I	7
	Amasada II	8
	Amasada III	8,5
	Amasada IV	7
HA	Amasada I	8
	Amasada II	8,5
	Amasada III	5,5
	Amasada IV	9
	Amasada V	9
HB	Amasada I	9
	Amasada II	9
	Amasada III	6,5
	Amasada IV	12
	Amasada V	12,5

A continuación, se elaboran los elementos de HRFA. Para el HI se fabrican tres probetas EN14651, cuatro probetas ASTM1018, un panel circular ASTM1550, dos placas cuadradas y cuatro probetas cilíndricas para los ensayos de compresión y obtención de módulos (norma UNE 83507(2004) y norma UNE-EN 1352 (1997)).

Para cada uno de los hormigones HA y HB se elaboran los siguiente elementos: tres probetas EN14651, cuatro probetas ASTM1018, dos paneles circulares ASTM1550, y cuatro placas cuadradas. Se elaboran cuatro cilindros para los ensayos de compresión y módulos (norma UNE 83507(1998) y norma UNE-EN 1352 (1997)).

Una vez terminada la elaboración de los elementos de HRFA se inicia su curado. Los elementos fabricados se cubren con plástico durante tres días y se humedecen periódicamente de forma manual. El curado se realiza a la intemperie durante 60 días con el fin de que el tiempo no interfiera como variable dentro del estudio.

El siguiente paso es identificar las propiedades del material para cada uno de los hormigones. Para lo cual, se realizan los ensayos a compresión (norma UNE 83507(1998)) y los ensayos de módulos (norma UNE-EN 1352 (1997)).

Las resistencias a compresión ( $f_c$ ) para cada uno de los hormigones propuestos se presentan en la Tabla 3. 9. Se destaca que el coeficiente de variación de los hormigones HI y HB es pequeño a pesar de que las probetas proceden de amasadas distintas; contrario al hormigón HA, cuyo coeficiente de variación es mayor puesto que la probeta HA4 presenta una resistencia superior a las demás probetas. La Tabla 3. 10 muestra los resultados del módulo de Young (Figura 3. 6) para los hormigones HI, HA y HB.

**Tabla 3. 9.** Resistencia a compresión ( $f_c$ ) de los hormigones HI, HA y HB.

Hormigones	Cilindro	$f_c$ (MPa)	$f_c$ media (MPa)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
HI	HI 1	42,97	43,71	0,55	1,25
	HI 2	44,23			
	HI 3	43,65			
	HI 4	43,98			
HA	HA 1	46,93	46,94	4,99	10,62
	HA 2	42,51			
	HA 3	44,41			
	HA 4	53,91			
HB	HB 1	34,14	33,61	0,60	1,79
	HB 2	33,79			
	HB 3	33,75			
	HB 4	32,74			



**Figura 3. 6.** Prueba para la obtención del módulo de Young.

**Tabla 3. 10.** Módulos de Young de los hormigones HI, HA y HB.

Hormigón	Ec (MPa)
HI	-
	-
HA	29468
	31898
HB	29108
	28478

Una vez terminadas las pruebas de control del hormigón endurecido (pruebas de caracterización), se procede a realizar las pruebas mecánicas definidas para cada uno de los elementos elaborados. Las pruebas mecánicas y los resultados obtenidos se presentan en el siguiente apartado.

### 3.5. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS.

En este apartado se describen los procedimientos de ensayo aplicados a cada elemento, y se presentan los resultados obtenidos. Los datos obtenidos de las pruebas mecánicas son procesados de forma tal que permitan graficar los diagramas carga-flecha ( $F-\delta$ ). Además, en los elementos para los ensayos según norma EN14651 y en las placas cuadradas se colocan captadores para medir la abertura de fisura ( $W_{COD}$ ).

En el Anejo A se presentan las curvas experimentales para cada una de las probetas de cada tipo de hormigón y con las mediciones obtenidas en todos los captadores empleados.

## 3.5.1. ENSAYO A FLEXO-TRACCIÓN EN14651 (2005).

Este ensayo permite medir la resistencia a flexo-tracción del HRFA. Además, permite determinar los valores del límite de proporcionalidad y de la resistencia residual.

Esta norma se aplica a probetas prismáticas con entalla (Figuras 3.7 y 3.8). La probeta se ensaya con carga centrada y controlando la velocidad de abertura de fisura. En este ensayo se ha medido también la flecha en el centro del vano.



Figura 3. 7. Montaje de la probeta EN14651 (2005).

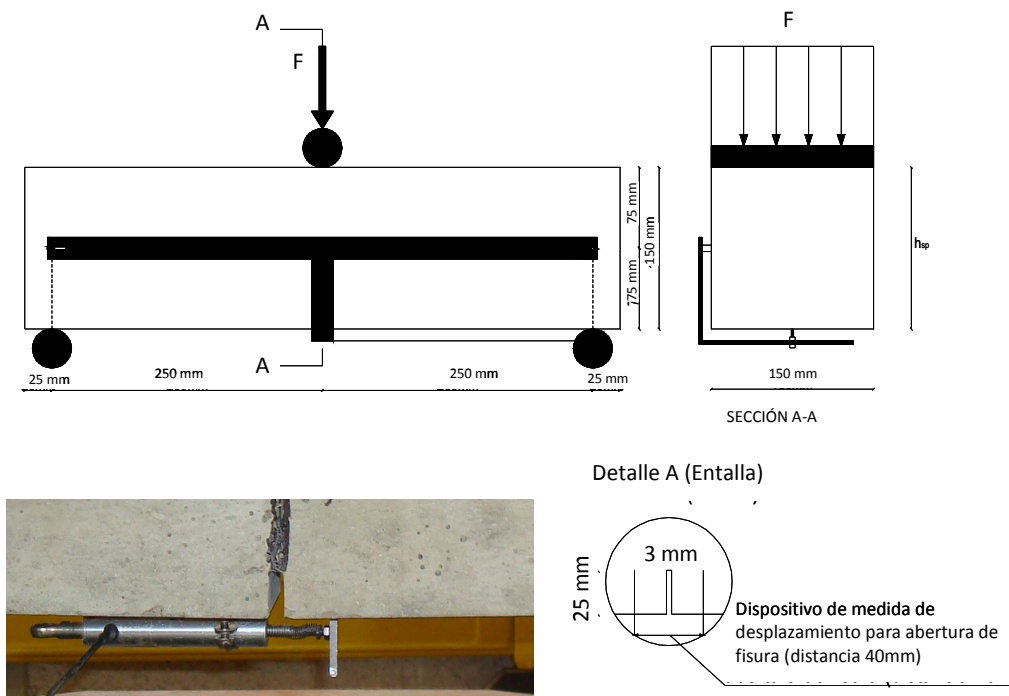
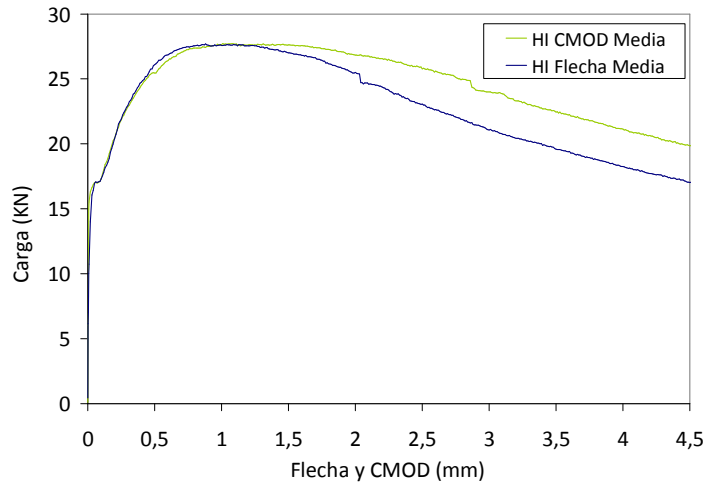
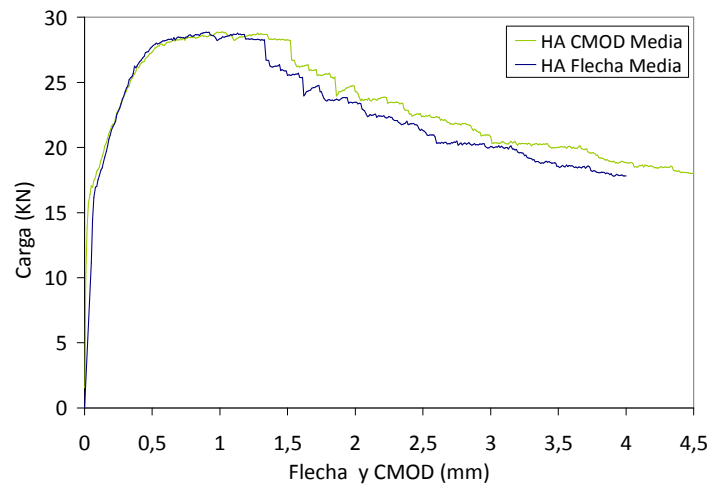


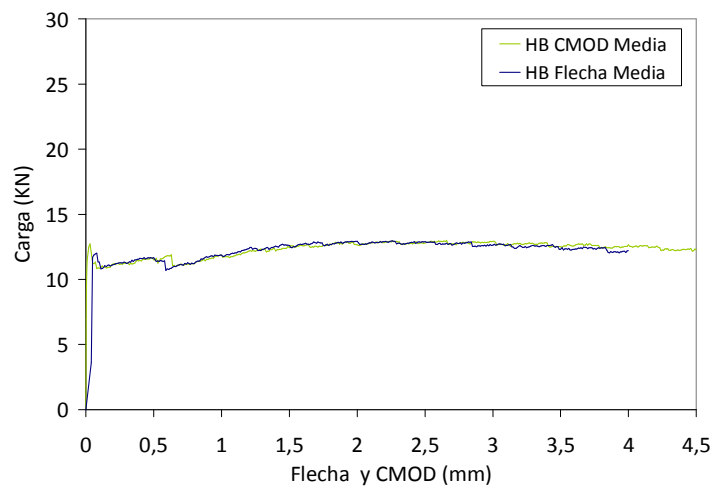
Figura 3. 8. Mecanismo de aplicación de la carga EN14651 (2005).



**Figura 3. 9.** Curva media carga-flecha y carga-abertura de fisura (CMOD) experimental de las probetas HI1 y HI2, ensayo EN14651.



**Figura 3. 10.** Curva media carga- flecha y carga-abertura de fisura (CMOD) experimental de las probetas HA1, HA2 y HA3, ensayo EN14651.



**Figura 3. 11.** Curva media carga- flecha y carga-abertura de fisura (CMOD) experimental de las probetas HB1, HB2 y HB3, ensayo EN14651.



Las curvas medias carga-flecha y carga-abertura de fisura (CMOD) experimentales para las probetas prismáticas sometidas a este ensayo de los hormigones HI, HA y HB se muestran en las Figuras 3.9, 3.10 y 3.11, respectivamente.

En las Tablas 3.11, 3.12 y 3.13 se presentan los valores de las resistencia a flexotracción, a primera fisura (fct,l) y resistencias residuales de los hormigones HI, HA y HB, respectivamente. Donde fr,1, fr,2, fr,3 y fr,4 corresponden a las resistencias residuales para una abertura de fisura (CMOD) de 0,5mm, 1,5mm, 2,5mm y 3,5mm, respectivamente.

De acuerdo con la norma aplicada los valores de resistencia se han obtenido considerando distribución triangular de tensiones en la sección de rotura. Por otra parte, la carga a primera fisura es definida como el valor de carga más alto para un nivel de abertura de fisura inferior a 0,05mm.

**Tabla 3. 11.** Resultados obtenidos del ensayo EN14651 para el hormigón HI.

Probeta	fct,l (MPa)	fr,1 (MPa)	fr,2 (MPa)	fr,3 (MPa)	fr,4 (MPa)
EN14651 HI1	5,52	7,60	8,25	7,80	6,93
EN14651 HI2	5,37	8,69	9,02	8,70	7,44
Media	5,50	8,14	8,64	8,25	7,19
Desviación Estándar	0,11	0,77	0,79	0,64	0,36

**Tabla 3. 12.** Resultados obtenidos del ensayo EN14651 para el hormigón HA.

Probeta	fct,l (MPa)	fr,1 (MPa)	fr,2 (MPa)	fr,3 (MPa)	fr,4 (MPa)
EN14651 HA1	6,44	10,28	10,64	8,66	7,47
EN14651 HA2	5,50	8,32	8,57	7,09	6,35
EN14651 HA3	6,06	10,29	9,81	7,91	7,32
Media	6,00	9,63	9,67	7,89	7,04
Desviación Estándar	0,47	1,13	1,04	0,79	0,61

**Tabla 3. 13.** Resultados obtenidos del ensayo EN14651 para el hormigón HB.

Probeta	fct,l (MPa)	fr,1 (MPa)	fr,2 (MPa)	fr,3 (MPa)	fr,4 (MPa)
EN14651 HB1	4,60	3,54	3,44	3,38	3,30
EN14651 HB2	4,90	3,74	4,34	4,43	4,31
EN14651 HB3	4,35	4,16	5,41	5,73	5,61
Media	4,61	3,82	4,40	4,51	4,40
Desviación Estándar	0,28	0,31	0,99	1,18	1,16

A diferencia de los hormigones HI y HB, se observa que el hormigón HA presenta un claro descenso de la capacidad resistente después de alcanzada la carga máxima y por tanto un comportamiento más frágil.

Las Tablas 3.14, 3.15 y 3.17 presentan la capacidad de disipación de energía de los hormigones HI, HA y HB, respectivamente, para las probetas del ensayo EN14651. Se obtuvo la energía correspondiente a la primera fisura (PF), y a diferentes flechas (0,5mm, 1,0mm, 1,5mm, 2,5mm y 3,5mm), medida como el área bajo la curva carga-flecha, desde el origen hasta la flecha de referencia.

**Tabla 3. 14.** Energías de las probetas del hormigón HI, ensayo EN14651.

Flecha (mm)	EN14651 HI1 Energía (J)	EN14651 HI2 Energía (J)	Media (J)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	0,62	0,72	0,67	0,07	10,55
0,50	9,74	11,27	10,51	1,08	10,30
1,00	22,35	25,92	24,14	2,52	10,46
1,50	35,28	40,43	37,86	3,64	9,62
2,50	59,80	66,33	63,07	4,62	7,32
3,50	80,90	87,62	84,26	4,75	5,64

**Tabla 3. 15.** Energías de las probetas del hormigón HA, ensayo EN14651.

Flecha (mm)	EN14651 HA1 Energía (J)	EN14651 HA2 Energía (J)	EN14651 HA3 Energía (J)	Media (J)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	0,68	0,58	0,67	0,64	0,06	8,56
0,50	11,28	9,92	11,16	10,79	0,75	6,98
1,00	26,60	22,57	25,93	25,03	2,16	8,63
1,50	41,94	34,90	39,88	38,91	3,62	9,30
2,50	67,24	56,28	63,02	62,18	5,53	8,89
3,50	88,30	74,43	83,61	82,11	7,06	8,59

**Tabla 3. 16.** Energías de las probetas del hormigón HB, ensayo EN14651.

Flecha (mm)	EN14651 HB1 Energía (J)	EN14651 HB2 Energía (J)	EN14651 HB3 Energía (J)	Media (J)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	0,28	0,45	0,27	0,33	0,10	30,35
0,50	5,90	5,33	5,60	5,61	0,29	5,08
1,00	10,76	11,07	12,05	11,29	0,67	5,96
1,50	15,56	17,25	19,50	17,44	1,98	11,34
2,50	25,27	29,85	35,51	30,21	5,13	16,98
3,50	34,68	42,17	51,68	42,84	8,52	19,89

Se observa que la energía a primera fisura de las probetas del hormigón HB presenta el mayor coeficiente de variación, a pesar de ser procedentes de la misma amasada.

Además, se obtuvo el valor de la carga para los mismos valores de flecha (0,5mm, 1,0mm, 1,5mm, 2,5mm y 3,5mm), para los cuales se obtuvo la capacidad de disipación de energía.

**Tabla 3. 17.** Cargas de las probetas del hormigón HI, ensayo EN14651.

Flecha (mm)	EN14651 HI1 Carga (KN)	EN14651 HI2 Carga (KN)	Media (KN)	Desviación Estándar (KN)	Coefficiente de Variación (%)
PF	17,19	16,59	16,89	0,42	2,51
0,50	23,84	28,20	26,02	3,08	11,85
1,00	25,75	29,39	27,57	2,57	9,34
1,50	25,78	28,20	26,99	1,71	6,34
2,50	22,88	23,22	23,05	0,24	1,04
3,50	19,55	19,76	19,66	0,15	0,76

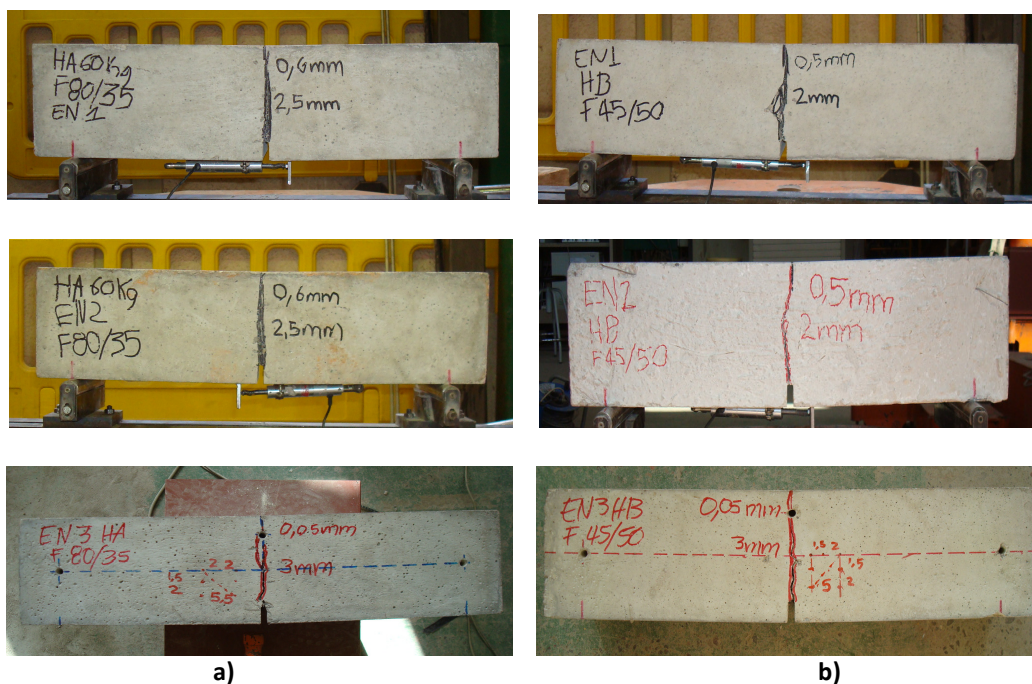
**Tabla 3. 18.** Cargas de las probetas del hormigón HA, ensayo EN14651.

Flecha (mm)	EN14651 HA1 Carga (KN)	EN14651 HA2 Carga (KN)	EN14651 HA3 Carga (KN)	Media (KN)	Desviación Estándar (KN)	Coefficiente de Variación (%)
PF	18,29	15,63	17,21	17,04	1,34	7,85
0,50	29,54	24,79	29,73	28,02	2,80	9,99
1,00	31,06	24,99	29,73	28,59	3,19	11,16
1,50	28,02	23,93	24,79	25,58	2,16	8,43
2,50	23,39	19,24	21,45	21,36	2,08	9,72
3,50	19,00	17,04	19,75	18,60	1,40	7,52

**Tabla 3. 19.** Cargas de las probetas del hormigón HB, ensayo EN14651.

Flecha (mm)	EN14651 HB1 Carga (KN)	EN14651 HB2 Carga (KN)	EN14651 HB3 Carga (KN)	Media (KN)	Desviación Estándar (KN)	Coefficiente de Variación (%)
PF	13,02	13,88	12,27	13,06	0,81	6,17
0,50	11,98	10,72	12,25	11,65	0,82	7,01
1,00	9,64	12,04	14,21	11,96	2,29	19,11
1,50	9,58	12,58	15,61	12,59	3,02	23,95
2,50	9,55	12,52	16,62	12,90	3,55	27,53
3,50	9,18	12,30	15,50	12,33	3,16	25,64

En la Figura 3. 12 se presentan las probetas fisuradas. Este elemento presenta una zona de fractura muy definida, localizada en el centro del elemento y en la zona de entalla de las probetas.

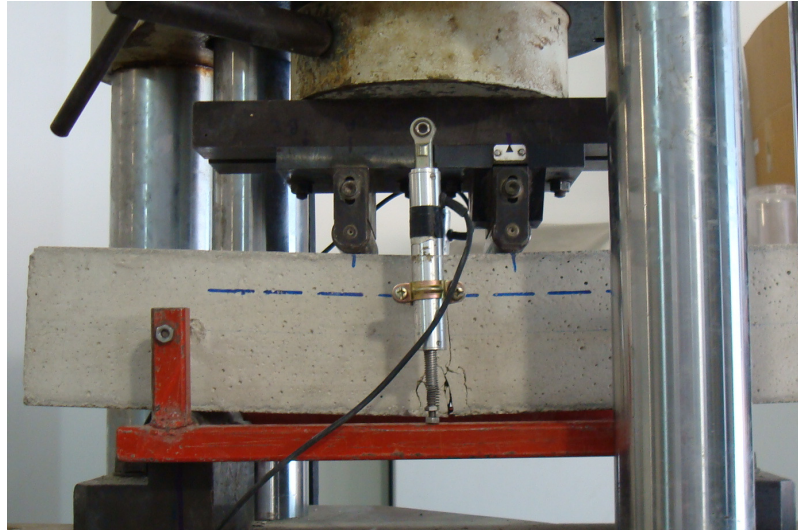


**Figura 3. 12.** Elementos EN14651 fisurados, correspondientes a los hormigones:  
a) HA1, HA2, HA3, y b) HB1, HB2, y HB3.

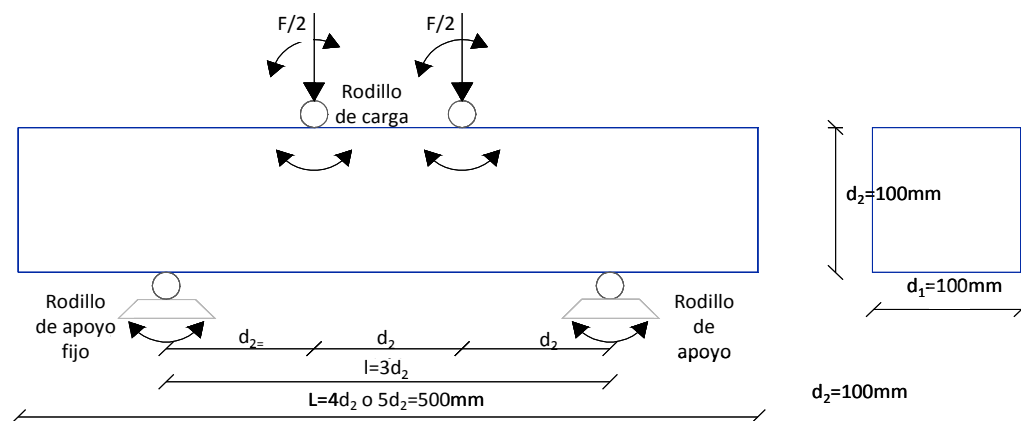
### 3.5.2. PROBETA PRISMÁTICA ASTM C 1018 (1997)/UNE 83509 (2004)/ASTM C 1609 (2007).

Las normativas ASTM C 1018 (1997)/UNE 83509 (2004)/ASTM C 1609 (2007) tienen como objeto determinar la carga máxima de rotura por flexo-tracción en el HRFA, empleando probetas prismáticas con cargas en el tercio central de la luz. La

carga se aplica perpendicularmente a la probeta por medio de dos rodillos y otros dos rodillos son empleados como elementos de apoyo (Figuras 3.13 y 3.14). Durante el ensayo se mide la flecha en el centro del vano y se aplica la carga manteniendo la velocidad de deformación constante.



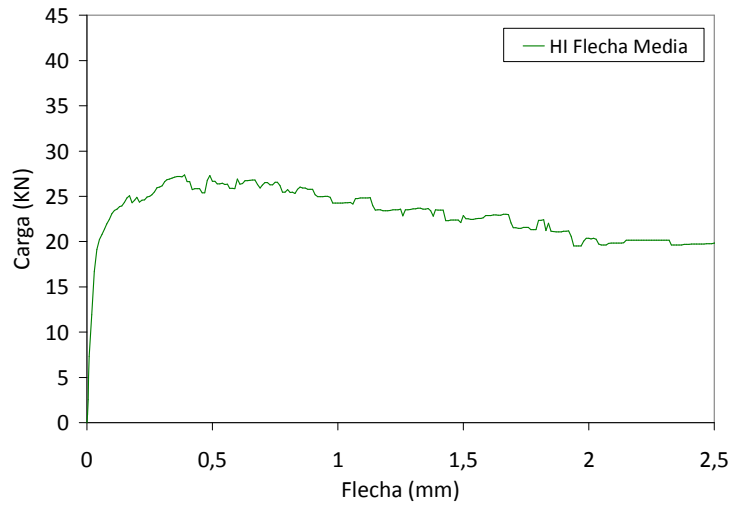
**Figura 3.13.** Configuración del ensayo ASTM1018.



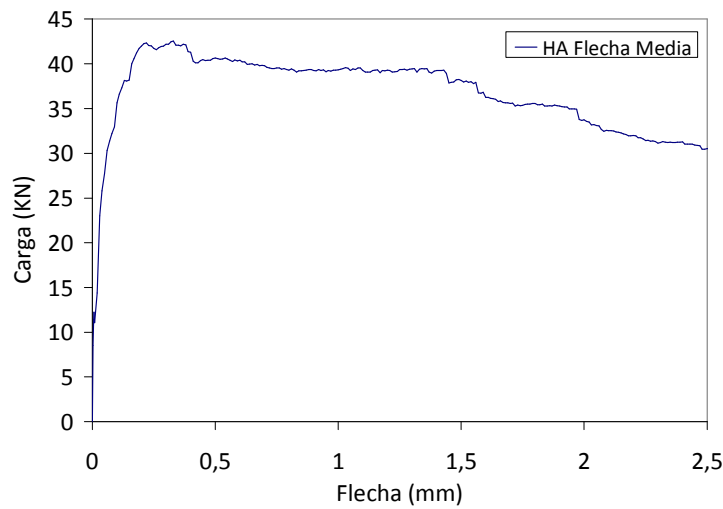
**Figura 3.14.** Mecanismo de aplicación de carga del ensayo ASTM1018.

Las curvas medias carga-flecha experimentales obtenidas para los hormigones HI, HA y HB se presentan en las Figuras 3.15, 3.16 y 3.17, respectivamente.

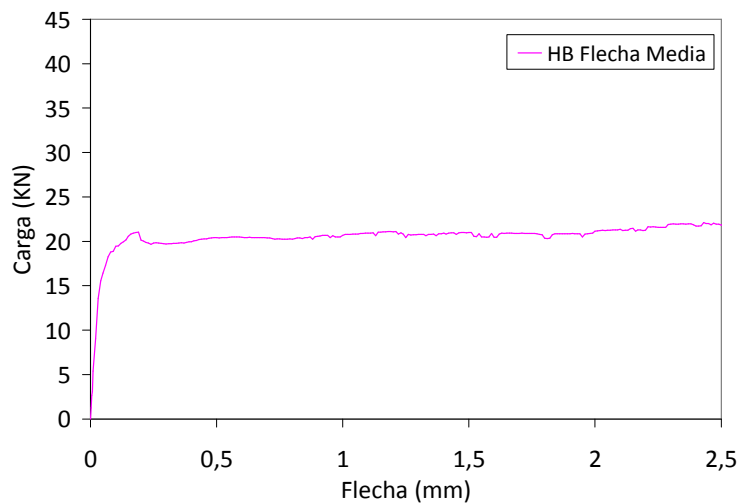
Se observa que los elementos correspondientes al hormigón HI presentan una resistencia inferior al hormigón HA, pese a ser hormigones similares. La baja resistencia del hormigón HB era de esperarse teniendo en cuenta la cantidad y tipo de fibras empleadas en su fabricación.



**Figura 3. 15.** Curva media carga-flecha experimental de las probetas HI1, HI2, HI3 y HI4, ensayo ASTM1018.



**Figura 3. 16.** Curva media carga-flecha experimental de las probetas HA1, HA2, HA3 y HA4, ensayo ASTM1018.



**Figura 3. 17.** Curva media carga-flecha experimental de las probetas HB1, HB2, HB3 y HB4, ensayo ASTM1018.

**Tabla 3. 20.** Resultados obtenidos del ensayo ASTM1018 para el hormigón HI.

Probeta	fp (MPa)	f <sup>D</sup> <sub>600</sub> (MPa)	f <sup>D</sup> <sub>150</sub> (MPa)
ASTM1018 HI1	7,27	6,33	4,01
ASTM1018 HI2	7,12	7,61	11,11
ASTM1018 HI3	6,92	9,14	5,91
ASTM1018 HI4	8,63	8,97	6,59
Media	7,48	8,01	6,90
Desviación Estándar	0,78	1,31	3,01
Coefficiente de Variación	10,44	16,38	43,55

**Tabla 3. 21.** Resultados obtenidos del ensayo ASTM1018 para el hormigón HA.

Probeta	fp (MPa)	f <sup>D</sup> <sub>600</sub> (MPa)	f <sup>D</sup> <sub>150</sub> (MPa)
ASTM1018 HA1	6,58	5,42	5,81
ASTM1018 HA2	8,62	13,07	11,98
ASTM1018 HA3	7,43	12,61	11,89
ASTM1018 HA4	7,92	13,65	9,34
Media	7,64	11,19	9,75
Desviación Estándar	0,86	3,86	2,90
Coefficiente de Variación	11,24	34,55	29,73

**Tabla 3. 22.** Resultados obtenidos del ensayo ASTM1018 para el hormigón HB.

Probeta	fp (MPa)	f <sup>D</sup> <sub>600</sub> (MPa)	f <sup>D</sup> <sub>150</sub> (MPa)
ASTM1018 HB1	3,91	3,59	2,87
ASTM1018 HB2	6,14	7,15	7,16
ASTM1018 HB3	5,61	5,29	6,07
ASTM1018 HB4	6,18	6,63	6,32
Media	5,46	5,66	5,60
Desviación Estándar	1,07	1,59	1,88
Coefficiente de Variación	19,56	28,03	33,64

En las Tablas 3.20, 3.21 y 3.22 se presentan los valores de las resistencia a flexotracción, a primera fisura ( $f_p$ ) y resistencias residuales de los hormigones HI, HA y HB, respectivamente. Donde  $f_{600}^D$  y  $f_{150}^D$  corresponden a las resistencias residuales para niveles de flecha de 0,5mm y 2mm, respectivamente. De acuerdo a la norma ASTM C 1018, la carga a primera fisura es definida como el primer valor de la carga de la curva carga-flecha donde la pendiente es cero.

Al comparar los valores de resistencia residual calculados de acuerdo con las normas EN16451 y ASTM1018 para los mismos niveles de flecha, se observa que con ésta última se obtienen valores superiores. Los coeficientes de variación obtenidos en este ensayo son muy superiores a los que presenta el ensayo EN14651; esto da idea de la gran dispersión del ensayo ASTM1018.

Las Tablas 3.23, 3.24 y 3.25 presentan la capacidad de disipación de energía de los hormigones HI, HA y HB, respectivamente, para las probetas del ensayo ASTM1018. Se obtuvo la energía correspondiente a la primera fisura (PF), y a diferentes flechas (0,5mm, 1,0mm, 1,5mm, 2,0mm y 2,5mm).

Para los tres hormigones se observan coeficientes de variación altos correspondientes a la capacidad de disipación de energía a primera fisura, probablemente atribuido a que provienen de tres amasadas diferentes para el hormigón HI y de dos amasadas para los hormigones HA y HB.

Además, se obtuvo el valor de la carga para los mismos valores de flecha (0,5mm, 1,0mm, 1,5mm, 2,0mm y 2,5mm) para los cuales se obtuvo la capacidad de disipación de energía (Tablas 3. 26 a 3. 28).



**Tabla 3. 23.** Energías de las probetas del hormigón HI, ensayo ASTM1018.

Flecha (mm)	ASTM1018 HI1 Energía (J)	ASTM1018 HI2 Energía (J)	ASTM1018 HI3 Energía (J)	ASTM1018 HI4 Energía (J)	Media (J)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	0,40	0,76	0,81	1,71	0,92	0,56	60,48
0,50	10,24	11,45	13,30	12,90	11,97	1,40	11,71
1,00	21,70	25,78	27,10	25,15	24,93	2,30	9,24
1,50	31,58	40,27	41,42	33,65	36,73	4,85	13,20
2,00	40,35	60,65	48,99	40,40	47,60	9,60	20,17
2,50	-	83,96	-	-	-	-	-

**Tabla 3. 24.** Energías de las probetas del hormigón HA, ensayo ASTM1018.

Flecha (mm)	ASTM1018 HA1 Energía (J)	ASTM1018 HA2 Energía (J)	ASTM1018 HA3 Energía (J)	ASTM1018 HA4 Energía (J)	Media (J)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	0,12	1,03	0,43	0,68	0,56	0,39	68,62
0,50	16,13	20,30	19,86	19,27	18,89	1,89	9,99
1,00	30,39	42,25	41,48	40,73	38,71	5,58	14,42
1,50	43,58	64,13	65,27	60,17	58,29	10,05	17,23
2,00	55,92	86,09	86,61	76,12	76,19	14,35	18,83
2,50	67,36	103,67	105,58	91,70	92,08	17,59	19,10

**Tabla 3. 25.** Energías de las probetas del hormigón HB, ensayo ASTM1018.

Flecha (mm)	ASTM1018 HB1 Energía (J)	ASTM1018 HB2 Energía (J)	ASTM1018 HB3 Energía (J)	ASTM1018 HB4 Energía (J)	Media (J)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	0,81	0,39	0,49	0,90	0,65	0,25	37,96
0,50	8,50	9,96	9,29	9,98	9,43	0,70	7,42
1,00	17,82	21,58	18,20	21,02	19,66	1,92	9,77
1,50	27,40	33,03	27,80	32,12	30,09	2,90	9,64
2,00	36,74	44,63	37,74	42,08	40,30	3,70	9,19
2,50	46,35	56,89	48,18	53,68	51,28	4,87	9,50

**Tabla 3. 26.** Cargas de las probetas del hormigón HI, ensayo ASTM1018.

Flecha (mm)	ASTM1018 HI1 Carga (KN)	ASTM1018 HI2 Carga (KN)	ASTM1018 HI3 Carga (KN)	ASTM1018 HI4 Carga (KN)	Media (KN)	Desviación Estándar (KN)	Coefficiente de Variación (%)
PF	24,22	23,72	23,05	28,78	24,94	2,60	10,44
0,50	21,11	25,36	30,46	29,90	26,71	4,37	16,38
1,00	19,63	35,33	28,65	24,45	27,02	6,66	24,64
1,50	18,01	39,32	25,64	22,17	26,29	9,23	35,13
2,00	13,38	37,03	19,70	21,95	23,02	10,02	43,55
2,50	-	36,65	-	-	-	-	-

**Tabla 3. 27.** Cargas de las probetas del hormigón HA, ensayo ASTM1018.

Flecha (mm)	ASTM1018 HA1 Carga (KN)	ASTM1018 HA2 Carga (KN)	ASTM1018 HA3 Carga (KN)	ASTM1018 HA4 Carga (KN)	Media (KN)	Desviación Estándar (KN)	Coefficiente de Variación (%)
PF	21,94	28,74	24,75	26,41	25,46	2,86	11,24
0,50	18,08	43,55	42,02	45,49	37,29	12,88	34,55
1,00	18,60	43,52	45,94	40,91	37,24	12,60	33,82
1,50	19,26	44,02	49,54	33,73	36,64	13,31	36,33
2,00	19,37	39,93	39,62	31,12	32,51	9,66	29,73
2,50	19,72	33,87	36,31	30,42	30,08	7,32	24,33

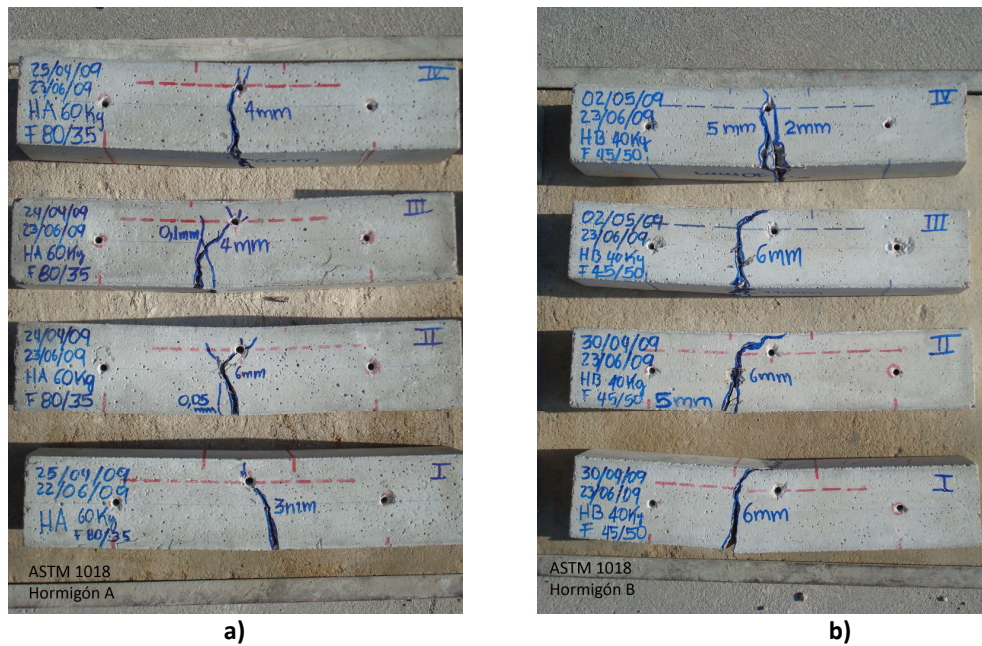
**Tabla 3. 28.** Cargas de las probetas del hormigón HB, ensayo ASTM1018.

Flecha (mm)	ASTM1018 HB1 Carga (KN)	ASTM1018 HB2 Carga (KN)	ASTM1018 HB3 Carga (KN)	ASTM1018 HB4 Carga (KN)	Media (KN)	Desviación Estándar (KN)	Coefficiente de Variación (%)
PF	13,02	20,46	18,69	20,61	18,20	3,56	19,56
0,50	11,98	23,82	17,62	22,11	18,88	5,29	28,03
1,00	9,64	23,38	18,27	22,47	18,44	6,27	34,03
1,50	9,58	22,42	19,89	22,40	18,57	6,11	32,91
2,00	9,55	23,88	20,22	21,05	18,68	6,28	33,64
2,50	9,18	24,95	20,19	22,40	19,18	6,94	36,21

Los tres tipos de hormigón evidencian coeficientes de variación altos. Para los hormigones HI y HB la variación aumenta a mayores niveles de flecha. El hormigón HA presenta mayores variaciones para flechas comprendidas entre 0,5 y 1,5mm.

En la Figura 3. 18 se presentan las probetas fisuradas. La zona de fractura de los elementos sometidos a este ensayo se presenta en el tercio central. Se identifica una

fisura principal, acompañada de fisuras pequeñas que indican el reajuste de las tensiones internas del elemento.



**Figura 3. 18.** Elementos ASTM1018 fisurados, correspondientes a los hormigones: a) HA1, HA2, HA3, HA4 y b) HB1, HB2, HB3 y HB4.

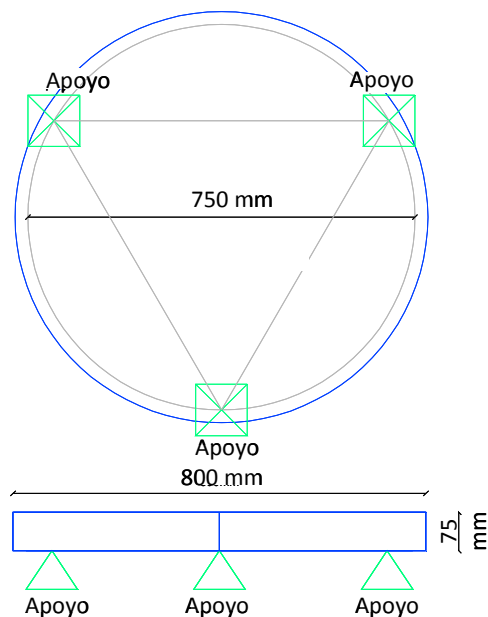
### 3.5.3. PANEL CIRCULAR ASTM 1550.

La norma ASTM C 1550 (2005) presenta un ensayo de paneles cilíndricos de HRFA sometidos a una carga central. Los paneles se soportan con tres pivotes colocados simétricamente. La carga es aplicada a través de un pivote semiesférico. Mediante este ensayo (Figuras 3. 19 y 3. 20) se puede determinar la tenacidad (energía que absorbe el panel).



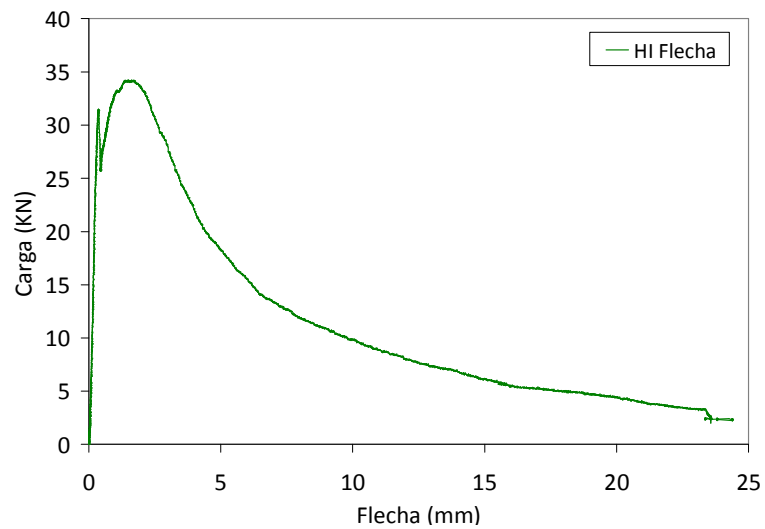
**Figura 3. 19.** Configuración del ensayo de la ASTM C 1550 (2005).

La lámina de HRFA de este ensayo tiene un diámetro de 800mm y un espesor de 75mm. Los tres apoyos son equidistantes, su configuración está inscrita en un círculo de 750mm de diámetro (Figura 3. 20).

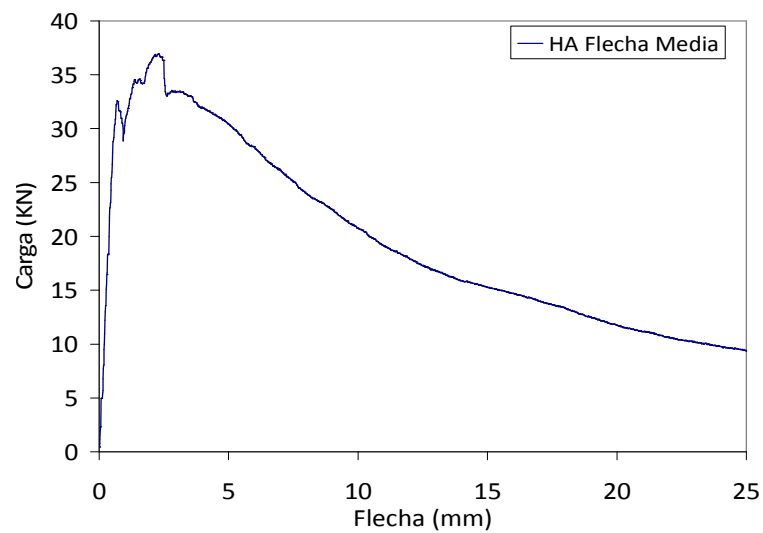


**Figura 3. 20.** Configuración de los apoyos según ASTM C 1550 (2005).

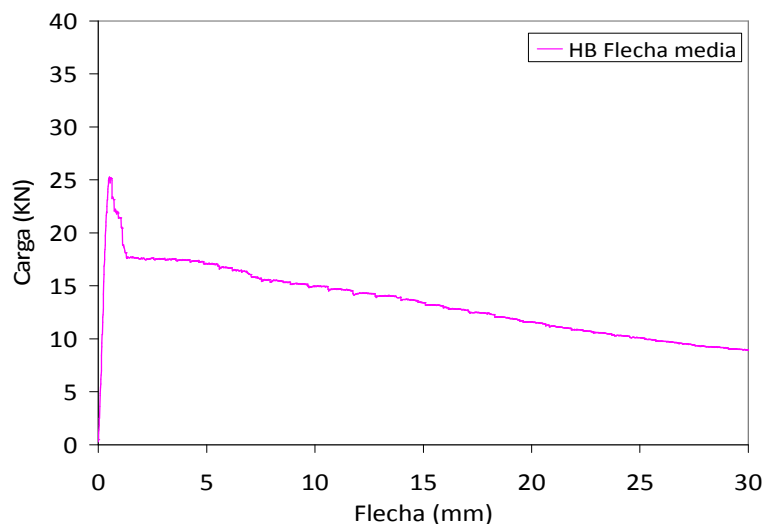
Las curvas carga-flecha experimentales obtenidas para los hormigones HI, HA y HB, se presentan en las Figuras 3.21, 3.22 y 3.23, respectivamente. Se observa que los elementos correspondientes a los hormigones HI y HA presentan resistencias similares con endurecimiento hasta niveles de flecha de 3-4mm; a diferencia del hormigón HB, que presenta una resistencia inferior sin endurecimiento.



**Figura 3. 21.** Curva carga-flecha experimental de la probeta HI1, ensayo ASTM1550.



**Figura 3. 22.** Curva media carga-flecha experimental de las probetas HA1 y HA2, ensayo ASTM1550.



**Figura 3. 23.** Curva media carga-flecha experimental de las probetas HB1 y HB2, ensayo ASTM1550.

Las Tablas 3.29, 3.30 y 3.31 presentan la capacidad de disipación de energía de los hormigones HI, HA y HB, respectivamente, para las probetas del ensayo ASTM1550. Se obtuvo la energía correspondiente a la primera fisura (PF), y a diferentes flechas (0,5mm, 1,0mm, 1,5mm, 2,0mm, 2,5mm y 3,0mm).

**Tabla 3. 29.** Energías de la probeta del hormigón HI, ensayo ASTM1550.

Flecha (mm)	ASTM1550 HI1 Energía (J)
PF	6,12
0,50	9,76
1,00	26,65
1,50	41,89
2,00	58,87
2,50	74,99
3,00	89,63

**Tabla 3. 30.** Energías de las probetas del hormigón HA, ensayo ASTM1550.

Flecha (mm)	ASTM1550 HA1 Energía (J)	ASTM1550 HA2 Energía (J)	Media (J)	Desviación Estándar (J)	Coficiente de Variación (%)
PF	12,44	16,58	14,51	2,93	20,18
0,50	6,54	9,09	7,82	1,80	23,07
1,00	21,90	28,38	25,14	4,58	18,23
1,50	33,48	47,33	40,41	9,79	24,24
2,00	55,95	67,40	61,68	8,10	13,13
2,50	74,22	88,16	81,19	9,86	12,14
3,00	90,93	107,28	99,11	11,56	11,67

**Tabla 3. 31.** Energías de las probetas del hormigón HB, ensayo ASTM1550.

Flecha (mm)	ASTM1550 HB1 Energía (J)	ASTM1550 HB2 Energía (J)	Media (J)	Desviación Estándar (J)	Coficiente de Variación (%)
PF	8,02	7,69	7,86	0,23	2,97
0,50	6,35	7,69	7,02	0,95	13,50
1,00	17,92	18,89	18,41	0,69	3,73
1,50	27,09	28,24	27,67	0,81	2,94
2,00	35,69	37,27	36,48	1,12	3,06
2,50	44,20	46,30	45,25	1,48	3,28
3,00	52,70	55,33	54,02	1,86	3,44

En cuanto a capacidad de disipación de energía, los coeficientes de variación presentados en este ensayo son inferiores a los obtenidos en el ensayo EN 14651 y muy inferiores a los del ensayo ASTM1018.

En las Tablas 3.32, 3.33 y 3.34 se observan los valores de carga para los mismos valores de flecha (0,5mm, 1,0mm, 1,5mm, 2,0mm, 2,5mm y 3,0mm) para los cuales se obtuvo la capacidad de disipación de energía.

**Tabla 3. 32.** Cargas de las probetas del hormigón HI, ensayo ASTM1550.

Flecha (mm)	ASTM1550 HI1 Carga (KN)
PF	31,52
0,50	27,47
1,00	32,97
1,50	34,17
2,00	33,47
2,50	30,64
3,00	28,00

**Tabla 3. 33.** Cargas de las probetas del hormigón HA, ensayo ASTM1550.

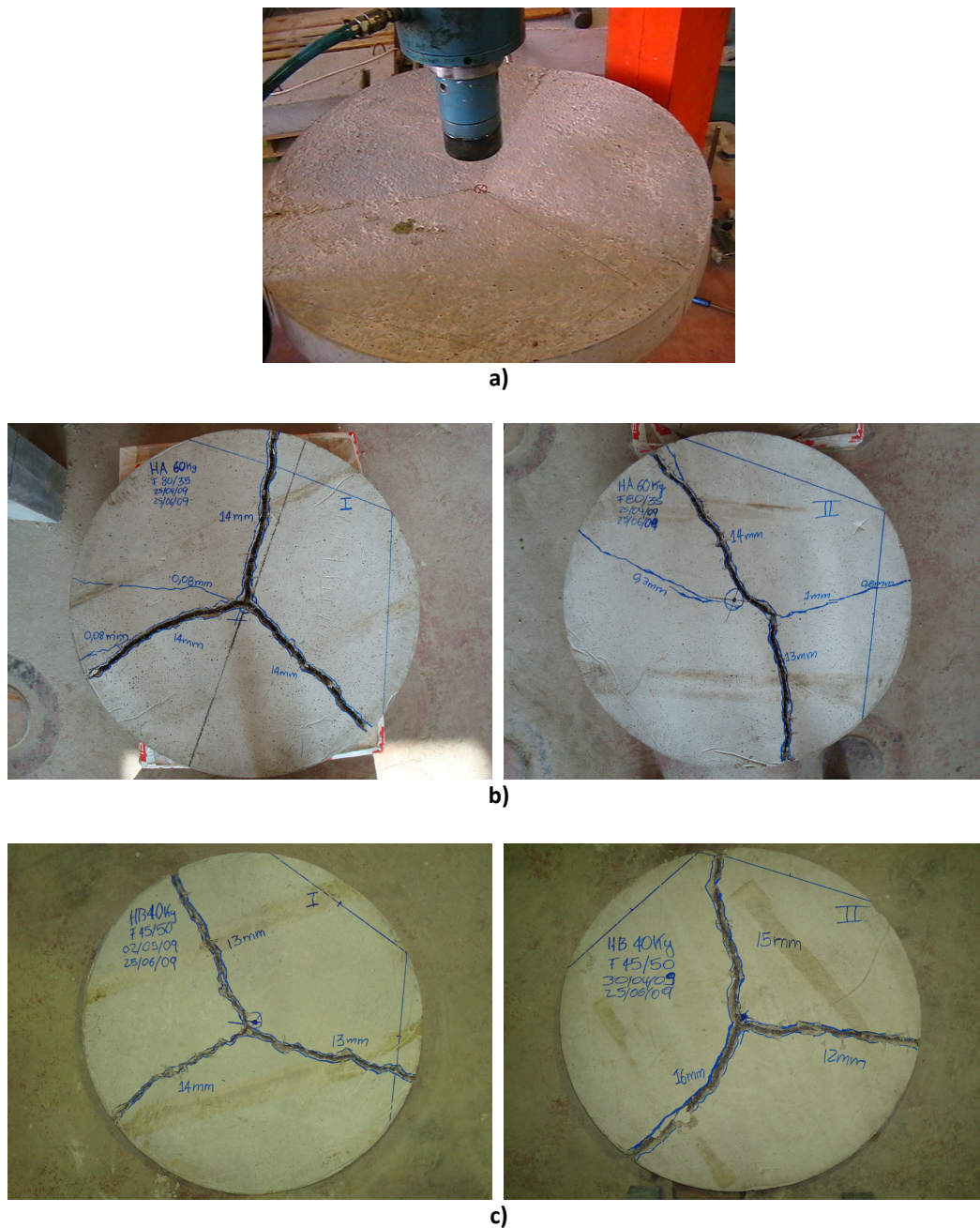
Flecha (mm)	ASTM1550 HA1 Carga (KN)	ASTM1550 HA2 Carga (KN)	Media (KN)	Desviación Estándar (KN)	Coefficiente de Variación (%)
PF	32,73	40,80	36,77	5,71	15,52
0,50	27,00	35,86	31,43	6,26	19,93
1,00	30,88	35,71	33,30	3,42	10,26
1,50	34,39	39,43	36,91	3,56	9,66
2,00	36,22	41,23	38,73	3,54	9,15
2,50	34,71	39,36	37,04	3,29	8,88
3,00	33,41	37,00	35,21	2,54	7,21

**Tabla 3. 34.** Cargas de las probetas del hormigón HB, ensayo ASTM1550.

Flecha (mm)	ASTM1550 HB1 Carga (KN)	ASTM1550 HB2 Carga (KN)	Media (KN)	Desviación Estándar (KN)	Coefficiente de Variación (%)
PF	24,36	27,32	25,84	2,09	8,10
0,50	23,08	27,32	25,20	3,00	11,90
1,00	22,04	19,38	20,71	1,88	9,08
1,50	17,34	18,08	17,71	0,52	2,95
2,00	17,13	18,10	17,62	0,69	3,89
2,50	17,16	18,10	17,63	0,66	3,77
3,00	17,10	17,95	17,53	0,60	3,43

Al igual que con la capacidad de disipación de energía, los valores de carga de los elementos correspondientes al hormigón HB presentan coeficientes de variación más bajos comparados con el hormigón HA y con los elementos EN14651 y especialmente con los ensayos según norma ASTM1018 para este mismo hormigón. Dicha variación disminuye a medida que aumentan los niveles de flecha.

En la Figura 3. 24 se muestra la fisuración de los paneles circulares. Se aprecia que la fractura de este elemento es radial y divide el elemento en tres sectores.



**Figura 3. 24.** Elementos ASTM1550 fisurados, correspondientes a los hormigones: a) HI, b) HA1, HA2, c) HB1 y HB2.

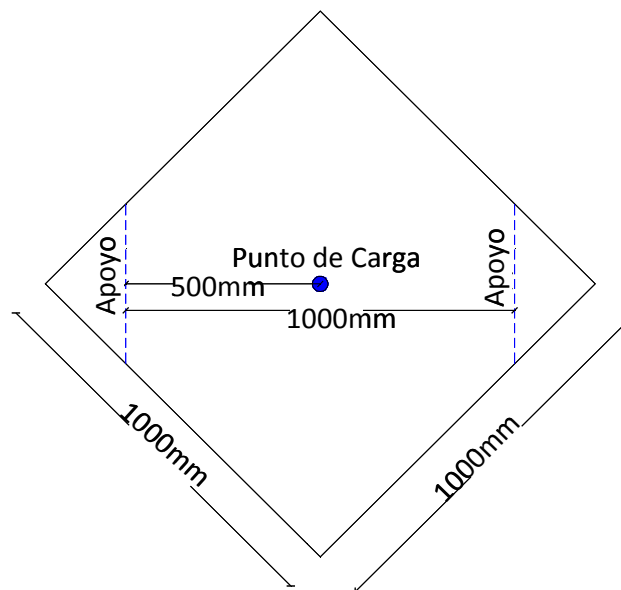


### 3.5.4. PLACA CUADRADA CON CARGA CENTRAL (PLACA 1).

El ensayo consiste en someter una placa cuadrada de HRFA a una carga central. La placa se apoya sobre dos rodillos y la carga es aplicada por medio de un pivote esférico en el centro (Figura 3. 25). Las dimensiones de la placa son 1000mm x 1000mm x 75mm. Sus apoyos están localizados sobre la diagonal del elemento (Figura 3. 26). La finalidad de este ensayo es analizar el efecto de redistribución de esfuerzos en la zona de fractura en la que la fisura se propaga.

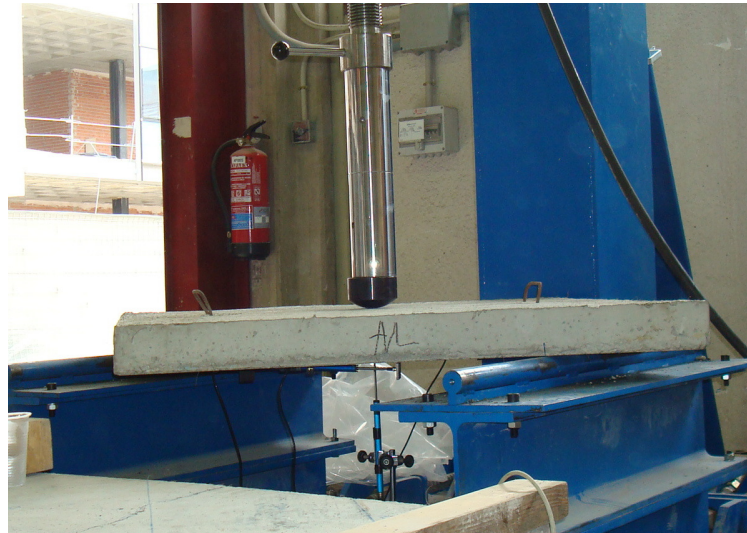


**Figura 3. 25.** Configuración de la prueba propuesta para la placa cuadrada con carga puntual en el centro.

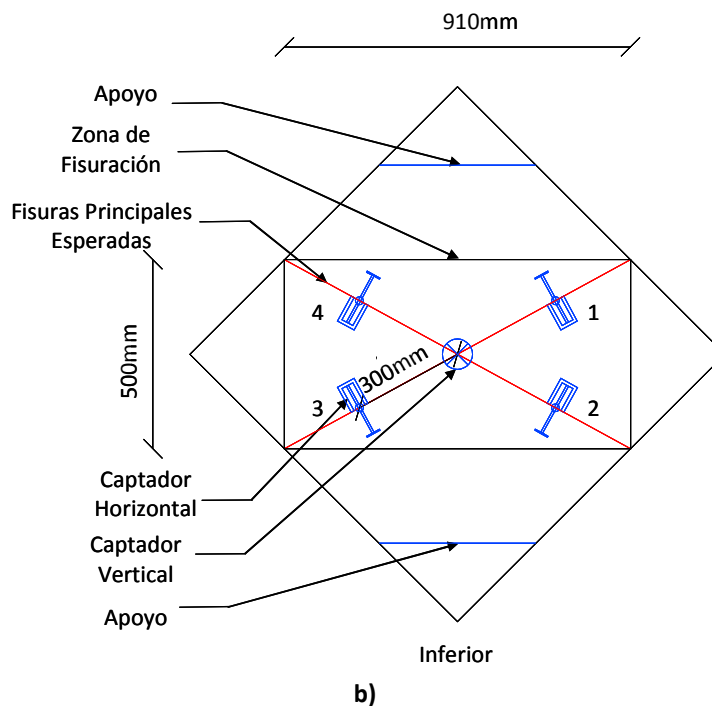


**Figura 3. 26.** Configuración de la placa cuadrada, sus apoyos y localización de la carga aplicada.

Para la instrumentación de la placa se tuvo en cuenta una zona de fisuración de 910mm x 500mm, donde se espera que se produzcan las fisuras principales. Esto da lugar a la disposición de los captadores horizontales que medirán las aberturas de fisura. Adicionalmente, se dispone de un captador vertical en el centro de la placa que registra la flecha (desplazamientos verticales) (Figura 3. 27):



a)



b)

**Figura 3. 27.** Disposición de los captadores Placa 1.

Esta configuración de captadores obedece a una optimización de la configuración inicialmente empleada para el elemento elaborado con el hormigón HI (Placa1 HI1), en el que se colocaron cinco captadores para medir la abertura de fisura sobre el eje

central del elemento y paralelo a los apoyos, y un captador central para medir la flecha (Figura 3. 28).



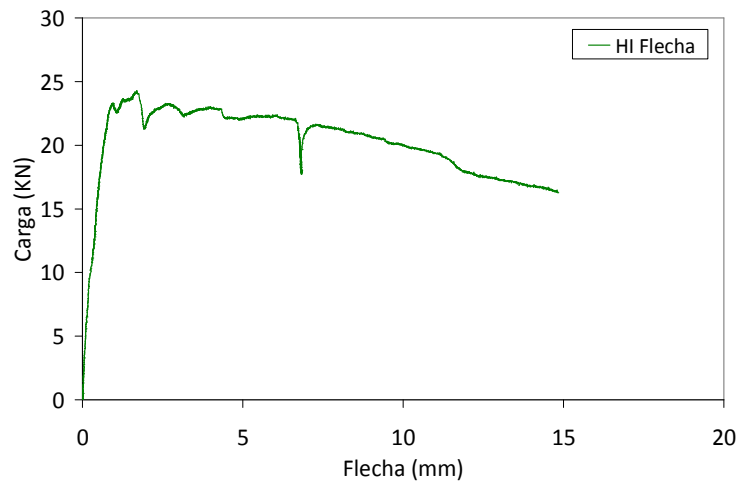
**Figura 3. 28.** Configuración de los captadores del elemento Placa 1 HI1.

Las Figuras 3. 29, 3. 30 y 3.31 muestran los resultados experimentales de la placa 1 para los hormigones HI, HA y HB, respectivamente.

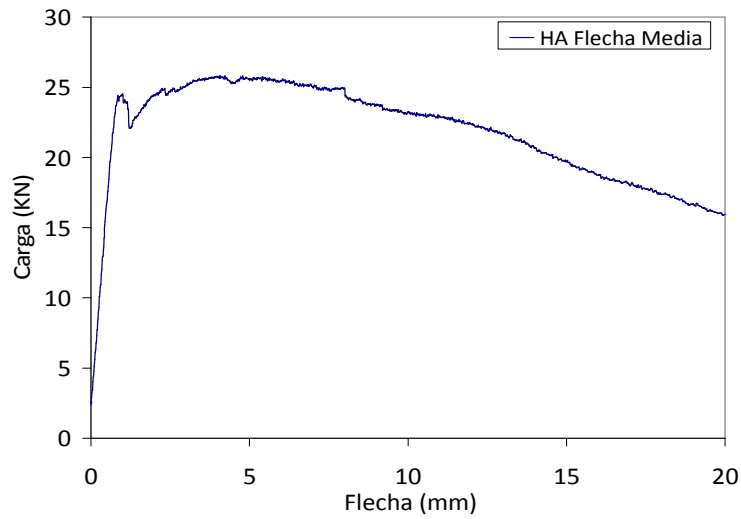
Para esta prueba se observa que el tipo de rotura es más dúctil que el detectado en los ensayos anteriores, y el inicio de la etapa de ablandamiento se produce para mayores niveles de flecha. El efecto de la mayor sección de rotura y del tipo de rotura evolutivo quedan patentes.

Los hormigones HI y HA muestran una capacidad mecánica y comportamiento post-fisuración similar, aunque el hormigón HA sigue siendo ligeramente más frágil. El hormigón HB presenta una fisuración frágil, pero un comportamiento fisurado fácil de controlar para niveles de fisuración altos.

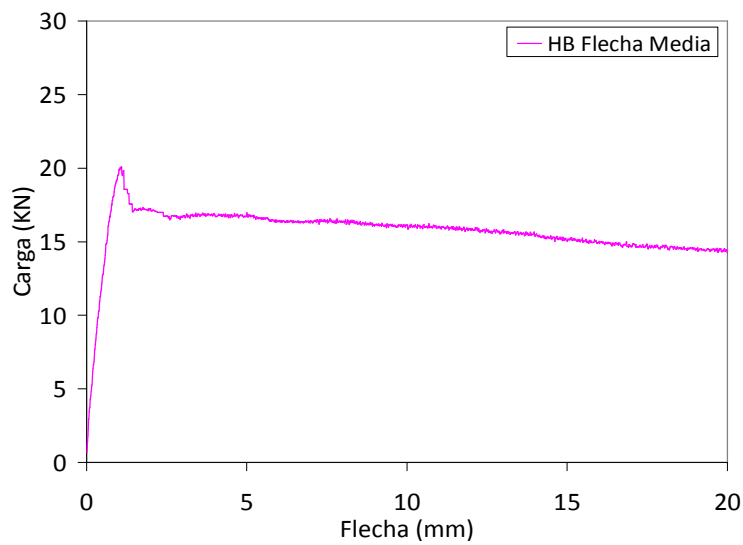
Las Tablas 3. 35, 3. 36 y 3. 37 presentan la capacidad de disipación de energía del hormigón HI, HA y HB, respectivamente, para la placa 1. Se obtuvo la energía correspondiente a la primera fisura (PF), y a diferentes flechas (1mm, 2mm, 4mm, 6mm, 8mm y 10mm).



**Figura 3. 29.** Curva carga-flecha experimental de la probeta HI1, placa 1.



**Figura 3. 30.** Curva media carga-flecha experimental de las probetas HA1 y HA2, placa 1.



**Figura 3. 31.** Curva media carga-flecha experimental de las probetas HB1 y HB2, placa 1.

**Tabla 3. 35.** Energías de la probeta del hormigón HI, Placa 1.

Flecha (mm)	Placa1 HI1 Energía (J)
PF	14,17
1,00	15,13
2,00	38,45
4,00	83,98
6,00	128,64
8,00	171,48
10,00	212,87

**Tabla 3. 36.** Energías de las probetas del hormigón HA, placa 1.

Flecha (mm)	Placa1 HA1 Energía (J)	Placa1 HA2 Energía (J)	Media (J)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	14,46	12,69	13,58	1,25	9,22
1,00	14,92	16,57	15,75	1,17	7,41
2,00	35,20	42,97	39,09	5,49	14,06
4,00	78,92	100,02	89,47	14,92	16,68
6,00	123,91	157,26	140,59	23,58	16,77
8,00	169,67	211,84	190,76	29,82	15,63
10,00	214,70	261,60	238,15	33,16	13,93

**Tabla 3. 37.** Energías de las probetas del hormigón HB, placa 1.

Flecha (mm)	Placa1 HB1 Energía (J)	Placa1 HB2 Energía (J)	Media (J)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	12,78	14,24	13,51	1,03	7,64
1,00	11,73	12,22	11,98	0,35	2,89
2,00	27,32	32,36	29,84	3,56	11,94
4,00	56,19	70,73	63,46	10,28	16,20
6,00	85,14	108,48	96,81	16,50	17,05
8,00	113,73	145,39	129,56	22,39	17,28
10,00	142,24	181,62	161,93	27,85	17,20

Los coeficientes de variación de los hormigones HA y HB son similares y aumentan a medida que se incrementan los niveles de flecha. La Tablas 3. 38, 3. 39 y 3. 40 presentan los valores de carga de los hormigones HI, HA y HB, respectivamente.

**Tabla 3. 38.** Cargas de la probeta HI, placa 1.

Flecha (mm)	Placa1 HI1 Carga (KN)
PF	23,31
1,00	22,90
2,00	21,74
4,00	22,92
6,00	22,30
8,00	21,23
10,00	20,01

**Tabla 3. 39.** Cargas de las probetas del hormigón HA, placa 1.

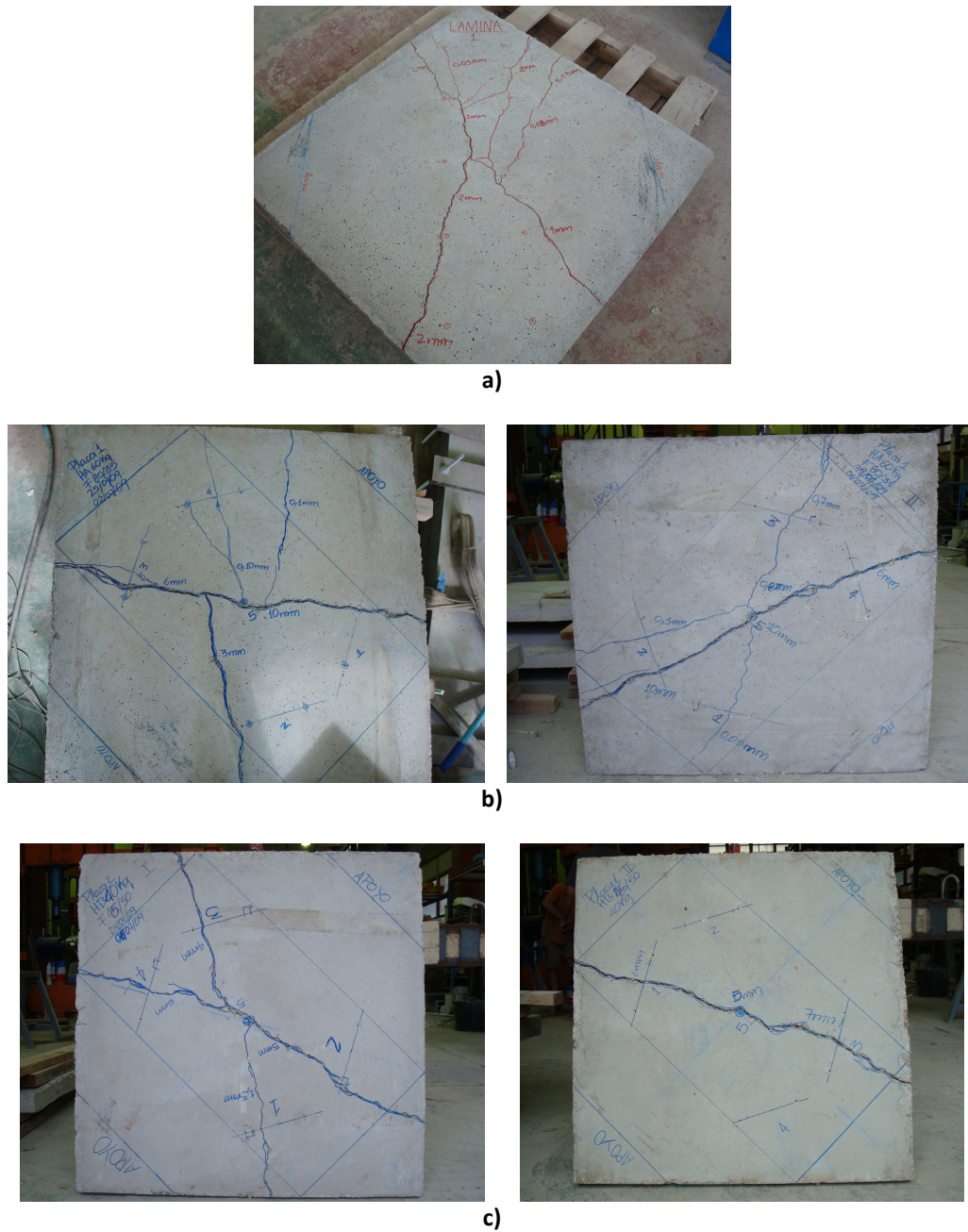
Flecha (mm)	Placa1 HA1 Carga (KN)	Placa1 HA2 Carga (KN)	Media (KN)	Desviación Estándar (KN)	Coefficiente de Variación (%)
PF	22,97	26,10	24,54	2,21	9,02
1,00	22,97	26,11	24,54	2,22	9,05
2,00	21,02	27,79	24,41	4,79	19,62
4,00	22,23	29,15	25,69	4,89	19,05
6,00	22,65	28,24	25,45	3,95	15,53
8,00	23,34	26,55	24,95	2,27	9,10
10,00	21,99	24,38	23,19	1,69	7,29

**Tabla 3. 40.** Cargas de las probetas del hormigón HB, placa 1.

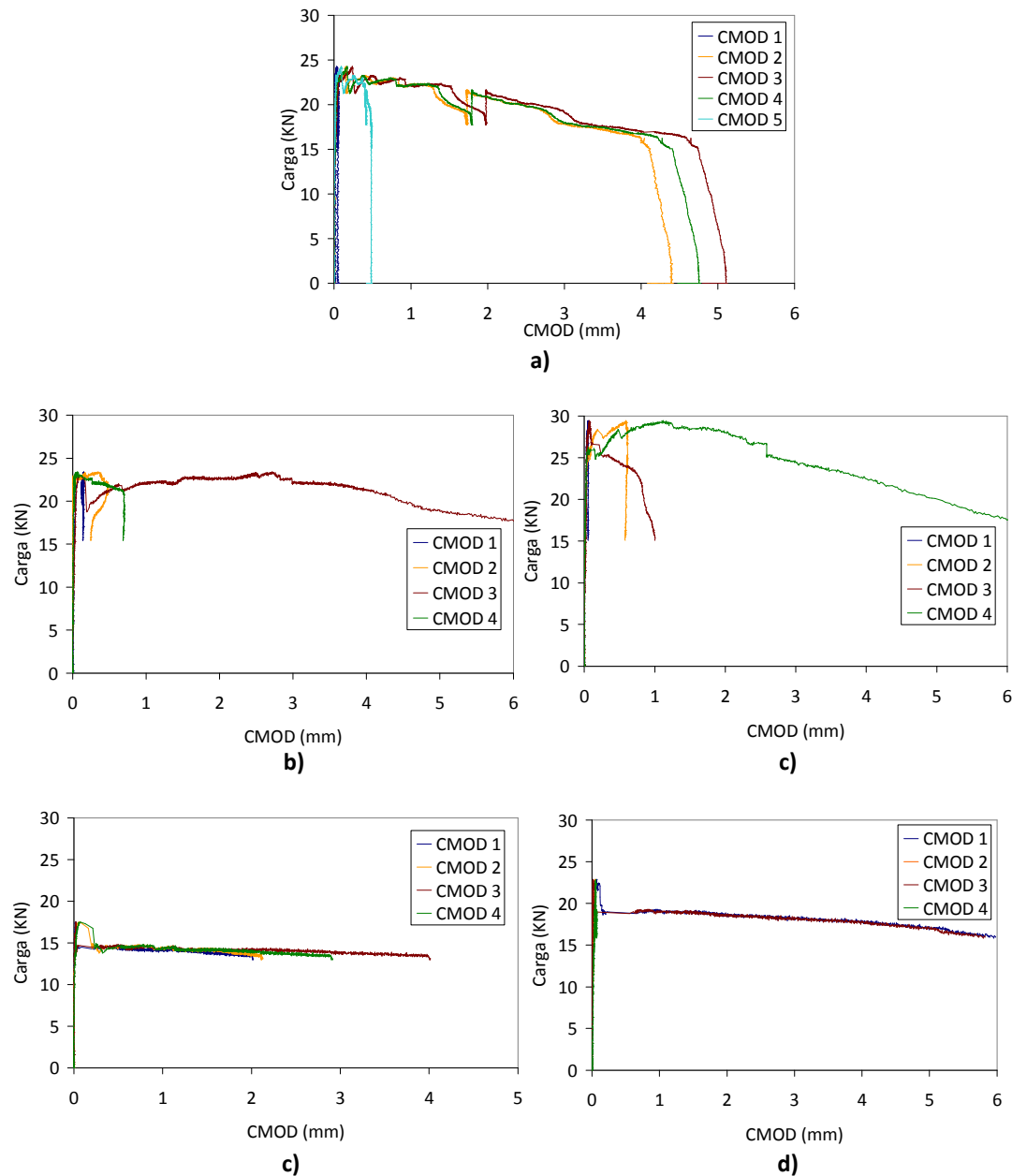
Flecha (mm)	Placa1 HB1 Carga (KN)	Placa1 HB2 Carga (KN)	Media (KN)	Desviación Estándar (KN)	Coefficiente de Variación (%)
PF	17,49	22,89	20,19	3,82	18,91
1,00	17,49	21,73	19,61	3,00	15,29
2,00	14,83	19,68	17,26	3,43	19,88
4,00	14,57	19,11	16,84	3,21	19,06
6,00	14,18	18,59	16,38	3,11	19,01
8,00	14,34	18,28	16,31	2,79	17,08
10,00	14,23	18,06	16,14	2,71	16,80

Los resultados obtenidos son claramente menos dispersos que los obtenidos en los anteriores ensayos.

La fisuración de los elementos para los hormigones HI, HA y HB se muestra en la Figura 3. 32. Las curvas carga-abertura de fisura obtenidas en los captadores inferiores para los hormigones HA y HB se presentan en la Figura 3. 33.



**Figura 3. 32.** Elementos Placa 1 fisurados, correspondientes a los hormigones: a) HI, b) HA1, HA2, c) HB1 y HB2.



**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.

Se evidencia que la fisuración del elemento es en forma de equis. El proceso de fisuración para cada uno de los elementos es descrito a continuación:

- Para el elemento HI1, los captadores 2, 3 y 4 registraron abertura de fisura, por su ubicación no sólo registraron una fisura sino varias. Los captadores 1 y 5, al estar más alejados del centro no tienen un registro claro y las fisuras principales que forman una equis no los atraviesan.



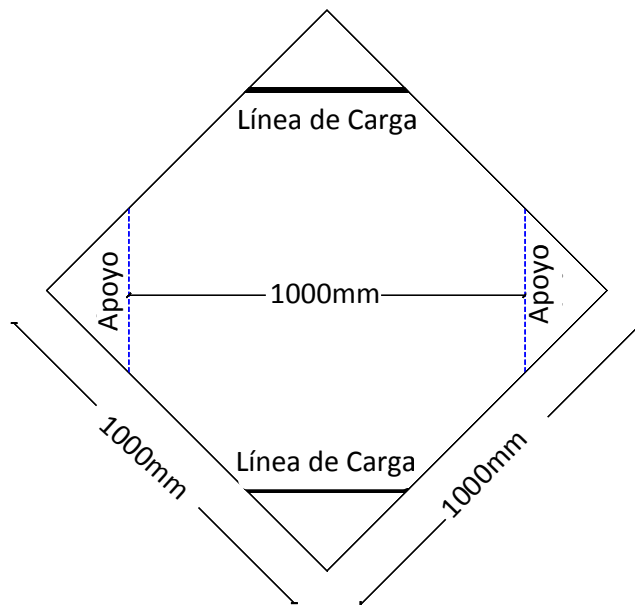
- En el elemento HA1, la fisura principal cruza los captadores 1 y 3, luego aparece la fisura que se dirige al captador 2 y, finalmente, aparece una dirigida hacia el captador 4.
- Para el elemento HA2, la fisura principal se desarrolla entre los captadores 2 y 4. Después aparece la fisura que se dirige al captador 3 y, finalmente, la dirigida al captador 1.
- En el elemento HB1, la primera fisura en aparecer es la que se dirige desde el captador 2 hacia el 3, luego la que inicia en el centro del elemento y se dirige hacia el captador 4. Por último, se presenta la fisura que va desde el centro hacia el captador 1.
- La fisuración principal en el elemento HB2 se extiende entre los captadores 1 y 3. No aparece fisura hacia los captadores 2 y 4, quizás atribuido a que el elemento no estaba perfectamente soportado en las líneas de apoyo.

### 3.5.5. PLACA CUADRADA CON CARGA EN VÉRTICES (PLACA 2).

La prueba consiste en una placa cuadrada de HRFA apoyada sobre dos rodillos y sometida a dos líneas de carga, tal como se observa en la Figura 3. 34. La dirección en el que se encuentra cargada es ortogonal a la dirección de apoyo. La placa cuadrada de HRFA tiene 1000mm de lado y 75mm de altura. Los apoyos están localizados sobre la diagonal del elemento a una distancia de 1000mm de separación (Figura 3. 35). Con este sistema de carga la zona central del elemento está sometida a momentos flectores de signo contrario en cada una de las dos direcciones perpendiculares.



**Figura 3. 34.** Configuración de la prueba propuesta para la placa cuadrada con dos líneas de carga.



**Figura 3. 35.** Configuración de los apoyos y las dos líneas de carga para la placa 2.

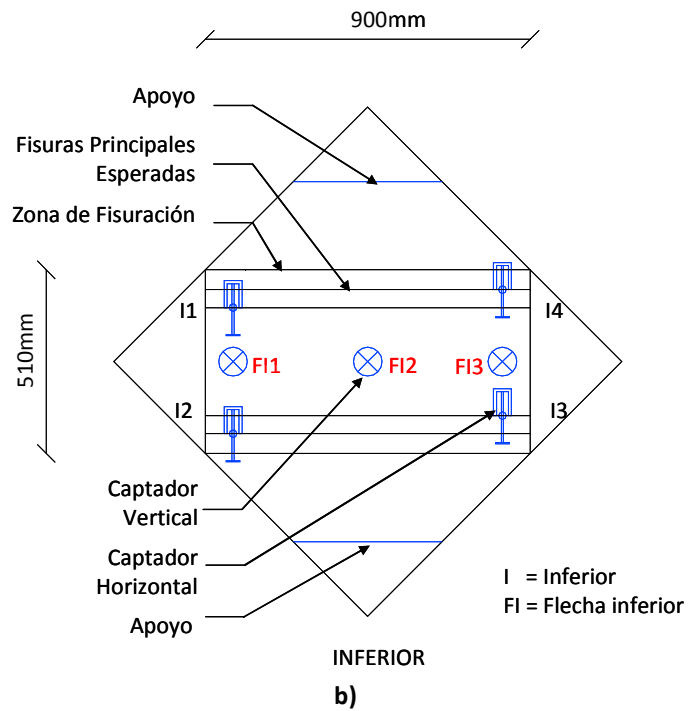
Para la instrumentación de la placa, se tienen en cuenta dos zonas de fisuración de 900mm x 510mm, en la parte inferior y superior, donde se esperan las fisuras principales. Esto da lugar a la disposición de los captadores horizontales que medirán las aberturas de fisura (CMOD).

En la zona inferior se colocan cuatro captadores horizontales y tres captadores verticales que registran la flecha (desplazamientos verticales) (Figura 3. 36). Del mismo modo, se procede con la localización de los captadores de la parte superior de la placa, donde se ubican cuatro captadores horizontales que registran la abertura de fisura (CMOD) y dos verticales para la flecha (desplazamientos verticales) (Figura 3. 37).

Esta configuración de captadores obedece a una optimización de la configuración inicialmente empleada para el elemento elaborado con el hormigón HI (Placa2 HI1), en el que se colocaron: un captador central de abertura de fisura y tres captadores de flecha en la cara inferior sobre la línea central y perpendicular a los apoyos; y en la cara superior dos captadores de abertura de fisura sobre la línea central y perpendicular a las líneas de carga (Figura 3. 38).

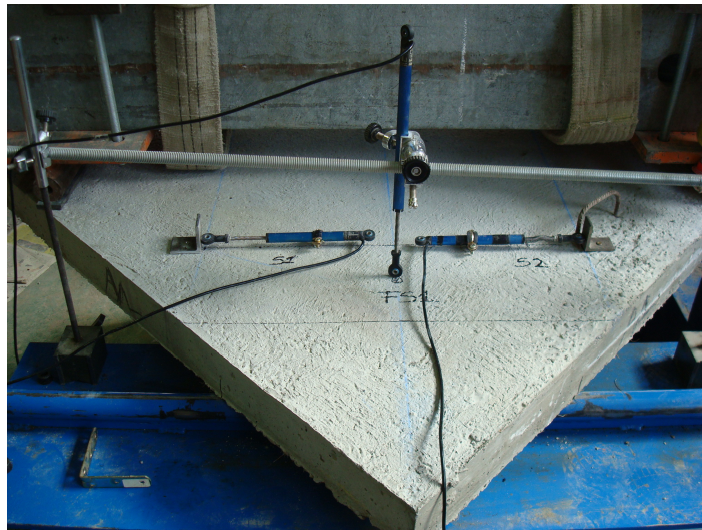


a)



b)

Figura 3. 36. Disposición de los captadores de la placa 2 en la zona inferior.



a)

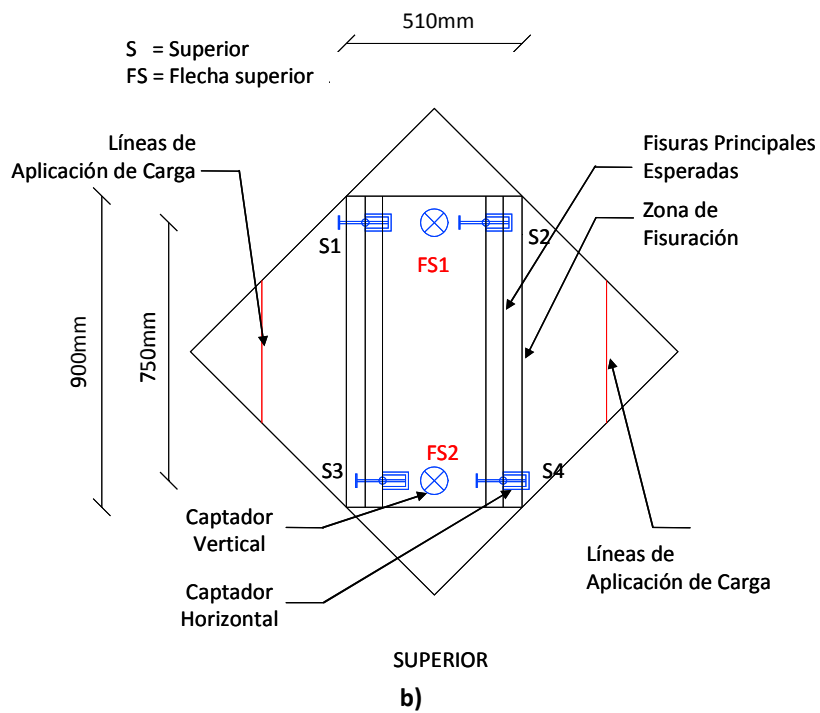


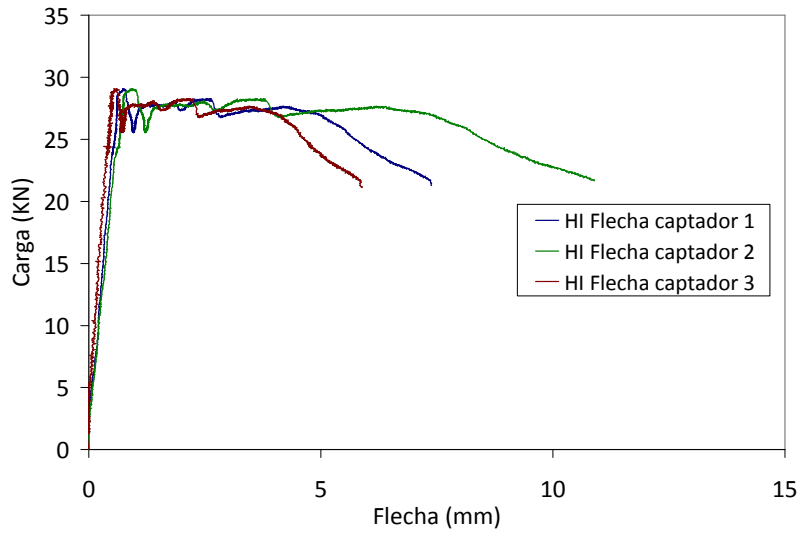
Figura 3. 37. Disposición de los captadores placa 2 en la zona superior.



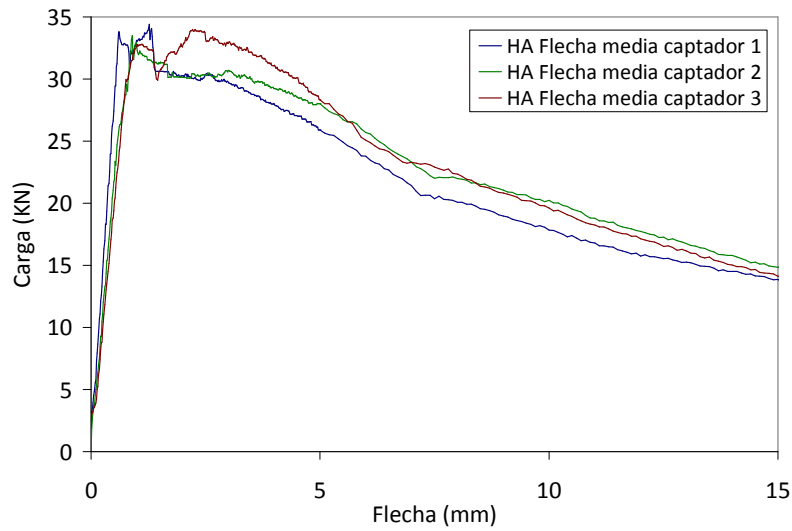
**Figura 3. 38.** Configuración de los captadores a) inferiores y b) superiores, del elemento Placa 2 HI1.

Los resultados experimentales de la placa 2 para los hormigones HI, HA y HB se presentan en las Figuras 3. 39, 3. 40 y 3. 41. Cabe aclarar que para los hormigones HA y HB se presenta la media de los resultados de las probetas HA1 y HA2, HB1 y HB2 de los captadores inferiores 1, 2 y 3.

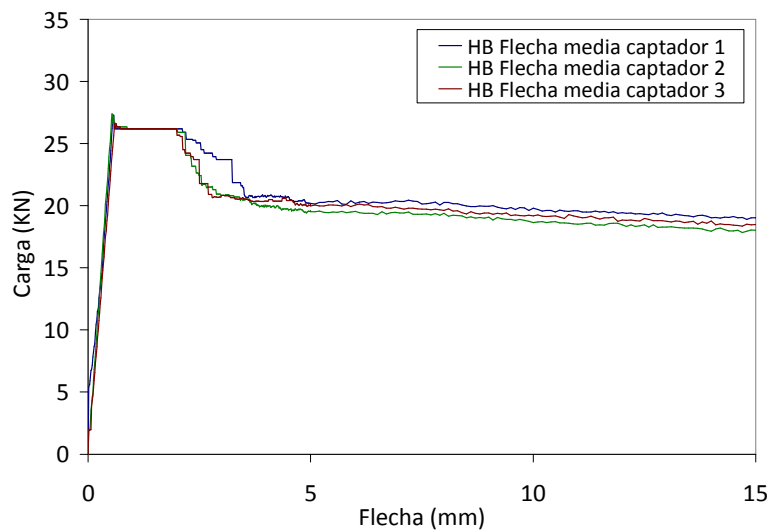
Las Tablas 3. 41 a 3. 47 presentan la capacidad de disipación de energía del hormigón HI, HA y HB para la placa 2 registrados en cada uno de los tres captadores. Se obtuvo la energía correspondiente a la primera fisura (PF), y a diferentes flechas (1mm, 2mm, 4mm, 6mm, 8mm y 10mm).



**Figura 3. 39.** Curvas carga-flecha experimentales de la probeta HI1, placa 2. Captadores inferiores.



**Figura 3. 40.** Curva media carga-flecha experimental de las probetas HA1 y HA2, Placa 2. Captadores inferiores.



**Figura 3. 41.** Curva media carga-flecha experimental de las probetas HB1 y HB2, Placa 2. Captadores inferiores.

**Tabla 3. 41.** Energías de la probeta del hormigón HI registradas en cada uno de los captadores, placa 2.

Flecha (mm)	Placa 2 HI Energía (J)		
	Captador 1	Captador 2	Captador 3
PF	9,61	16,61	12,58
1,00	22,17	18,92	18,88
2,00	49,95	46,38	47,53
4,00	104,80	102,09	102,50
6,00	-	156,53	155,53
8,00	-	210,73	-
10,00	-	259,18	-

**Tabla 3. 42.** Energías de las probetas HA1 y HA2 del hormigón HA registradas en el captador 1, Placa 2.

Flecha Captador 1 (mm)	Placa 2 HA1 Energía (J)	Placa 2 HA2 Energía (J)	Media (J)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	10,41	10,47	10,44	0,04	0,41
1,00	22,66	24,15	23,41	1,05	4,50
2,00	53,93	56,34	55,14	1,70	3,09
4,00	109,54	118,22	113,88	6,14	5,39
6,00	161,41	169,79	165,60	5,93	3,58
8,00	209,55	207,91	208,73	1,16	0,56
10,00	252,58	240,94	246,76	8,23	3,34

**Tabla 3. 43.** Energías de las probetas HA1 y HA2 del hormigón HA registradas en el captador 2, Placa 2.

Flecha Captador 2 (mm)	Placa 2 HA1 Energía (J)	Placa 2 HA2 Energía (J)	Media (J)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	9,88	17,01	13,45	5,04	37,50
1,00	22,45	17,53	19,99	3,48	17,40
2,00	51,79	50,68	51,24	0,78	1,53
4,00	109,18	113,49	111,34	3,05	2,74
6,00	165,51	167,71	166,61	1,56	0,93
8,00	219,20	207,68	213,44	8,15	3,82
10,00	269,96	241,14	255,55	20,38	7,97

**Tabla 3. 44.** Energías de las probetas HA1 y HA2 del hormigón HA registradas en el captador 3, Placa 2.

Flecha Captador 3 (mm)	Placa 2 HA1 Energía (J)	Placa 2 HA2 Energía (J)	Media (J)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	17,80	13,02	15,41	3,38	21,93
1,00	16,85	21,20	19,03	3,08	16,17
2,00	48,74	53,54	51,14	3,39	6,64
4,00	117,18	115,59	116,39	1,12	0,97
6,00	179,41	166,47	172,94	9,15	5,29
8,00	236,54	203,26	219,90	23,53	10,70
10,00	288,28	234,96	261,62	37,70	14,41

**Tabla 3. 45.** Energías de las probetas HB1 y HB2 del hormigón HB registradas en el captador 1, Placa 2.

Flecha Captador 1 (mm)	Placa 2 HB1 Energía (J)	Placa 2 HB2 Energía (J)	Media (J)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	8,81	8,08	8,45	0,52	6,11
1,00	21,27	18,42	19,85	2,02	10,15
2,00	49,62	41,95	45,79	5,42	11,85
4,00	101,86	82,70	92,28	13,55	14,68
6,00	145,65	120,94	133,30	17,47	13,11
8,00	188,11	159,57	173,84	20,18	11,61
10,00	229,89	197,53	213,71	22,88	10,71

**Tabla 3. 46.** Energías de las probetas HB1 y HB2 del hormigón HB registradas en el captador 2, Placa 2.

Flecha Captador 2 (mm)	Placa 2 HB1 Energía (J)	Placa 2 HB2 Energía (J)	Media (J)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	9,10	6,68	7,89	1,71	21,69
1,00	21,18	18,19	19,69	2,11	10,74
2,00	49,91	41,35	45,63	6,05	13,27
4,00	95,34	82,42	88,88	9,14	10,28
6,00	135,91	120,73	128,32	10,73	8,36
8,00	174,80	159,33	167,07	10,94	6,55
10,00	212,86	197,26	205,06	11,03	5,38



**Tabla 3. 47.** Energías de las probetas HB1 y HB2 del hormigón HB registradas en el captador 3, Placa 2.

Flecha Captador 3 (mm)	Placa 2 HB1 Energía (J)	Placa 2 HB2 Energía (J)	Media (J)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	9,12	7,68	8,40	1,02	12,12
1,00	20,75	16,62	18,69	2,92	15,63
2,00	49,09	40,14	44,62	6,33	14,18
4,00	96,76	78,97	87,87	12,58	14,32
6,00	139,27	117,51	128,39	15,39	11,98
8,00	180,24	155,87	168,06	17,23	10,25
10,00	220,60	193,06	206,83	19,47	9,42

Además, en las Tablas 3. 48 a 3. 54 se presentan los valores de carga correspondientes a la primera fisura (PF), y a diferentes flechas (1mm, 2mm, 4mm, 6mm, 8mm y 10mm) registradas en cada captador para los hormigones HI, HA y HB.

**Tabla 3. 48.** Cargas de la probeta del hormigón HI registradas en cada uno de los captadores, Placa 2.

Flecha (mm)	Placa 2 HI Carga (KN)		
	Captador 1	Captador 2	Captador 3
PF	28,93	29,10	29,02
1,00	27,77	29,01	26,16
2,00	28,19	27,78	27,38
4,00	27,11	26,99	27,44
6,00	-	27,45	24,31
8,00	-	26,10	-
10,00	-	22,76	-

**Tabla 3. 49.** Cargas de las probetas HA1 y HA2 del hormigón HA registradas en el captador 1, Placa 2.

Flecha Captador 1 (mm)	Placa 2 HA1 Carga (KN)	Placa 2 HA2 Carga (KN)	Media (KN)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	35,70	31,92	33,81	2,67	7,91
1,00	32,66	33,40	33,03	0,52	1,58
2,00	28,80	31,76	30,28	2,09	6,91
4,00	26,95	28,98	27,97	1,44	5,13
6,00	25,23	22,36	23,80	2,03	8,53
8,00	22,66	17,49	20,08	3,66	18,21
10,00	20,31	15,37	17,84	3,49	19,58

**Tabla 3. 50.** Cargas de las probetas HA1 y HA2 del hormigón HA registradas en el captador 2, Placa 2.

Flecha Captador 2 (mm)	Placa 2 HA1 Carga (KN)	Placa 2 HA2 Carga (KN)	Media (KN)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	30,42	35,55	32,99	3,63	11,00
1,00	30,28	34,32	32,30	2,86	8,84
2,00	28,94	31,30	30,12	1,67	5,54
4,00	28,57	29,91	29,24	0,95	3,24
6,00	27,62	23,74	25,68	2,74	10,68
8,00	26,28	17,70	21,99	6,07	27,59
10,00	24,66	15,77	20,22	6,29	31,10

**Tabla 3. 51.** Cargas de las probetas HA1 y HA2 del hormigón HA registradas en el captador 3, Placa 2.

Flecha Captador 3 (mm)	Placa 2 HA1 Carga (KN)	Placa 2 HA2 Carga (KN)	Media (KN)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	31,79	35,08	33,44	2,33	6,96
1,00	31,88	33,67	32,78	1,27	3,86
2,00	33,96	31,63	32,80	1,65	5,02
4,00	33,24	28,98	31,11	3,01	9,68
6,00	28,93	21,23	25,08	5,44	21,71
8,00	27,58	17,09	22,34	7,42	33,21
10,00	24,36	14,85	19,61	6,72	34,30

**Tabla 3. 52.** Cargas de las probetas HB1 y HB2 del hormigón HB registradas en el captador 1, Placa 2.

Flecha Captador 1 (mm)	Placa 2 HB1 Carga (KN)	Placa 2 HB2 Carga (KN)	Media (KN)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	30,55	24,04	27,30	4,60	16,86
1,00	28,63	23,76	26,20	3,44	13,15
2,00	28,63	23,76	26,20	3,44	13,15
4,00	22,53	18,93	20,73	2,55	12,28
6,00	21,16	19,22	20,19	1,37	6,79
8,00	21,33	19,19	20,26	1,51	7,47
10,00	20,75	18,86	19,81	1,34	6,75

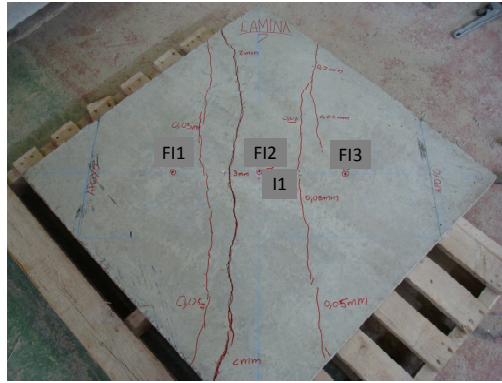
**Tabla 3. 53.** Cargas de las probetas HB1 y HB2 del hormigón HB registradas en el captador 2, Placa 2.

Flecha Captador 2 (mm)	Placa 2 HB1 Carga (KN)	Placa 2 HB2 Carga (KN)	Media (KN)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	30,26	24,05	27,16	4,39	16,17
1,00	28,63	23,76	26,20	3,44	13,15
2,00	28,63	23,76	26,20	3,44	13,15
4,00	21,01	18,89	19,95	1,50	7,51
6,00	19,83	19,24	19,54	0,42	2,14
8,00	19,40	19,37	19,39	0,02	0,11
10,00	18,74	18,54	18,64	0,14	0,76

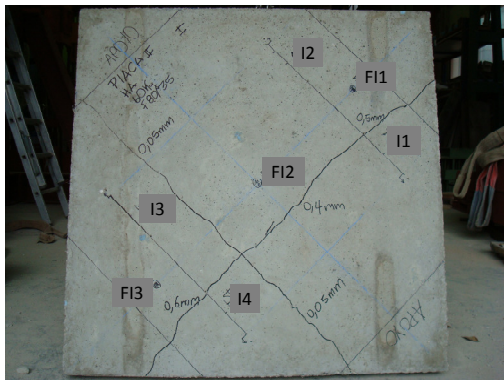
**Tabla 3. 54.** Cargas de las probetas HB1 y HB2 del hormigón HB registradas en el captador 3, Placa 2.

Flecha Captador 3 (mm)	Placa 2 HB1 Carga (KN)	Placa 2 HB2 Carga (KN)	Media (KN)	Desviación Estándar (J)	Coefficiente de Variación (%)
PF	30,55	24,05	27,30	4,60	16,84
1,00	28,63	23,76	26,20	3,44	13,15
2,00	28,63	22,70	25,67	4,19	16,34
4,00	21,84	18,87	20,36	2,10	10,32
6,00	20,74	19,36	20,05	0,98	4,87
8,00	20,41	18,82	19,62	1,12	5,73
10,00	19,92	18,45	19,19	1,04	5,42

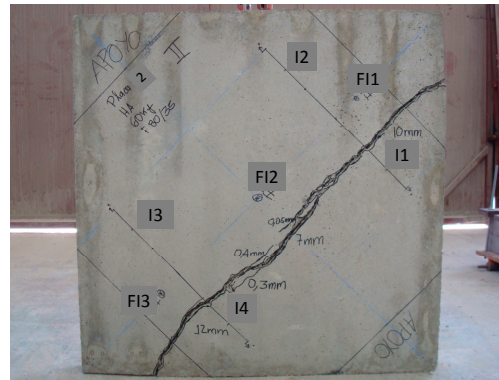
Las Figuras 3. 42 y 3. 43 muestran la fisuración de los elementos para los hormigones HI, HA y HB, vista inferior y superior, respectivamente.



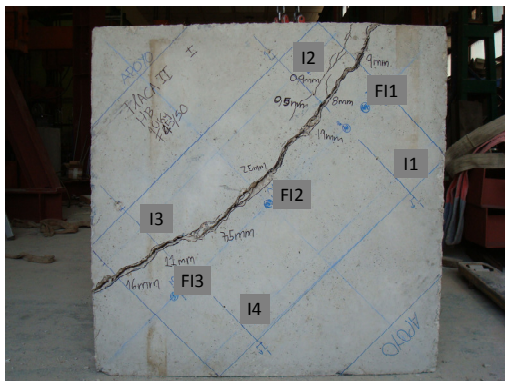
a)



b)



c)

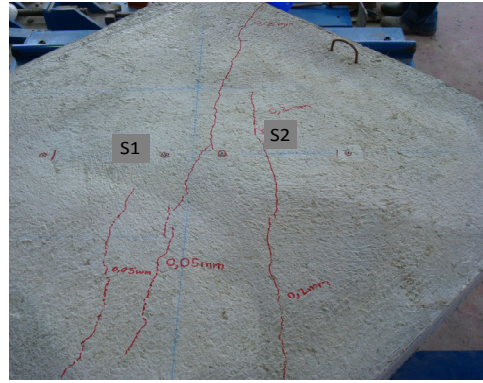


d)

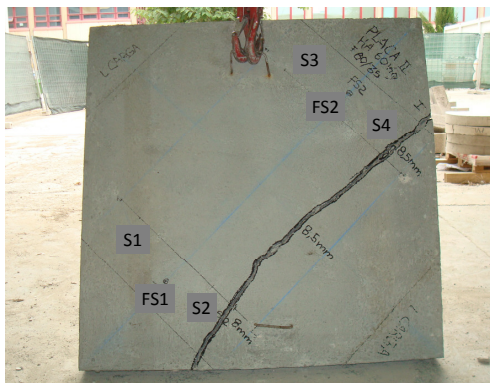


e)

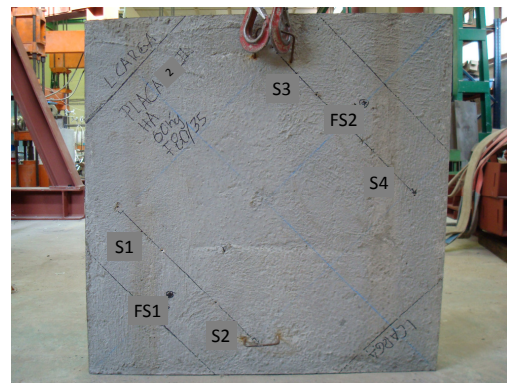
**Figura 3. 42.** Vista inferior de los elementos Placa 2 fisurados, correspondientes a los hormigones: a) HI, b) HA1, c) HA2, d) HB1 y e) HB2.



a)



b)



c)



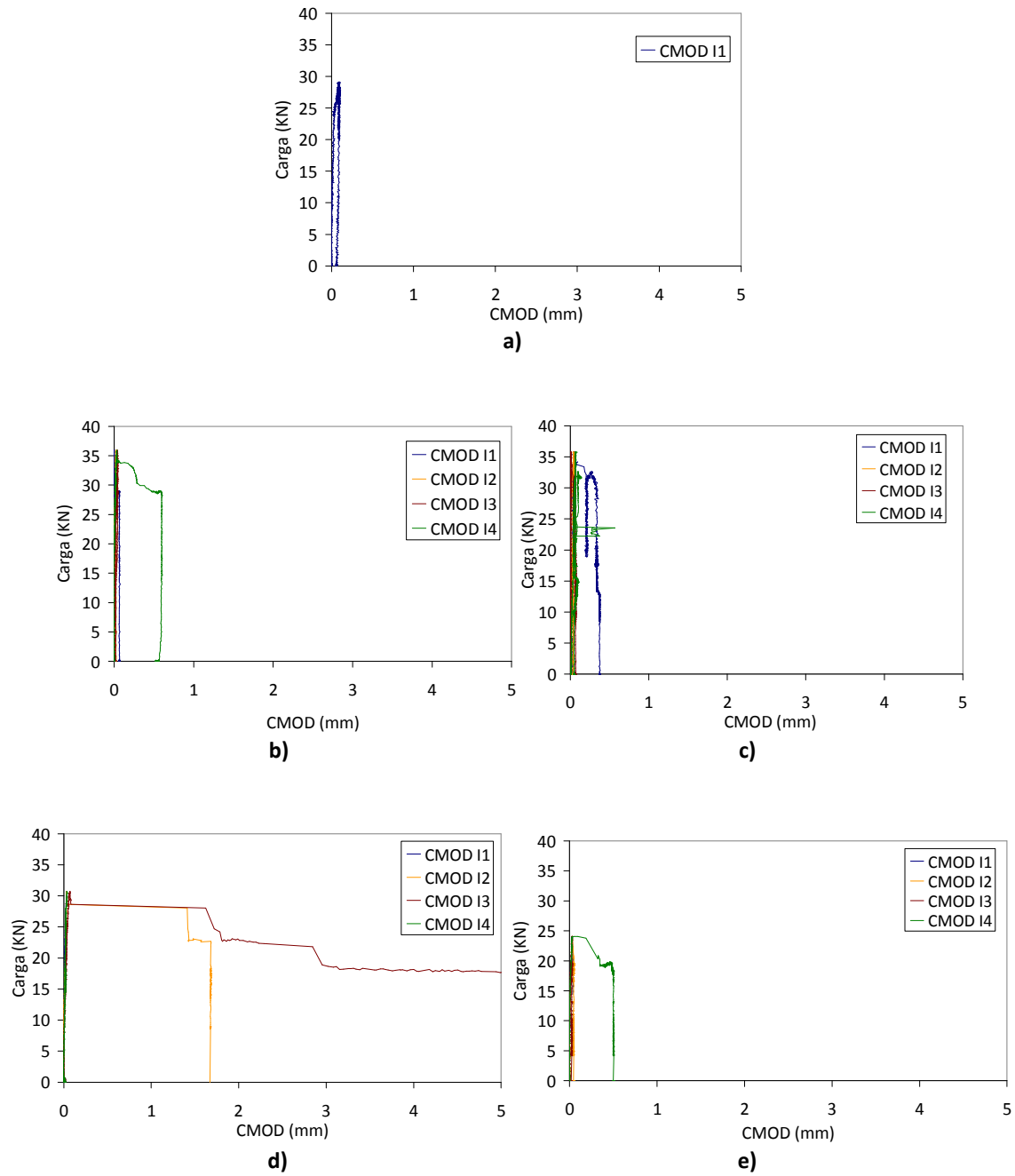
d)



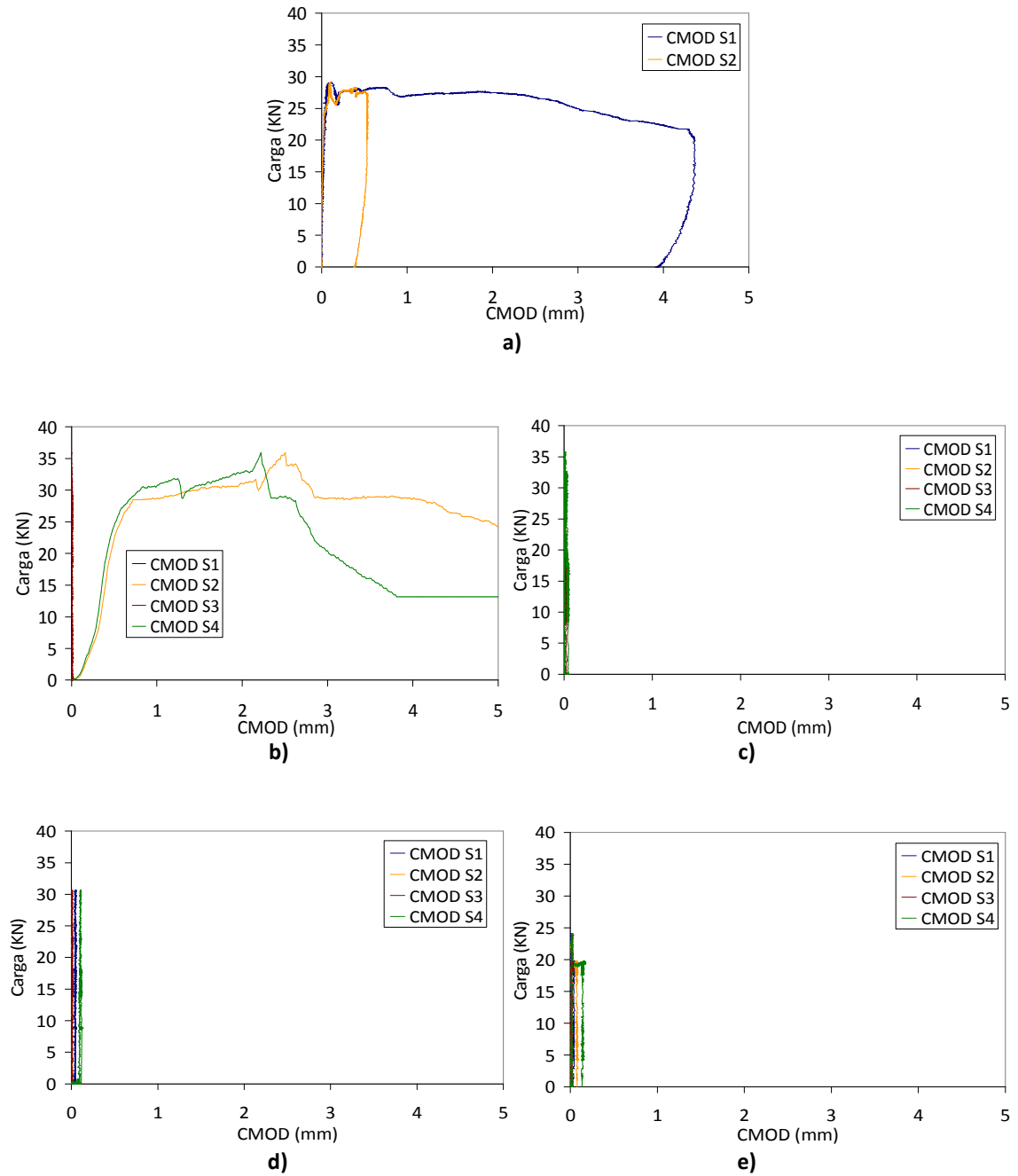
e)

**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.

Las curvas carga-abertura de fisura obtenidas en los captadores inferiores y superiores se presentan en las Figuras 3. 44 y 3. 45, respectivamente, para los hormigones HI, HA y HB. En la Figura 3. 44 se observa que ningún captador inferior registra la fisuración del elemento HI1. Algo similar sucede con los captadores superiores que no registran la fisuración de los elementos HA2, HB1 y HB2 (Figura 3. 45). Sólo uno o dos captadores registran la fisuración en cada uno de los elementos.

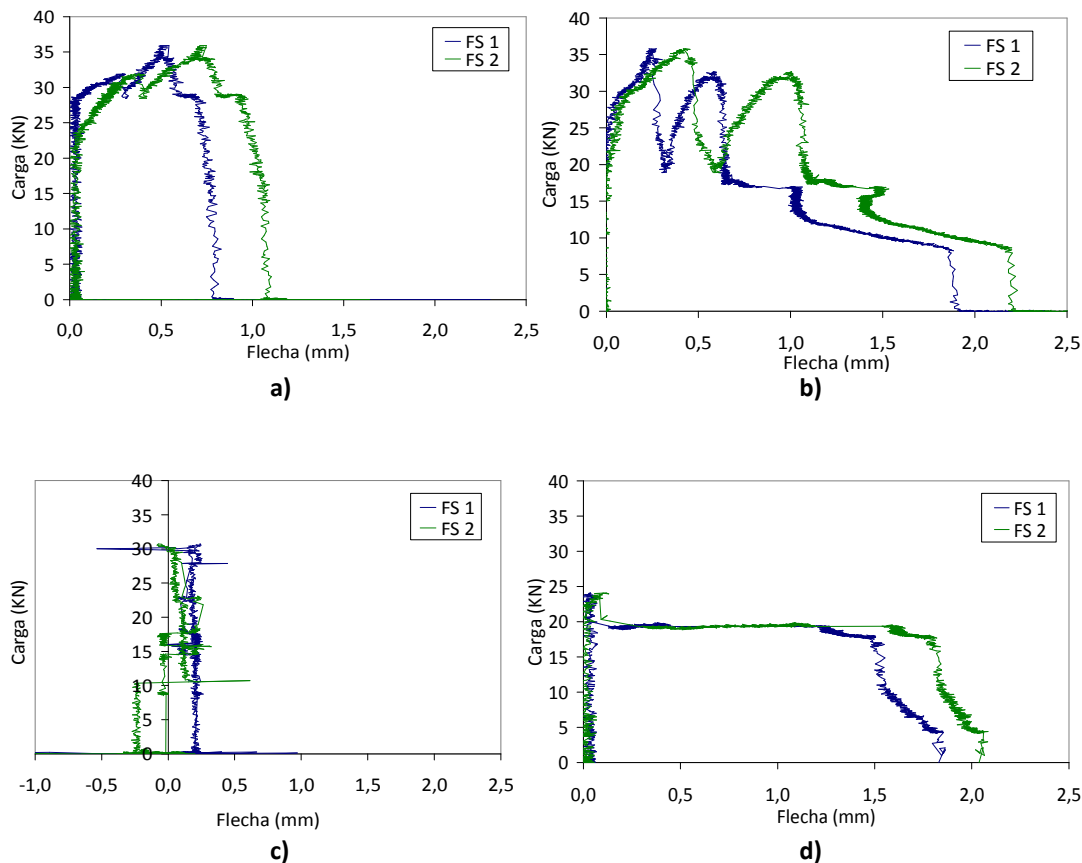


**Figura 3. 44.** Curvas carga-abertura de fisura (CMOD) de las probetas a) HI1, b) HA1, c) HA2, d) HB1 y e) HB2, placa 2. Captadores inferiores.



**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.

Adicionalmente, se muestran las curvas carga-flecha registradas en los captadores superiores para facilitar la interpretación del proceso de fractura de los elementos (Figura 3. 46).



**Figura 3. 46.** Curvas carga-flecha de las probetas a) HA1, b) HA2, c) HB1, y d) HB2, placa 2. Captadores superiores.

Como era de esperarse, los captadores superiores registran niveles bajos de flecha por estar cerca de los apoyos. Al inicio y durante el ensayo fue difícil garantizar que los elementos estuvieran perfectamente apoyados, por lo cual no presentaron el mismo patrón de fisuración.

- El elemento Placa2 HI1 presenta dos fisuras paralelas a los apoyos en la parte inferior. En la parte superior presenta otras dos fisuras paralelas a las líneas de aplicación de la carga.
- El elemento Placa2 HA1 presenta dos fisuras en la parte inferior. La primera, atraviesa los captadores I1 y I4; y la segunda, aparece de forma perpendicular a la primera. En la parte superior, se desarrolla la fisura principal y primera en aparecer, es registrada por los captadores S2 y S4.
- El elemento Placa2 HA2 sólo presenta una fisura en la parte inferior, siendo ésta la fisura principal, registrada por los captadores I1 y I4. En el registro de esta fisura se observa que no atraviesa el centro de los captadores sino que atraviesa el punto de fijación de los captadores. En la parte superior no se presenta fisuración.
- El elemento Placa2 HB1 en su parte inferior presenta una fisura que atraviesa los captadores I2 y I3, siendo ésta la fisura principal. Durante el ensayo el



captador I3 se cae ya que la fisura atraviesa su punto de fijación. En la parte superior, aparece una fisura que coincide con la que aparece en la parte inferior y no es registrada por los captadores ya que es paralela a estos.

- El elemento Paca2 HB2 en su parte inferior presenta una fisura que atraviesa el elemento pasando por el punto de fijación del captador I4 y entre los captadores I1 y I2, que no consiguen registrarla para finalmente bifurcarse en el extremo de la placa. En la parte superior, los captadores S2 y S4 registran aberturas de fisura de hasta 0,15mm.



**4**

**ESTUDIO NUMÉRICO**



## 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 4. ESTUDIO NUMÉRICO

Tal como se menciona en el capítulo anterior, el desarrollo de la investigación está compuesto por dos apartados principales: el estudio experimental y el estudio numérico (Figura 4. 1). El primero es abordado en el capítulo 3, y el segundo en el presente capítulo.



Figura 4. 1. Estructura del desarrollo de la investigación.

El estudio numérico consiste en la etapa de simulación numérica en la que se emplea el programa comercial de elementos finitos ANSYS® V.11 con el propósito de proponer un modelo numérico sencillo para el análisis de elementos de HRFA, a partir de un modelo existente para hormigón armado. Este capítulo está dividido en nueve apartados: justificación, variables, planificación, modelo propuesto, metodología, estudios preliminares, determinación de los parámetros influyentes, y profundización y análisis del efecto de los parámetros principales.

### 4.1. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO NUMÉRICO.

El planteamiento del estudio numérico obedece a la necesidad de tener un modelo numérico para el análisis de elementos y estructuras variadas de hormigón armado, eliminando la necesidad de gran número de ensayos experimentales. Para definir y ajustar el modelo propuesto, se simulan los cinco tipos de elementos ensayados en el estudio experimental: EN14651 (2005)/UNE83509 (2004), ASTM C 1018 (1997)/ASTM C 1609 (2007), ASTM C 1550 (2005), y las dos placas cuadradas.

Para la validación de la hipótesis planteada es necesario desarrollar un modelo, que es empleado para la simulación numérica de los cinco elementos propuestos. Los resultados numéricos son comparados con los experimentales, siendo necesario identificar y ajustar los parámetros que afectan el comportamiento del HRFA.

Este apartado trata las variables y los parámetros considerados del HRFA, la descripción y el programa de las simulaciones realizadas.

#### **4.2. PLANIFICACIÓN DEL ESTUDIO NUMÉRICO.**

Se plantea una estructura de descomposición de tareas (Figura 4. 2), a las que se les da un orden lógico para llevar a cabo esta etapa.



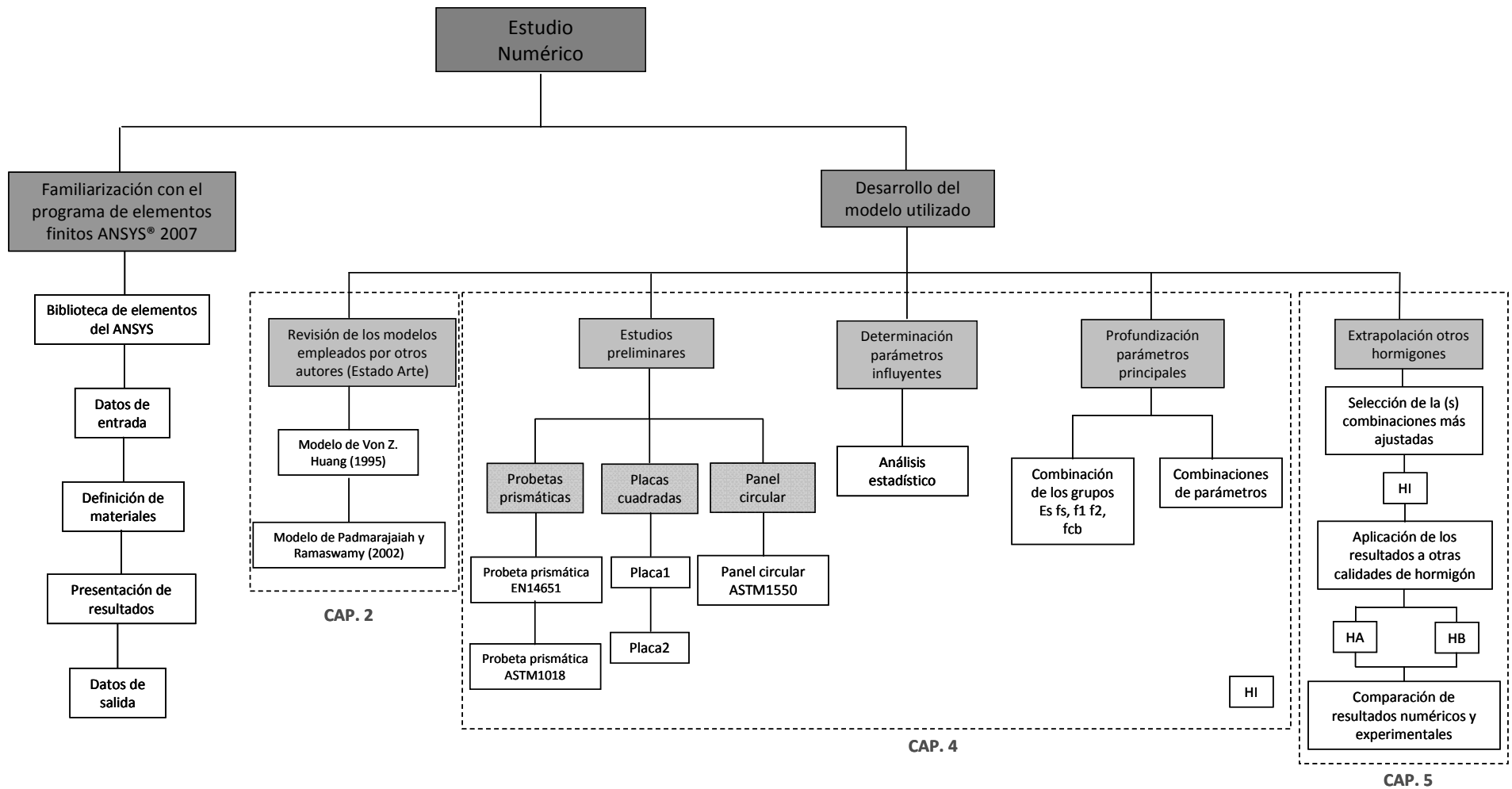


Figura 4. 2. Estructura de descomposición de tareas del estudio numérico.

### 4.3. MODELO PROPUESTO.

El modelo numérico empleado en la presente tesis doctoral se basa en los modelos propuestos por Huang (1995) y por Padmarajaiah y Ramaswamy (2002) (ambos modelos por separado se han explicado en el capítulo del estado del arte). El modelo propuesto conserva la sencillez del modelo de Huang (1995) y el concepto de relacionar la cantidad de armado equivalente ( $\rho_s$ ) con la resistencia del acero ( $f_s$ ) y la resistencia residual a flexo-tracción del HRFA ( $f_r$ ). Del segundo, se aplica el concepto de ajustar la superficie de rotura y así considerar la contribución de las fibras. La Figura 4. 3 muestra cómo se ha obtenido el modelo. Ambos autores también emplean ANSYS®.

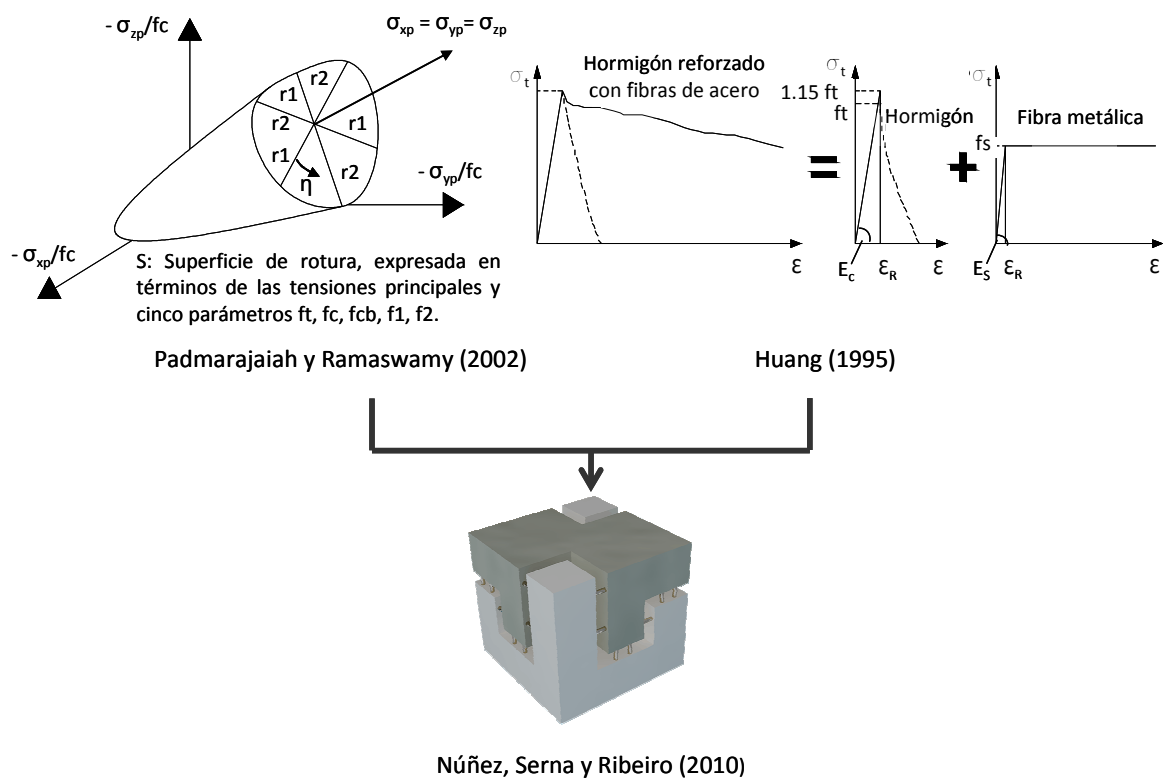


Figura 4. 3. Esquema del desarrollo del modelo.

El modelo empleado por Huang (1995) considera las curvas de comportamiento de los materiales constituyentes del HRFA por separado; es decir, el hormigón y las fibras de acero. De este modo, y por superposición se obtiene la curva de comportamiento del HRFA para estados de tracción.

En el modelo propuesto se emplea el mismo elemento finito utilizado por Huang (1995), y Padmarajaiah y Ramaswamy (2002), "SOLID65", disponible en la biblioteca de elementos del ANSYS®. Además, se considera la contribución de las fibras en el comportamiento multi-axial del hormigón modificando los parámetros definidos por

defecto del ANSYS® para el modelo constitutivo del hormigón (criterio de rotura William y Warnke, 1975).

A continuación, se describen las características del elemento finito SOLID65, y las características del modelo que son modificadas.

El **elemento finito SOLID65** es capaz de fisurarse en tracción empleando una superficie de rotura basada en el modelo constitutivo de William-Warnke (1975) para el comportamiento multi-axial de materiales frágiles (definido en el ANSYS® V.11 mediante el modelo de comportamiento "CONCRETE"). Más adelante se amplía cómo fue ajustada la superficie de rotura.

SOLID 65 posee ocho nodos con tres grados de libertad cada uno (traslaciones en las direcciones X, Y y Z). Dicho elemento permite la deformación plástica, puede fisurarse a tracción y a compresión en las tres direcciones ortogonales. Además, permite considerar el refuerzo y las propiedades no-lineales del mismo (Figura 4. 4).

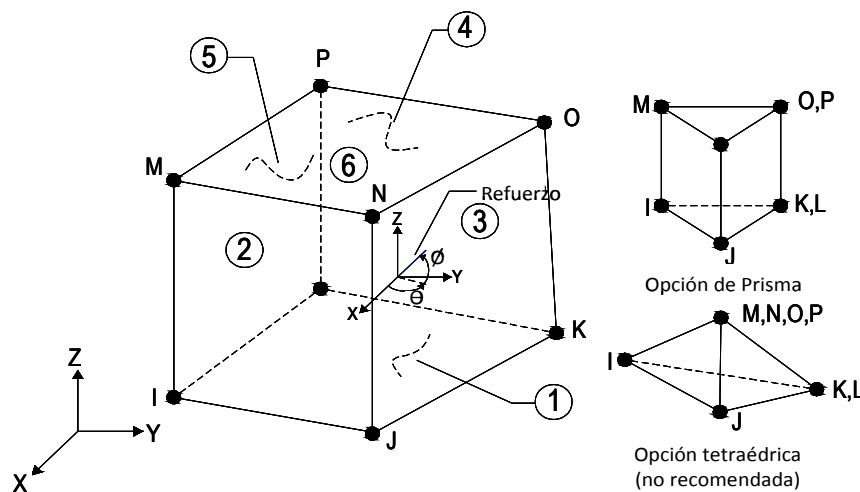


Figura 4. 4. Elemento tri-dimensional SOLID65.

La **superficie de rotura** empleada se basa en el modelo constitutivo de William-Warnke (1975) para el comportamiento multi-axial de materiales frágiles. El elemento SOLID65, incluido en la biblioteca de elementos tridimensionales del ANSYS® V.11, permite la consideración de la fisuración distribuida en tracción y su criterio de rotura se presenta como:

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \quad (4. 1)$$

Donde F es función de las tensiones principales, S es la superficie de rotura de William-Warnke (1975), y  $f_c$  es la resistencia a compresión uni-axial del material.

Si se cumple la ecuación (4.1), el material se fisurará si hay alguna tensión principal de tracción y se aplastará si todas las tensiones principales son de compresión. La superficie de rotura de William-Warnke (1975) está definida por cinco parámetros:

- La resistencia a compresión uni-axial del hormigón ( $f_c$ ).
- La resistencia a tracción uni-axial del hormigón ( $f_t$ ).
- La resistencia a compresión bi-axial del hormigón ( $f_{cb}$ ).
- La resistencia del hormigón a compresión bi-axial superpuesta en estado de tensión hidrostático ( $f_1$ ).
- La resistencia del hormigón a compresión uni-axial superpuesta en estado de tensión hidrostático ( $f_2$ ).

En el modelo propuesto, la incorporación de las fibras se simula cambiando la superficie de rotura y la respuesta tensión-deformación de este.

A los cinco parámetros que definen la superficie de rotura se les da un tratamiento especial para realizar la simulación. La resistencia a tracción uni-axial ( $f_t$ ) y a compresión del hormigón ( $f_c$ ), son obtenidos de los resultados experimentales. Los otros parámetros se obtienen en primera instancia por medio de la interpolación o extrapolación de los parámetros empleados por Padmarajaiah y Ramaswamy (2002), expresados en función de la resistencia a compresión uni-axial ( $f_c$ ) y del volumen de fibras ( $V_f$ ). Así, se procede a definir la resistencia a compresión bi-axial ( $f_{cb}$ ), la resistencia del hormigón a compresión bi-axial superpuesta a estado de tensión hidrostático ( $f_1$ ) y la resistencia del hormigón a compresión uni-axial superpuesta a estado de tensión hidrostático ( $f_2$ ).

La **adherencia** entre el refuerzo y el hormigón se considera perfecta, de acuerdo con el modelo del material definido por el ANSYS® V.11. Para simular las fisuras se definen dos coeficiente de transferencia de cortante, uno para fisuras abiertas ( $\beta_t$ ) y otro para fisuras cerradas ( $\beta_c$ ). La fisuración del hormigón se representa modificando la relación tensión deformación e introduciendo un plano de rotura normal a la superficie de la fisura. Los coeficientes de transferencia de cortante representan una reducción en la resistencia a cortante del material, que induce el deslizamiento a lo largo de la fisura.

Los coeficientes de transferencia de tensiones para fisuras abiertas ( $\beta_t$ ) y cerradas ( $\beta_c$ ), son obtenidos también por interpolación de los parámetros empleados por Padmarajaiah y Ramaswamy (2002) en función del volumen de fibras utilizado.

El elemento finito de hormigón en estado no fisurado se representa por el módulo de elasticidad  $E_c$  y la resistencia a flexo-tracción  $f_t$ . El armado equivalente queda definido por el área de sección transversal ( $A_s$ ), módulo de elasticidad ( $E_s$ ) y límite elástico equivalente ( $f_s$ ).

Se obtiene el armado equivalente en volumen del elemento finito de hormigón ( $\rho_s$ ) como:

$$\rho_s = \frac{f_r}{E_s \cdot \varepsilon_R} = \frac{f_r}{f_s} \quad (4.2)$$

Donde  $f_r$  se obtiene experimentalmente utilizando la EN-14651 (2005). Se considera el armado equivalente distribuido en las tres direcciones ortogonales que coinciden con las direcciones cartesianas.

A partir de los valores iniciales adjudicados a cada parámetro, se propone modificar aquellos parámetros que pueden influir en el modelo numérico buscando una respuesta que se adapte al conjunto de los resultados experimentales, manteniendo fijos los parámetros que definen el comportamiento básico del HRFA y que se obtienen de ensayos de control. La Figura 4. 5 sintetiza la forma de proceder para la obtención del modelo para HRFA, empleando ANSYS® V.11.

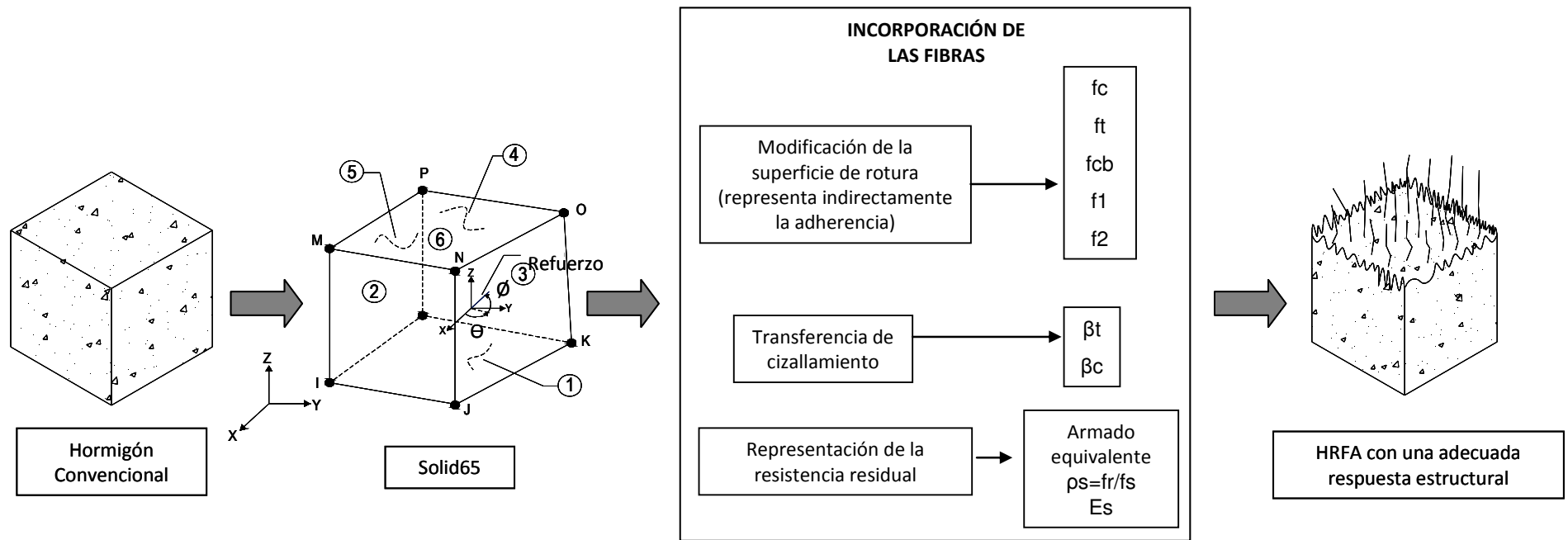


Figura 4. 5. Desarrollo del modelo empleado en ANSYS® V.11.

#### 4.4. VARIABLES Y PARÁMETROS DEL ESTUDIO NUMÉRICO.

El listado de los diferentes parámetros considerados en el desarrollo del modelo se presenta en la Tabla 4. 1; éstos parámetros son necesarios para definir la superficie de rotura del hormigón.

**Tabla 4. 1.** Parámetros considerados en el modelo.

MATERIAL	PARÁMETROS DEL ANSYS® V.11	
HORMIGÓN	Ec	Módulo de Young del hormigón
	vc	Índice de Poisson del hormigón
	$\beta_c$	Coficiente de transferencia de tensiones de cizallamiento para fisuras cerradas
	$\beta_t$	Coficiente de transferencia de tensiones de cizallamiento para fisuras abiertas
	ft	Resistencia a tracción uni-axial del hormigón
	fc	Resistencia a compresión uni-axial del hormigón
	oh	Estado de tensión en un ambiente hidrostático
	fc <sub>b</sub>	Resistencia bi-axial a compresión del hormigón
	f1	Resistencia a compresión bi-axial impuesta en un estado de tensión hidrostático
	f2	Resistencia a compresión uni-axial impuesta en un estado de tensión hidrostático
ARMADO EQUIVALENTE	Es	Modulo de Young del armado equivalente
	vs	Índice de Poisson del armado equivalente
	fs	Limite elástico del armado equivalente
	Est	Módulo tangente para el armado equivalente
	$\rho_s$	Cantidad equivalente de armado en un elemento finito de hormigón
	fr	Resistencia residual a flexo-tracción del hormigón con fibras de acero

##### 4.4.1. PARAMETROS QUE SE MANTIENEN FIJOS EN EL ESTUDIO.

Las propiedades del hormigón que son determinadas a partir de los ensayos de control se mantienen fijas para cada uno de los hormigones utilizados. El criterio seguido para fijarlos se indica a continuación particularizado para el hormigón HI.

La resistencia a compresión del hormigón ( $f_c=43,71\text{MPa}$ ) se obtiene a partir de los resultados experimentales. El hormigón sin refuerzo requiere propiedades lineales para la simulación. El módulo de elasticidad del hormigón ( $E_c$ ) y el módulo de Poisson ( $\nu_c$ ) se evalúan como:

$$E_c = 10000 \cdot \sqrt[3]{f_c} \quad (4.3)$$

$$E_c = 35225 \text{MPa}$$

El coeficiente de Poisson se asume como:

$$\nu_c = 0,2 \quad (4.4)$$

Así mismo, se mantienen como constantes en todo el estudio: el coeficiente de transferencia de tensiones de cizallamiento para fisuras cerradas ( $\beta_c=0,76$ ) y el estado de tensión en un ambiente hidrostático ( $\sigma_h = \sqrt{3} \cdot f_c$ ).

La resistencia a tracción uni-axial del hormigón ( $f_t$ ) se obtiene indirectamente de los ensayos experimentales de flexo-tracción, de acuerdo a la norma EN 14651 (2005).

$$f_t = \frac{3F_u L}{2bh_{sp}^2} \quad (4.5)$$

$$f_t = \frac{3 \cdot 17,2 \text{KN} \cdot 0,5 \text{m}}{2 \cdot 0,15 \text{m} \cdot (0,125)^2} \cdot 10^{-3}$$

$$f_t = 5,5 \text{MPa}$$

La resistencia residual a flexo-tracción del hormigón con fibras de acero ( $f_r$ ) se obtiene de los ensayos experimentales de EN14651 (2005), así:

$$f_{r,2} = \frac{3F_j L}{2bh_{sp}^2} = \frac{3 \cdot 26,99 \text{KN} \cdot 0,5 \text{m}}{2 \cdot 0,15 \text{m} \cdot (0,125)^2} = 8,64 \text{MPa} \quad (4.6)$$

Se toma  $f_{r,2}$  hasta una abertura de fisura de 1,5mm para obtener un ajuste adecuado en la zona de primera fisura y endurecimiento.

De acuerdo con el código modelo MC (2010), se asume un modelo rígido plástico, donde la resistencia a tracción resulta de suponer que la fuerza a compresión está concentrada en la parte superior de la viga y por tanto:

$$f_r = \frac{f_{r,2}}{3} = \frac{8,64 \text{MPa}}{3} = 2,9 \text{MPa} \quad (4.7)$$



El refuerzo equivalente ( $\rho_s$ ) por unidad de volumen de hormigón se fija a partir del valor  $f_s$  y  $f_r$ , como:

$$\rho_s = \frac{f_r}{f_s} \quad (4. 8)$$

También, se fija el índice de Poisson del armado equivalente ( $\nu_s=0,3$ ) y el módulo tangente del armado equivalente ( $E_s=0,3$ ).

#### 4.4.2. PARÁMETROS VARIABLES DEL ESTUDIO.

El resto de parámetros son las variables a evaluar en este trabajo. Como valores iniciales particularizados para el hormigón HI se han tomado:

Para ajustar la superficie de rotura, los parámetros: resistencia a compresión bi-axial del hormigón ( $f_{cb}$ ), resistencia a compresión bi-axial impuesta en ambiente de tensión hidrostático ( $f_1$ ) y resistencia a compresión uni-axial impuesta en ambiente de tensión hidrostático ( $f_2$ ) se definen por la interpolación o extrapolación de los parámetros usados por Padmarajaiah y Ramaswamy (2002), en función de la resistencia a compresión del hormigón y el volumen de fibras. De este modo, los valores quedan definidos así:

$$f_{cb} = 1,325 f_c \quad (4. 9)$$

$$f_1 = 4,865 f_c \quad (4. 10)$$

$$f_2 = 4,5 f_c \quad (4. 11)$$

El coeficiente de transferencia de tensiones de cizallamiento para fisuras abiertas, también es definido basado en los trabajos de Padmarajaiah y Ramaswamy (2002), como función del contenido de fibras y su valor es  $\beta_t=0.45$ .

El límite elástico del armado equivalente ( $f_s$ ) necesario para definir el refuerzo equivalente ( $\rho_s$ ), se define así:

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_R = 210000 \cdot 0,2\% = 42MPa \quad (4. 12)$$

Donde  $E_s$  es el módulo de Young de las fibras de acero y  $\varepsilon_R$  corresponde a la deformación de primera fisura para el hormigón.

#### 4.5. METODOLOGIA DEL ESTUDIO NUMÉRICO.

En este apartado se explican los pasos necesarios para el desarrollo del modelo propuesto. Comprende las siguientes fases: estudios preliminares, determinación de los parámetros influyentes y, profundización y análisis de los efectos de los parámetros principales. En estas fases se compara la curva carga-flecha experimental del hormigón HI con las obtenidas por medio de las simulaciones numéricas. Una vez ajustados los parámetros que permitan obtener una curva numérica cercana a la curva carga-flecha experimental del hormigón HI, en el siguiente capítulo se procede a utilizarlos para la simulación de los ensayos realizados con los hormigones HA y HB, y compararlos con su comportamiento experimental, es decir, se realiza una extrapolación de los resultados a otras calidades de hormigón.

Es decir que el hormigón HI es empleado como hormigón de calibración y por tanto, en las simulaciones numéricas realizadas son consideradas sus características.

La etapa de *estudios preliminares* pretende poner en marcha el modelo propuesto. Una vez terminada la etapa de estudios preliminares, se observa que hay diferencias entre los resultados experimentales y numéricos, esto sugiere que los parámetros empleados en el modelo propuesto deben ser ajustados. A continuación, se realiza la etapa de *determinación de los parámetros influyentes en el comportamiento del HRFA* por medio de un análisis estadístico que consiste en un análisis de varianza de seis parámetros que permite determinar qué parámetros son influyentes en el modelo propuesto. Cuando los parámetros influyentes son identificados se da lugar a la etapa de *profundización y análisis del efecto de los parámetros principales*.

Finalmente, en el siguiente capítulo se realiza una extrapolación de los resultados a otras calidades de hormigón, lo que consiste en emplear la o las combinaciones más ajustadas para cada elemento fabricado con el hormigón HI, definir unos parámetros en función de otros y aplicar estas combinaciones en la simulación de hormigones con otras características, en este caso los hormigones HA y HB, compararlos con su comportamiento experimental y de esta manera validar el modelo numérico propuesto.

A continuación se explican en profundidad las fases llevadas a cabo para ajustar el modelo propuesto en la presente tesis doctoral, modelo que tiene como fin último representar de forma satisfactoria la respuesta estructural del HRFA.

#### 4.6. ESTUDIOS PRELIMINARES.

La finalidad de este apartado es poner en marcha el modelo propuesto, elegir el elemento finito a emplear, identificar los parámetros necesarios para la incorporación de las fibras, establecer el tamaño de la malla a emplear en cada elemento estudiado, determinar el rango de número de pasos necesario para encontrar la convergencia de

cada elemento e identificar los elementos más complejos y que requieren más tiempo en su simulación.

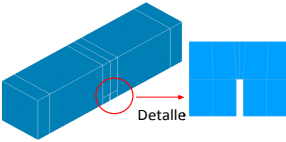
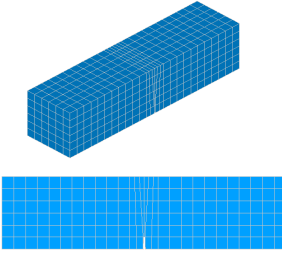
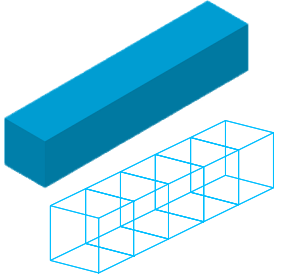
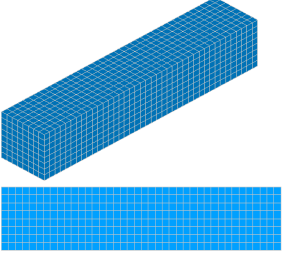
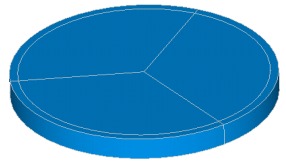
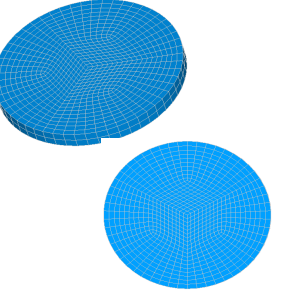
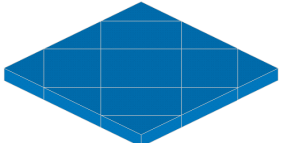
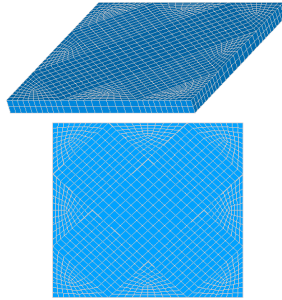
Se realizan una serie de simulaciones numéricas. Inicialmente, se simulan tres de los cinco elementos empleando el modelo propuesto y sus resultados se comparan con la simulación realizada según el criterio de Huang (1995), tal como se indica en el apartado 2.3.1. y que fue objeto de un estudio previo (Nuñez, 2008) (Tabla 4. 2). En la fase preliminar no se simulan los elementos EN14651 y la placa 2 con el modelo propuesto, debido a que demandan mucho tiempo en su desarrollo.

**Tabla 4. 2.** Planteamiento de las simulaciones.

Elementos	Simulaciones preliminares	
	Huang y criterio de rotura Von Mises	Modelo propuesto
EN14561	X	-
ASTM 1018	X	X
ASTM1550	X	X
Placa cuadrada con carga central (placa 1)	X	X
Placa cuadrada con dos líneas de carga (placa 2)	X	-

Se establece un mallado para cada uno de los elementos, que es utilizado en todas las simulaciones realizadas a lo largo del estudio numérico. La Tabla 4. 3 contiene la representación volumétrica del elemento, las dimensiones del mallado, y su representación gráfica.

**Tabla 4. 3.** Volumen y mallado de los elementos simulados.

Elemento	Volumen		Mallado	
	Dimensiones	Representación	Dimensiones	Representación
EN14651	0,15x0,15x0,6m Entalla 4x25mm		0,025x0,025x0,025m, 0,025x0,025x0,01m (zona de la entalla)	
ASTM1018	0,1x0,1x0,5m		0,0125x0,0125x0,0125m	
ASTM1550	$\varnothing = 0,8m$ $h = 0,075m$		0,04x0,04x0,0375m (desde el centro hasta donde forma un cubo aparente), De 0,04 a 0,045x0,0375m (desde el cubo aparente hasta los bordes)	
PLACA 1 Y PLACA 2	1x1x0,075m		0,05x0,05x0,0375 (parte central), variable en los extremos	

La elección del tamaño de la malla es función del tamaño del árido, de acuerdo con lo propuesto por Bazant y Oh (1983). Para el elemento EN14651, el volumen se divide en ocho tramos, el tamaño de la malla es de 0,025m (el doble del tamaño máximo del árido), y en la zona central de 0,01m, equivalente al tamaño máximo del árido, todo esto con el fin de favorecer la velocidad del análisis y la convergencia. Para la simulación del elemento ASTM1018, el volumen se divide en cinco partes, el tamaño de la malla es de 0,0125m.

El volumen del elemento ASTM1550 se divide en seis partes, de esta manera se facilita la ubicación de las restricciones y el punto de aplicación de la carga o desplazamiento. El mallado en este caso tiene dos medidas, desde el centro hasta donde forma un cubo aparente es de 0,04m, desde el cubo aparente hasta los extremos va desde 0,04 a 0,045m, con una altura de 0,035m. Estas dimensiones tienen como propósito facilitar la velocidad del análisis y la convergencia.

Las placas 1 y 2 se simulan empleando el mismo volumen y mallado. El volumen está compuesto por trece volúmenes, se divide de esta forma con el fin de facilitar la ubicación de las restricciones y el punto de aplicación del desplazamiento. Ocho triángulos componen los bordes del elemento; mientras que, los cinco restantes conforman una cruz. Esto permite un mallado por barrido más uniforme, en el que se emplea un elemento finito de 0,05m en cada dirección; de esta manera, se mejora la velocidad del análisis y la convergencia.

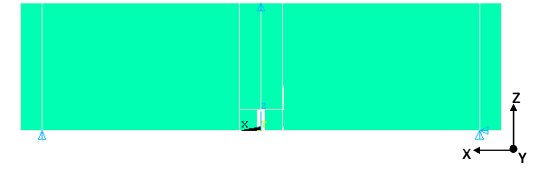

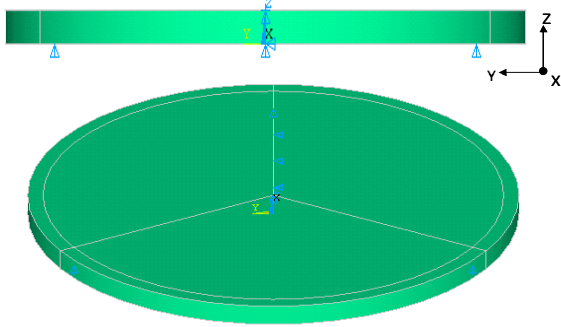
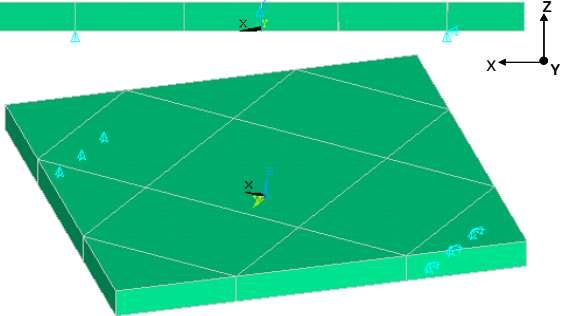
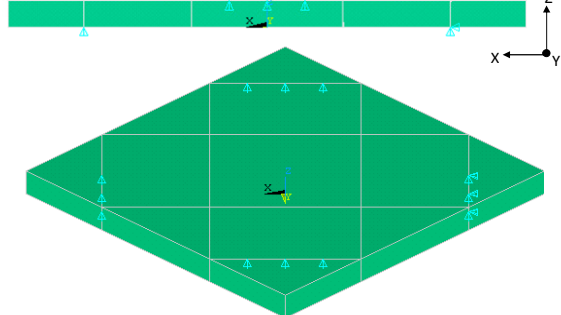
Para obtener una solución única, es necesario introducir en el modelo las restricciones de desplazamiento. Para asegurar que el modelo actúa de la misma forma que la probeta experimental, las condiciones de desplazamiento han de ser las mismas.

En las probetas EN14651 y ASTM1018, uno de los apoyos impide la translación en Z; mientras que el otro en X y Z. El eje Y es perpendicular al plano mostrado en la Tabla 4. 4. Ambas probetas se les induce un desplazamiento vertical de 4mm, para la EN14651 en el centro de la luz, y para ASTM1018 en el tercio central del elemento.

El elemento ASTM1550 se restringió de la siguiente forma: dos apoyos con restricción vertical en Z, y uno con restricción vertical en Z y horizontal en Y. Además, en el centro se indujo un desplazamiento de 4mm en dirección vertical Z y se le restringió cualquier translación sobre el eje Y (Tabla 4. 4).

En la placa 1 se restringe una línea de apoyo en dos direcciones ortogonales X y Z; mientras que, la otra línea de apoyo se restringe sólo en Z. En ambas líneas de apoyo se restringe el nodo central en Y. El desplazamiento aplicado es de 15mm. En la placa 2 se restringe la primera línea de apoyo en X y Z; y la segunda, en Z. En ambas líneas de apoyo se restringe el nodo central en Y. Se induce un desplazamiento de 22mm sobre las líneas de carga (Tabla 4. 4).

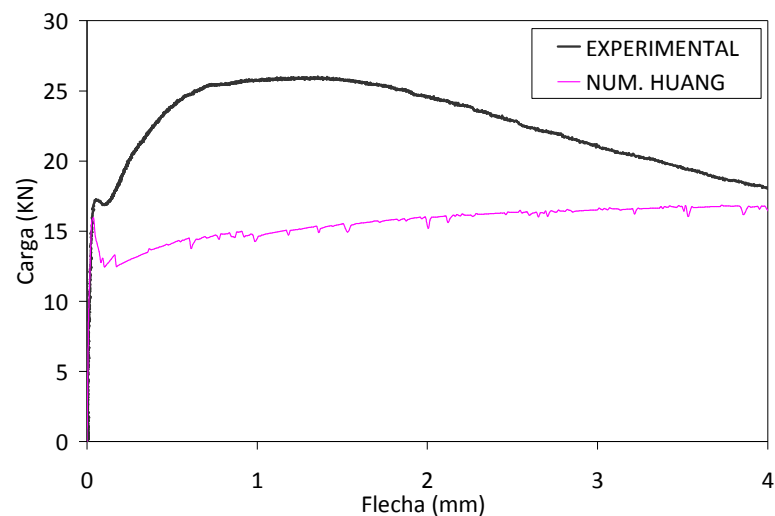
**Tabla 4. 4.** Restricciones de desplazamiento de los elementos simulados.

Elemento	Representación
EN14651	
ASTM1018	
ASTM1550	
PLACA 1	
PLACA 2	

Comparación Resultados Numéricos y Experimentales.

A continuación, se presentan los resultados para cada uno de los elementos simulados, tanto los realizados con el modelo de Huang (1995) como los realizados con el modelo propuesto; y su comparación con los datos obtenidos experimentalmente.

La Figura 4. 6 ilustra las curvas carga-flecha tanto experimentales como numéricas para el elemento EN14651. Se observa una aproximación bastante buena a la carga a primera fisura soportada por el elemento; sin embargo, la simulación no muestra una zona de endurecimiento tan pronunciado como la curva experimental en el tramo post-pico. Los principales resultados se comparan en la (Tabla 4. 5).

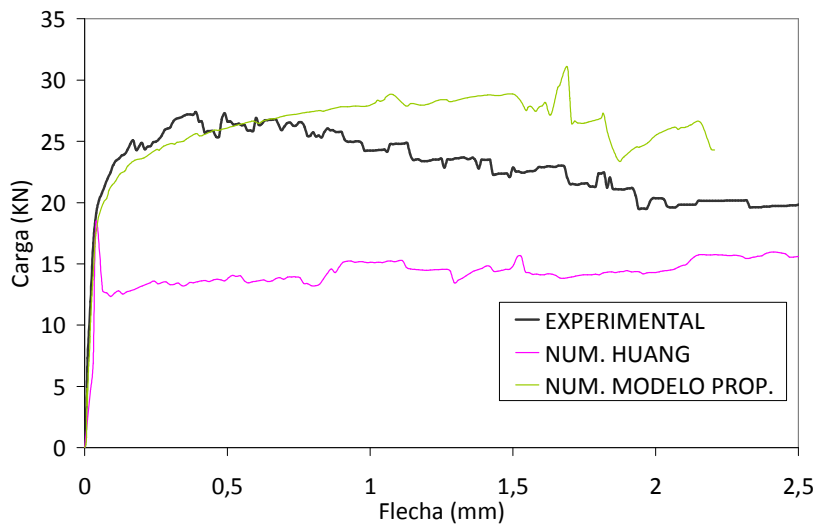


**Figura 4. 6.** Comparación de las curvas carga-flecha experimental y numérica, obtenida con el modelo de Huang (1995), EN14651.

**Tabla 4. 5.** Comparación de los datos experimentales y numéricos del ensayo propuesto por EN14651, obtenidos con el modelo de Huang (1995).

	Experimental	Modelo Huang (1995)	
		Numérico	Num/Exp
Carga a primera fisura (KN)	16,89	16,1	0,95
Flecha a primera fisura (mm)	0,05	0,03	0,60
Carga máxima soportada por el elemento (KN)	27,68	16,1	0,58
Flecha a carga máxima (mm)	0,88	4,11	4,67

Las curvas carga-flecha experimentales y numéricas para el elemento ASTM1018 se observan en la Figura 4. 7. La Tabla 4. 6 compara los principales resultados experimentales y numéricos. Se observa que la curva numérica obtenida con el modelo de Huang (1995) presenta un descenso súbito posterior a alcanzar la carga máxima. Es así como, la curva numérica obtenida con el modelo propuesto se ajusta mucho mejor a la curva experimental; el valor de carga a primera fisura es cercano al valor experimental con la diferencia que se presenta a niveles de flecha algo superiores. La mayor diferencia se presenta en cuanto al nivel de flecha en el que alcanza la carga máxima.



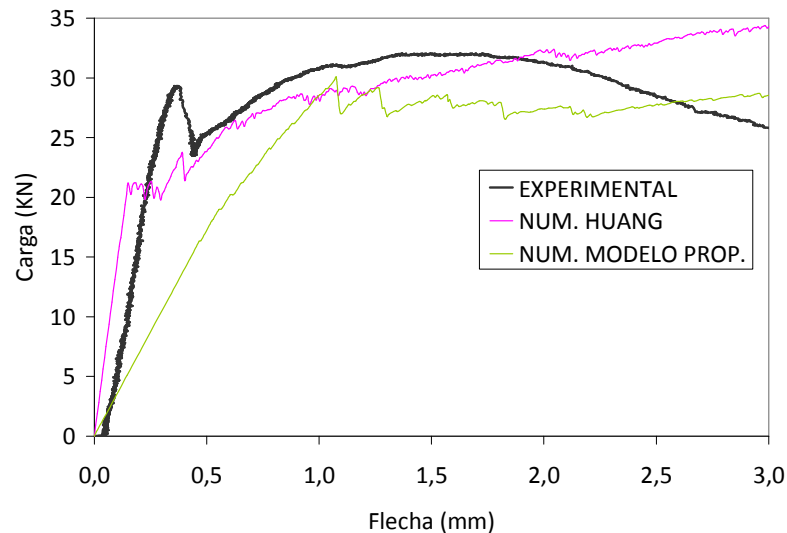
**Figura 4. 7.** Comparación de las curvas carga-flecha experimental y numéricas, obtenidas con el modelo de Huang (1995) y el modelo propuesto, ASTM1018.

**Tabla 4. 6.** Comparación de los datos experimental y numéricos, obtenidos con el modelo de Huang (1995) y el modelo propuesto, ASTM1018.

	Experimental	Modelo Huang (1995)		Modelo Propuesto	
		Numérico	Num/Exp	Numérico	Num/Exp
Carga a primera fisura (KN)	24,94	18,4	0,74	24,33	0,98
Flecha a primera fisura (mm)	0,17	0,039	0,23	0,25	1,47
Carga máxima soportada por el elemento (KN)	27,38	18,4	0,67	31,09	1,14
Flecha a carga máxima (mm)	0,39	0,039	0,10	1,68	4,31



Al comparar los resultados para el panel circular ASTM1550 se aprecia similitud en las curvas experimentales y numéricas (Figura 4. 8). Los principales resultados son comparados en la Tabla 4. 7. Se observa que la curva numérica obtenida con el modelo propuesto alcanza un valor de carga a primera fisura bastante cercano al experimental, pero a un nivel de flecha muy superior. Por su parte, la curva numérica obtenida con el modelo de Huang (1995) presenta una carga a primera fisura inferior al experimental y a un nivel de flecha más temprano. Ninguna de las dos curvas numéricas representa la pérdida de resistencia del elemento.



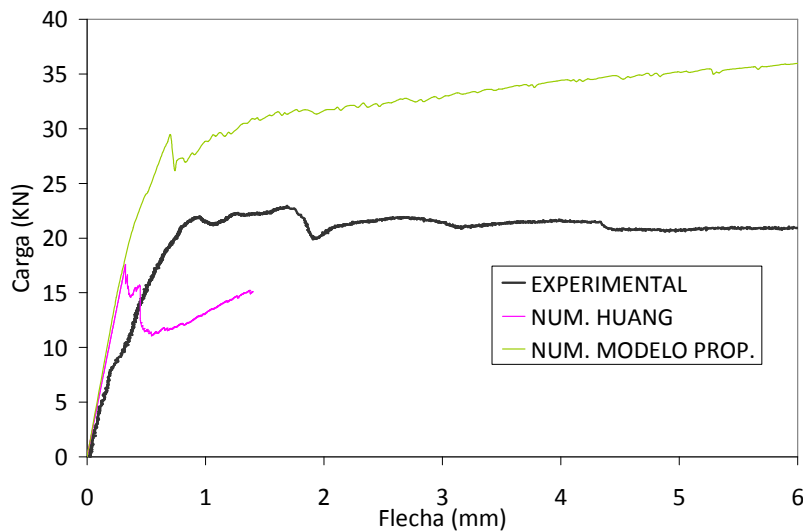
**Figura 4. 8.** Comparación de las curvas carga-flecha experimental y numéricas, obtenidas con el modelo de Huang (1995) y el modelo propuesto, ASTM1550.

**Tabla 4. 7.** Comparación de los datos experimental y numéricos, obtenidos con el modelo de Huang (1995) y el modelo propuesto, ASTM1550.

	Experimental	Modelo Huang (1995)		Modelo Propuesto	
		Numérico	Num/Exp	Numérico	Num/Exp
Carga a primera fisura (KN)	29,25	21,2	0,72	30,07	1,03
Flecha a primera fisura (mm)	0,36	0,15	0,42	1,07	2,97
Carga máxima soportada por el elemento (KN)	32,05	34,49	1,08	30,07	0,94
Flecha a carga máxima (mm)	1,49	3,02	2,03	1,07	0,72

En la Figura 4. 9 se comparan las curvas carga-flecha experimental y numéricas de la placa 1. La comparación de los principales resultados se aprecia en la Tabla 4. 8. Se observa que la curva numérica obtenida con el modelo de Huang (1995) una vez

alcanza la carga a primera fisura no evidencia endurecimiento del material y no es posible obtener resultados para flechas superiores a 1,5mm. Por su parte, la curva numérica obtenida con el modelo propuesto presenta una forma similar a la experimental, además de poder alcanzar respuesta para altos niveles de flecha; sin embargo, muestra una capacidad resistente superior a la experimental.

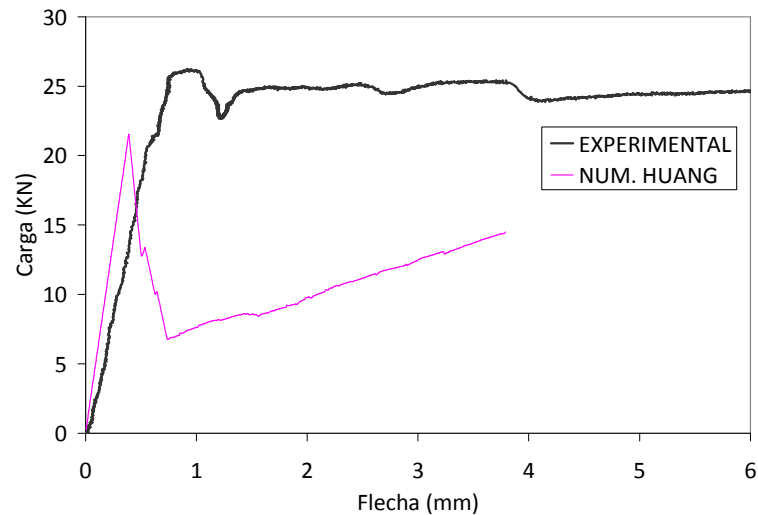


**Figura 4. 9.** Comparación de las curvas carga-flecha experimental y numéricas, obtenidas con el modelo de Huang (1995) y el modelo propuesto, placa 1.

**Tabla 4. 8.** Comparación de los datos experimentales y numéricos obtenidos con el modelo de Huang (1995) y el modelo propuesto, placa 1.

	Experimental	Modelo Huang (1995)		Modelo Propuesto	
		Numérico	Num/Exp	Numérico	Num/Exp
Carga a primera fisura (KN)	21,9	17,6	0,80	29,65	1,35
Flecha a primera fisura (mm)	0,951	0,325	0,34	1,12	1,18
Carga máxima soportada por el elemento (KN)	22,92	17,6	0,77	36,05	1,57
Flecha a carga máxima (mm)	1,69	0,325	0,19	6,01	3,56

En cuanto a las curvas carga-flecha experimental y numérica, obtenida con el modelo de Huang (1995) para la placa 2 (Figura 4. 10), se observa que ésta última una vez alcanza la carga a primera fisura presenta un descenso brusco en su capacidad de carga, además de no mostrar resultados para niveles de flecha superiores a 4mm. La comparación de los principales resultados se presenta en la Tabla 4. 9.



**Figura 4. 10.** Comparación de las curvas carga-flecha experimental y numérica, obtenida con el modelo de Huang (1995), placa 2.

**Tabla 4. 9.** Comparación de los datos experimentales y numéricos obtenidos con el modelo de Huang (1995), placa 2.

	Experimental	Modelo Huang (1995)	
		Numérico	Num/Exp
Carga a primera fisura (KN).	26,23	21,5	0,82
Carga máxima soportada por el elemento (KN.)	26,23	21,5	0,82
Flecha a primera fisura (mm).	0,98	0,39	0,40
Flecha a carga máxima (mm).	0,98	0,39	0,40

La etapa de estudios preliminares ha permitido: definir el tipo de elemento finito a emplear en la simulación y el tamaño de la malla para cada uno de los elementos analizados, adoptar los criterios de funcionamiento del programa (número de pasos y control de convergencia), y definir un modelo numérico en el que se plantean una serie de parámetros que determinan el comportamiento del HRFA.

Una vez realizados los estudios preliminares, se observa que los resultados numéricos obtenidos con el modelo propuesto en la presente tesis doctoral se semejan al comportamiento experimental de los elementos analizadas, sin embargo, es necesario ajustar los parámetros del modelo para lograr mejores resultados. Por lo tanto, se plantea un análisis estadístico para identificar los parámetros que deben modificarse.

#### 4.7. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL COMPORTAMIENTO DEL HRFA.

Una vez fijada la estructura del modelo numérico y del modelo de comportamiento del material, en este apartado se plantea analizar hasta qué punto son influyentes los distintos parámetros que definen el comportamiento del HRFA en la respuesta numérica al ser aplicados a los distintos elementos estudiados. Se actúa por tanto, modificando el valor de los parámetros que se presuponen puedan modificar la respuesta numérica.

Para ello se plantea un programa de simulaciones numéricas y el estudio de sus respuestas, estructurado por medio de un diseño de experimentos estadísticamente robusto.

Los parámetros analizados (factores del diseño) han sido:

- $E_s$  : Módulo de elasticidad del acero.
- $f_s$  : Límite elástico del acero.
- $f_{cb}$  : Resistencia bi-axial a compresión del hormigón.
- $\beta_t$  : Coeficiente de transferencia de tensiones de cizallamiento para fisuras abiertas.
- $f_1$  : Resistencia del hormigón a compresión bi-axial impuesta en un estado de tensión hidrostático.
- $f_2$  : Resistencia del hormigón a compresión uni-axial impuesta en un estado de tensión hidrostático.

El estudio se ha realizado sobre los siguientes elementos ensayados experimentalmente:

- Probeta prismática EN14651.
- Probeta prismática ASTM1018.
- Panel circular ASTM1550.
- Placa cuadrada con carga central (placa 1).

No se ha utilizado la placa 2 por los problemas de convergencia que plantea y el tiempo de ejecución, dejando su estudio para siguientes fases.

Las variables respuesta analizadas han sido la carga y la energía desde el origen correspondiente a cada nivel de flecha indicado en la Tabla 4. 10. Se asume la energía total como el área bajo la curva hasta el nivel de flecha máximo alcanzado.

**Tabla 4. 10.** Características a estudiar de cada elemento.

Probeta EN14651	Probeta ASTM1018	Panel ASTM1550	Placa 1
Niveles de Flecha	Niveles de Flecha	Niveles de Flecha	Niveles de Flecha
PF	PF	PF	PF
0,5mm	0,5mm	0,5mm	1mm
1,0mm	1,0mm	1mm	2mm
1,5mm	1,5mm	1,5mm	4mm
2,5mm	2,0mm	2,5mm	6mm
3,5mm	2,5mm	3,0mm	8mm
Energía Total	Energía Total	Energía Total	Energía Total

Cada parámetro considerado en el análisis estadístico se analiza a dos niveles o valores, que se presentan en la Tabla 4. 11. Los valores considerados en cada nivel se eligen con la idea de cubrir un amplio rango de posibilidades, y ser capaz de identificar con gran facilidad la influencia de los parámetros en el caso que esta existiera.

**Tabla 4. 11.** Niveles o valores para cada parámetro.

	Niveles	Valor numérico de cada nivel
Es (MPa)	1	20000
	2	2000000
fs (MPa)	1	30
	2	3000
fcb (MPa)	1	43,71
	2	131,13
$\beta_t$	1	0,1
	2	0,9
f1 (MPa)	1	43,71
	2	874,2
f2 (MPa)	1	43,71
	2	655,65

Por consiguiente se han mantenido fijos los parámetros: módulo de Young del hormigón ( $E_c=33000\text{MPa}$ ), índice de Poisson del hormigón ( $\nu_c=0,2$ ), coeficiente de transferencia de tensiones de cizallamiento para fisuras cerradas ( $\beta_c=0,75$ ), resistencia a tracción uni-axial del hormigón ( $f_t=0,9f_{ctl}=0,9 \times 5,5=4,95\text{MPa}$ , siendo  $f_{ctl}$  la resistencia a flexo tracción del HRFA), resistencia a compresión uni-axial del hormigón ( $f_c=43,71\text{MPa}$ ), estado de tensión en un ambiente hidrostático ( $\sigma_h=\sqrt{3} f_c$ ), índice de Poisson del armado equivalente a las fibras de acero ( $\nu_s=0,3$ ), módulo tangente para el armado equivalente a las fibras de acero ( $E_{st}=0,3$ ), cantidad equivalente de armado en

un elemento finito de hormigón que se evalúa como la cantidad  $ps=fr/fs$ , y la resistencia residual a flexo-tracción del hormigón con fibras de acero ( $fr=2,9\text{MPa}$ ).

Se elige una matriz ortogonal **L16** (Taguchi, 1988) para realizar dieciséis (16) pruebas numéricas que combinan los parámetros de acuerdo con la Tabla 4. 12 para cada uno de los elementos. Se han comparado las 16 pruebas numéricas con los resultados experimentales obtenidos del hormigón HI.

**Tabla 4. 12.** Pruebas numéricas, combinación de niveles de parámetros.

Prueba No.	Es	fs	fc <sub>b</sub>	$\beta_t$	f1	f2
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2
3	1	1	2	2	1	1
4	1	1	2	2	2	2
5	1	2	1	2	1	2
6	1	2	1	2	2	1
7	1	2	2	1	1	2
8	1	2	2	1	2	1
9	1	2	1	1	1	1
10	2	2	1	1	2	2
11	2	2	2	2	1	1
12	2	2	2	2	2	2
13	2	1	1	2	1	2
14	2	1	1	2	2	1
15	2	1	2	1	1	2
16	2	1	2	1	2	1

Al reemplazar cada valor de los niveles dados a cada parámetro, la matriz de combinación de parámetros resultantes se ilustra en la Tabla 4. 13.

Una vez realizadas las pruebas numéricas se procede a obtener las curvas carga-flecha para las dieciséis (16) combinaciones de parámetros y para cada uno de los cuatro elementos propuestos. Éstas curvas son comparadas con la curva carga-flecha experimental correspondiente a los cuatro elementos fabricados con el hormigón HI.

En el Anejo B se presentan las tablas que resumen cada combinación y los valores numéricos obtenidos de carga y energía para cada uno de los elementos analizados.

**Tabla 4. 13.** Pruebas numéricas, combinación de niveles de parámetros con sus respectivos valores numéricos.

Prueba No.	Parámetros analizados					
	Es	fs	fc <sub>b</sub>	β <sub>t</sub>	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>
1	20000	30	43,71	0,1	43,71	43,71
2	20000	30	43,71	0,1	874,2	655,65
3	20000	30	131,13	0,9	43,71	43,71
4	20000	30	131,13	0,9	874,2	655,65
5	20000	3000	43,71	0,9	43,71	655,65
6	20000	3000	43,71	0,9	874,2	43,71
7	20000	3000	131,13	0,1	43,71	655,65
8	20000	3000	131,13	0,1	874,2	43,71
9	20000	3000	43,71	0,1	43,71	43,71
10	2000000	3000	43,71	0,1	874,2	655,65
11	2000000	3000	131,13	0,9	43,71	43,71
12	2000000	3000	131,13	0,9	874,2	655,65
13	2000000	30	43,71	0,9	43,71	655,65
14	2000000	30	43,71	0,9	874,2	43,71
15	2000000	30	131,13	0,1	43,71	655,65
16	2000000	30	131,13	0,1	874,2	43,71

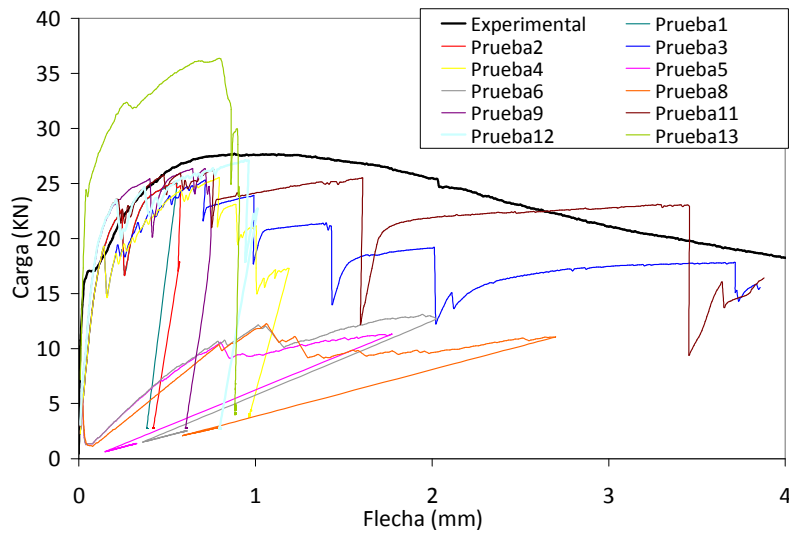
A continuación, se presentan las curvas numéricas y experimentales, y las tablas que relacionan la influencia de cada parámetro con la característica estudiada. Los resultados obtenidos para cada elemento y nivel de flecha se estudian por medio de un ANOVA (análisis de varianza) y se determina qué factor o factores pueden considerarse influyentes en el margen de variabilidad planteada. En el análisis de varianza, un p-valor menor que 0,05 establece que existe diferencia estadísticamente significativa entre los niveles del parámetro, por lo tanto, éste se considera influyente; en caso contrario, es decir, que p-valor sea mayor que 0,05 el parámetro no se considera influyente.

Así mismo, se analizan las gráficas LSD (*Least Significant Difference*) correspondiente a cada uno de los parámetros analizados para cada elemento y nivel de deformación.

#### 4.7.1. PROBETA PRISMÁTICA EN14651.

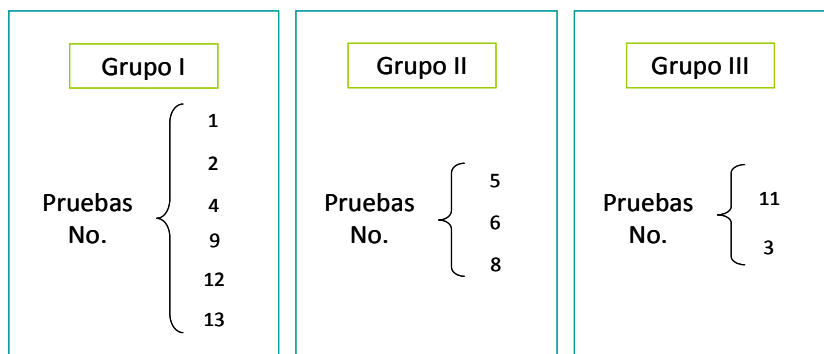
La Figura 4. 11 presenta las curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 16 combinaciones de parámetros y su comparación con la curva carga-flecha experimental para el elemento EN14651, hormigón HI. Para este elemento, las pruebas 7, 10, 14, 15 y 16 no convergen hasta el número de pasos de carga analizado y por tanto, no es posible tener una respuesta estadísticamente significativa para niveles de flecha superiores a 1,5mm.

Para este elemento en particular, es útil la representación gráfica al permitir comparar las curvas numéricas con la experimental.



**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.

Varias de las simulaciones finalizaron a niveles de flecha inferiores a los que se pretendía analizar, mostrando una reducción completa de la carga. Esto parece indicar que el programa considera que el elemento se ha agotado. Por ello, los resultados fueron clasificados en varios grupos en función del nivel de flecha alcanzado (Figura 4. 12).



**Figura 4. 12.** Grupos en los que se dividieron las pruebas numéricas, EN14651.

Los resultados de las pruebas del grupo I comprenden las combinaciones para las que se pierde el control con niveles de flecha entre 0,5mm y 1,0mm. Los resultados del grupo II llegan a niveles de flecha comprendidos entre 1,5mm y 2,5mm; posteriormente, se descontrola. Por último, las del grupo tres superan los 3,5mm cubriendo todo el ensayo.



Las Tablas 4. 14 y 4. 15 presentan los resultados del análisis de varianza ANOVA para la identificación de los parámetros más influyentes en cuanto a carga soportada y energía disipada por el elemento, respectivamente. Los valores en negrita son aquellos en los que el p-valor es inferior a 0,05, y por tanto influyentes.

**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.

EN14651						
Niveles de Flecha	Es P-valor	fs P-valor	f1 P-valor	f2 P-valor	fcB P-valor	$\beta t$ P-valor
PF*	<b>0,0009</b>	<b>0,0018</b>	0,9661	0,9661	0,8953	0,219
0,5mm*	<b>0,0013</b>	<b>0,0012</b>	0,9999	0,8899	0,7500	0,5125
1,0mm	0,1551	0,2090	0,5901	0,6708	0,9649	
1,5mm	-	-	-	-	-	-
2,5mm	-	-	-	-	-	-
3,5mm	-	-	-	-	-	-

\* Solo tienen respuesta para las pruebas 1,2,3,4,5,6,8,9,11,12,13

Solo tienen respuesta las pruebas 3, 4 5, 6, 8, 11 y 12

Solo tienen respuesta las pruebas 3, 5, 6, 8 y 11, esto no es significativo para realizar el análisis

Solo tienen respuesta las pruebas 3, 8 y 11, esto no es significativo para realizar el análisis

Solo tienen respuesta las pruebas 3 y 11, esto no es significativo para realizar el análisis

Si p-valor <0,05 hay diferencia estadísticamente significativa

**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.

EN14651						
Niveles de Flecha	Es P-valor	fs P-valor	f1 P-valor	f2 P-valor	fcB P-valor	$\beta t$ P-valor
PF*	<b>0,0006</b>	<b>0,0085</b>	0,7493	0,7493	0,0576	<b>0,0486</b>
0,5mm*	<b>0,0005</b>	<b>0,0008</b>	0,9245	0,9042	0,7605	0,4645
1,0mm	<b>0,0096</b>	<b>0,0111</b>	0,4299	0,4291	0,2493	
1,5mm	-	-	-	-	-	-
2,5mm	-	-	-	-	-	-
3,5mm	-	-	-	-	-	-
Energía Total	0,4460	0,4544	0,1870	0,5060	<b>0,0456</b>	-

\* Solo tienen respuesta para las pruebas 1,2,3,4,5,6,8,9,11,12,13

Solo tienen respuesta las pruebas 3, 4 5, 6, 8, 11 y 12

Solo tienen respuesta las pruebas 3, 5, 6, 8 y 11, esto no es significativo para realizar el análisis

Solo tienen respuesta las pruebas 3, 8 y 11, esto no es significativo para realizar el análisis

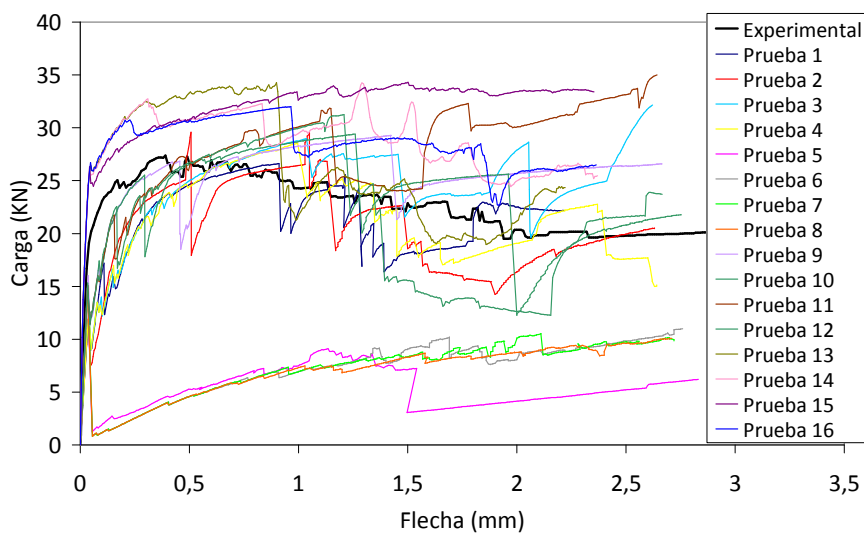
Solo tienen respuesta las pruebas 3 y 11, esto no es significativo para realizar el análisis

Si p-valor <0,05 hay diferencia estadísticamente significativa

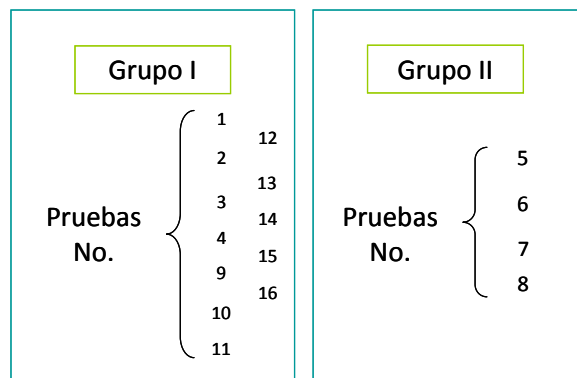
Ante carga, los parámetros  $E_s$  y  $f_s$  influyen tanto en la carga soportada a primera fisura como en un nivel de flecha de 0,5mm. En cuanto a energía disipada, los parámetros  $E_s$  y  $f_s$  influyen en la energía disipada a primera fisura (PF), y a niveles de flecha de 0,5mm y 1,0mm. Mientras que, los parámetros  $f_{cb}$  y  $\beta_t$  influyen en la energía total disipada y en la energía a primera fisura, respectivamente.

#### 4.7.2. PROBETA PRISMÁTICA ASTM1018.

La Figura 4. 13 presenta las curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 16 combinaciones de parámetros y su comparación con la curva carga-flecha experimental para el elemento ASTM1018, hormigón HI.



**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.



**Figura 4. 14.** Grupos en los que se dividieron las pruebas numéricas, ASTM1018.

Para este elemento, las pruebas presentan dos tipos de comportamiento de respuesta (Figura 4. 14). El primero presenta endurecimiento, mientras que, el segundo evidencia una clara pérdida de capacidad de carga tras la fisuración.

Este elemento tuvo respuesta numérica en todas las pruebas, por tanto, el análisis de varianza ANOVA se realiza a todas las pruebas propuestas y en todas las características estudiadas.

Los resultados del análisis de varianza ANOVA se resumen en las Tablas 4. 16 y 4. 17, en cuanto a carga soportada y energía disipada, respectivamente. Los valores en negrita son aquellos en los que el p-valor es inferior a 0.05, y por tanto influyentes.

**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.

ASTM1018						
Niveles de Flecha	Es P-valor	fs P-valor	f1 P-valor	f2 P-valor	fcB P-valor	$\beta$ t P-valor
PF	<b>0,0088</b>	<b>0,0874</b>	0,8979	0,9947	0,9751	0,9688
0,5mm	<b>0,0007</b>	<b>0,0005</b>	0,7741	0,5548	0,9396	0,8087
1,0mm	<b>0,0105</b>	<b>0,0389</b>	0,8274	0,967	0,5082	0,9385
1,5mm	<b>0,0001</b>	<b>0,0003</b>	0,6046	0,4082	0,7265	0,3722
2,0mm	<b>0,0024</b>	<b>0,001</b>	<b>0,0196</b>	<b>0,0211</b>	0,0861	0,7331
2,5mm*	<b>0,0008</b>	<b>0,002</b>	0,1244	<b>0,0299</b>	0,2828	0,9511

\* Solo tienen respuesta para las pruebas del 2 al 12

Si p-valor <0,05 hay diferencia estadísticamente significativa

**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.

ASTM1018						
Niveles de Flecha	Es P-valor	fs P-valor	f1 P-valor	f2 P-valor	fcB P-valor	$\beta$ t P-valor
PF	<b>0,0143</b>	<b>0,0198</b>	0,9889	0,9001	0,9444	0,9220
0,5mm	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	0,9617	0,9250	0,6317	0,9036
1,0mm	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	0,8963	0,8718	0,9713	0,7832
1,5mm	<b>0,0001</b>	<b>0,0005</b>	0,9049	0,8000	0,9669	0,8430
2,0mm	<b>0,0002</b>	<b>0,0008</b>	0,6626	0,6319	0,6609	0,8327
2,5mm*	<b>0,0000</b>	<b>0,0001</b>	0,0828	0,0727	0,4142	0,4769
Energía Total	<b>0,0016</b>	<b>0,0171</b>	0,7508	0,6066	0,4985	0,9698

\* Solo tienen respuesta para las pruebas del 2 al 12

Si p-valor <0,05 hay diferencia estadísticamente significativa

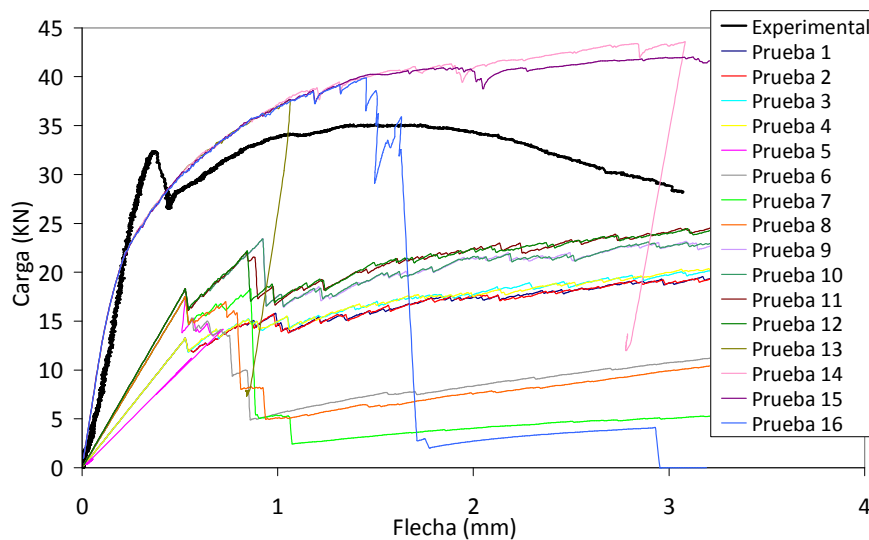
En cuanto a carga soportada por el elemento, los parámetros que tienen influencia son:

- Es y  $f_s$  influyen en primera fisura (PF), y en los niveles de flecha 0,5mm, 1,0mm, 1,5mm, 2,0mm y 2,5mm.
- $f_1$  influye en el valor de carga para flecha de 2,0mm.
- $f_2$  influye en los valores de carga para flechas de 2,0mm y 2,5mm.

En cuanto a la energía disipada por el elemento, los parámetros que tienen influencia son únicamente  $f_s$  y Es, que influyen en la energía a todos los niveles de flecha.

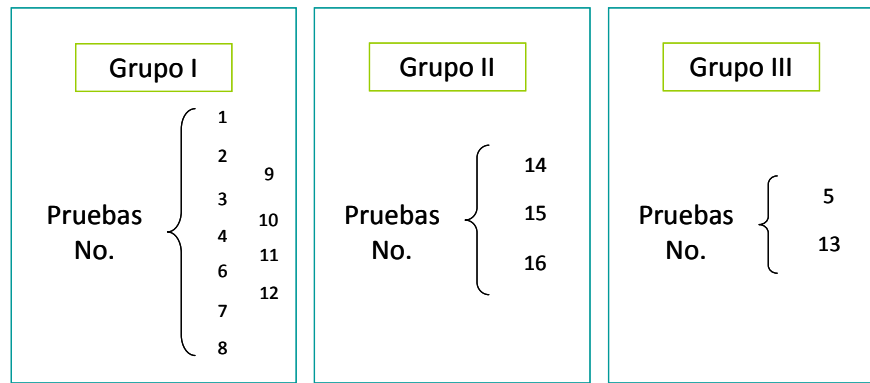
#### 4.7.3. PANEL CIRCULAR ASTM1550.

La Figura 4. 15 presenta las curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 16 combinaciones de parámetros y su comparación con la curva carga-flecha experimental para el elemento ASTM1550, hormigón HI.



**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.

En este elemento, pueden identificarse tres tipos de comportamiento de respuesta (Figura 4. 16). Las curvas correspondientes al grupo I evidencian una rigidez inferior a la del elemento ensayado experimentalmente; las del grupo II presentan un endurecimiento cercano al experimental; y las del grupo III alcanzan 1,0mm de flecha y a partir de allí presentan caída tras alcanzar la carga máxima.



**Figura 4. 16.** Grupos en los que se dividieron las pruebas numéricas, ASTM1018.

Este elemento tuvo respuesta numérica en todas las pruebas, por lo tanto, el análisis de varianza ANOVA se realiza a todas las pruebas propuestas y en todas las características estudiadas.

Los resultados de análisis de varianza ANOVA se resumen en las Tablas 4. 18 y 4. 19, en cuanto a carga soportada y energía disipada, respectivamente. Los valores en negrita son aquellos en los que el p-valor es inferior a 0,05, y por tanto influyentes.

**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.

ASTM 1550						
Niveles de Flecha	Es P-valor	fs P-valor	f1 P-valor	f2 P-valor	fcB P-valor	βt P-valor
PF	<b>0,0093</b>	<b>0,1915</b>	0,9935	0,9935	0,9969	0,9969
0,5mm	<b>0,0097</b>	<b>0,1568</b>	0,9938	0,9938	0,9971	0,9971
1mm	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	0,7355	0,7748	0,8142	0,7734
1,5mm	<b>0,0001</b>	<b>0,0003</b>	0,8813	0,8558	0,6853	0,4235
2,5mm	<b>0,0351</b>	0,1173	0,2213	0,2165	0,1683	0,1224
3,0mm	<b>0,0000</b>	<b>0,0001</b>	0,1556	0,1635	0,3498	0,6847

Si p-valor <0,05 hay diferencia estadísticamente significativa

En cuanto a carga soportada por el elemento, los parámetros que tienen influencia son:

- Es influye en los valores de carga en todos los niveles de flecha.
- fs influye en los valores de carga en casi todos los niveles de flecha.

Considerando la energía disipada por el elemento, los parámetros más influyentes coinciden con los que afectan a los de carga.

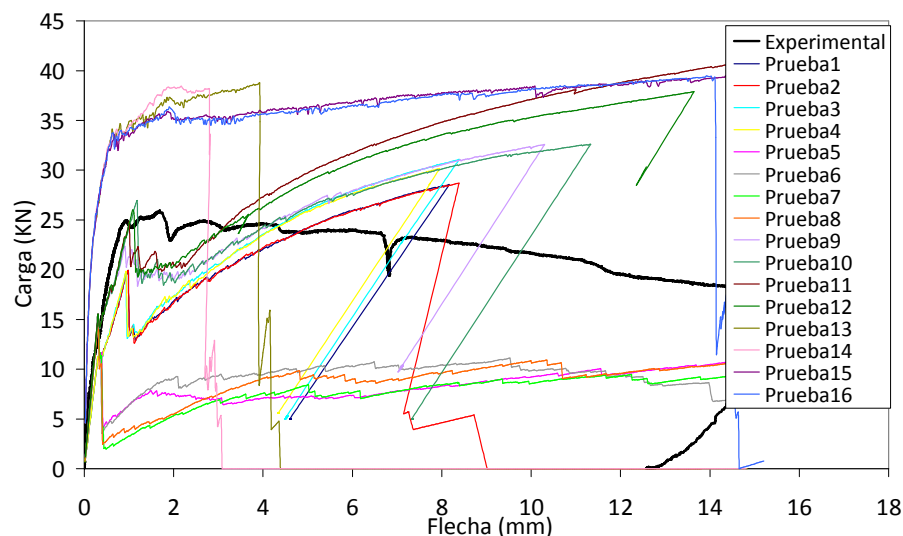
**Tabla 4. 19.** Resultados del análisis de varianza ANOVA para la identificación de los parámetros más influyentes en cuanto a energía disipada en el ensayo del elemento ASTM1550.

ASTM 1550						
Niveles de Flecha	Es P-valor	fs P-valor	f1 P-valor	f2 P-valor	fcB P-valor	$\beta t$ P-valor
PF	<b>0,0111</b>	0,0894	0,9746	0,9857	0,9908	0,9696
0,5mm	<b>0,0150</b>	0,0637	0,9944	0,995	0,9896	0,9902
1mm	<b>0,0012</b>	<b>0,0135</b>	0,6662	0,6592	0,5793	0,5512
1,5mm	<b>0,0003</b>	<b>0,0019</b>	0,264	0,2612	0,3576	0,4098
2,5mm	<b>0,0009</b>	<b>0,0053</b>	0,6596	0,6909	0,582	0,4934
3,0mm	<b>0,0002</b>	<b>0,0008</b>	0,3866	0,3849	0,3979	0,5259
Energía Total	<b>0,0367</b>	<b>0,1796</b>	0,8014	0,7903	0,5962	0,6886

Si p-valor <0,05 hay diferencia estadísticamente significativa

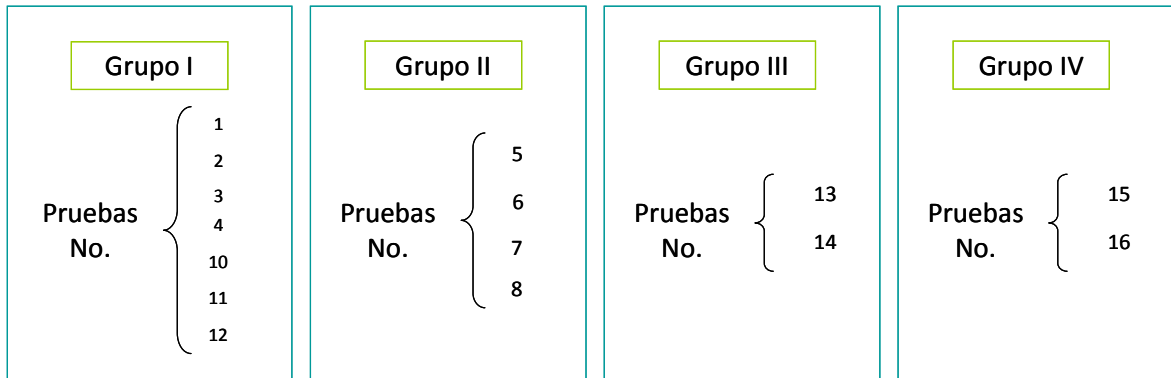
#### 4.7.4. PLACA CUADRADA CON CARGA CENTRAL (PLACA 1).

La Figura 4. 17 presenta las curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 16 combinaciones de parámetros y su comparación con la curva carga-flecha experimental para la placa 1.

**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.

Pueden identificarse cuatro tipos de comportamiento (Figura 4. 18). Las curvas correspondientes al grupo I evidencian altos niveles de endurecimiento y una pérdida descontrolada de la capacidad de carga exceptuando la prueba 11, sólo la prueba 3 y 11 superan los 12mm de flecha, las del grupo II presentan una gran pérdida de la

capacidad de carga tras la primera fisura y resistencias residuales muy por debajo de la obtenida experimentalmente, las del grupo III presentan una capacidad de carga superior a la experimental y a partir de 5mm presentan una capacidad de carga descontrolada; y las del grupo IV, a pesar de exhibir capacidades de carga superiores a las experimentales poseen un endurecimiento controlado y finalizan el ensayo superando los 14mm.



**Figura 4. 18.** Grupos en los que se dividieron las pruebas numéricas, placa 1.

Este elemento tuvo respuesta numérica en todas las pruebas, por lo tanto, el análisis de varianza ANOVA se realiza a todas las pruebas propuestas y en todas las características estudiadas.

Los resultados de análisis de varianza ANOVA se resumen en las Tablas 4. 20 y 4. 21, en cuanto a carga soportada y energía disipada, respectivamente. Los valores en negrita son aquellos en los que p-valor es inferior a 0,05, y por tanto influyentes.

**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.

PLACA 1						
Niveles de Flecha	Es P-valor	fs P-valor	f1 P-valor	f2 P-valor	fc P-valor	$\beta_t$ P-valor
PF*	<b>0,0020</b>	<b>0,0005</b>	0,8637	0,7415	0,4764	0,6125
1mm	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	0,5199	0,7216	0,1158	0,3584
2mm	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	0,6725	0,629	0,5512	0,1586
4mm	0,2591	0,4973	0,9976	0,9742	0,1111	0,1941
6mm	0,3706	0,6047	0,9627	0,9190	0,1509	0,2714
8mm	0,332	0,8422	0,8352	0,7618	0,2794	0,2508

Si p-valor < 0,05 hay diferencia estadísticamente significativa

**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.

PLACA 1						
Niveles de Flecha	Es P-valor	fs P-valor	f1 P-valor	f2 P-valor	fc P-valor	$\beta$ t P-valor
PF	<b>0,0058</b>	<b>0,0000</b>	0,9628	0,1931	<b>0,0420</b>	0,2317
1mm	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	0,9513	0,9783	0,7238	0,6864
2mm	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	0,8442	0,9525	0,5786	0,4045
4mm	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	0,4471	0,4264	0,4277	0,8846
6mm	<b>0,0011</b>	<b>0,0083</b>	0,7983	0,8205	0,1311	0,3000
8mm	<b>0,0214</b>	0,136	0,7705	0,9075	0,2297	0,2563
Energía Total	<b>0,0108</b>	0,8508	0,8615	0,9390	<b>0,0318</b>	0,3676

Si p-valor <0,05 hay diferencia estadísticamente significativa

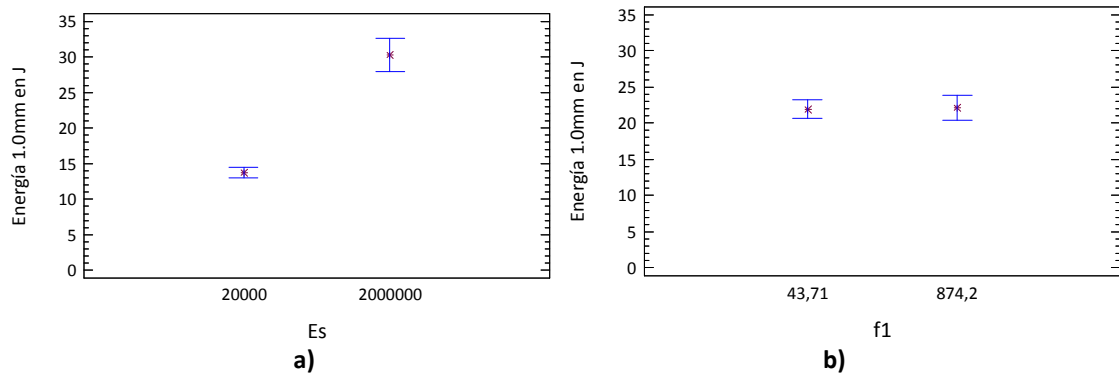
Para la placa 1 se observa que los parámetros influyentes son Es, fs y fc. Estos tres parámetros influyen en los siguientes aspectos:

- Es influye en los valores de carga a primera fisura, carga para flechas de 1mm y 2mm, energía a primera fisura, energía para flechas de 1mm, 2mm, 4mm, 6mm, 8mm y energía total.
- fc influye en la energía a primera fisura y en la energía total.
- fs influye en los valores de carga a primera fisura, carga para flechas de 1mm y 2mm, energía a primera fisura, energía para flechas de 1mm, 2mm, 4mm y 6mm.

#### 4.7.5. CONCLUSIONES PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL COMPORTAMIENTO DEL HRFA.

En las Figura 4. 19 se muestran dos ejemplos de las gráficas LSD obtenidos. Se observa que el parámetro Es es claramente significativo en la respuesta de energía en todos los niveles de flecha en la probeta EN14651, pero que el parámetro f1 no es prácticamente significativo.





**Figura 4. 19.** Valores de energía para una flecha de 1,0mm, variando los parámetros: a)  $E_s$  y b)  $f_1$ , EN14651.

En el Anejo B se muestran todos los resultados del análisis que ilustran las siguientes conclusiones. La Tabla 4. 22 resume los parámetros influyentes para los elementos considerados en el análisis estadístico para carga y energía.

**Tabla 4. 22.** Resumen de los parámetros más influyentes en la carga y energía para cada uno de los elementos analizados.

Probeta	Parámetros Influyentes					
	$E_s$	$f_s$	$f_1$	$f_2$	$f_{cb}$	$\beta_t$
EN14651	XX	XX			X?	X?
ASTM1018	XX	XX	X?	X?		
ASTM1550	XX	XX				
PLACA 1	XX	XX			X?	

XX Influencia clara.

X? Influencia sólo parcial para alguna de las variables respuesta a algún nivel de flecha.

Como conclusión, de los seis parámetros contemplados, se observó que  $f_s$  y  $E_s$  tienen una influencia fundamental en la mayoría de las respuestas analizadas. El parámetro  $\beta_t$  (coeficiente de transferencia de tensiones de cizallamiento para las fisuras abiertas) sólo tiene influencia en el elementos EN14651, puntualmente en la energía a primera fisura. Para este ensayo no se han obtenido respuestas que convergieran para todas las 16 combinaciones, y por ello no va ser considerado en el resto del estudio. Los demás parámetros son influyentes dependiendo del estado tensional del elemento analizado.

Por ello se plantea realizar un estudio pormenorizado de la influencia de los siguientes parámetros:

- $E_s$  : Módulo de elasticidad del acero.
- $f_s$  : Límite elástico del acero.
- $f_1$  : Resistencia del hormigón a compresión bi-axial impuesta en un estado de tensión hidrostático.
- $f_2$  : Resistencia del hormigón a compresión uni-axial impuesta en un estado de tensión hidrostático.
- $f_{cb}$  : Resistencia bi-axial a compresión del hormigón.

#### 4.8. PROFUNDIZACIÓN Y ANÁLISIS DEL EFECTO DE LOS PARÁMETROS PRINCIPALES.

Este apartado presenta los resultados obtenidos para cuatro de los cinco elementos analizados (EN14651, ASTM1018, placa 1 y placa 2) al fijar unos parámetros y variar otros. Los parámetros que se varían son los cinco parámetros que se identificaron como los influyentes en la fase de *determinación de los parámetros influyentes en el comportamiento del HRFA* ( $E_s$ ,  $f_s$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_{cb}$ ). Sin embargo, estos cinco parámetros no se varían al mismo tiempo sino que se decide analizar de dos en dos, de la siguiente manera:

- Se analizan los resultados al combinar los parámetros del armado equivalente  $E_s$  y  $f_s$  empleando seis valores para cada uno de ellos, es decir, para 36 combinaciones resultantes. Los demás parámetros permanecen fijos.
- Se analizan los resultados al combinar los parámetros de la superficie de rotura  $f_1$  y  $f_2$  empleando cuatro valores para cada uno de ellos, es decir, para 16 combinaciones resultantes. Los demás parámetros permanecen fijos.
- Se analizan los resultados para 23 valores de la resistencia a compresión bi-axial del hormigón  $f_{cb}$ . Los demás parámetros permanecen fijos.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

En el Anejo C se muestran para cada serie de combinaciones y para cada elemento las gráficas de la influencia de los parámetros estudiados sobre la carga y la energía acumulada, correspondiente a cada nivel de flecha.

##### 4.8.1. VARIACIONES Y COMBINACIONES DE $f_s$ Y $E_s$ .

Inicialmente, se analizan los parámetros del armado equivalente  $f_s$  (límite elástico del acero) y  $E_s$  (módulo de elasticidad del acero). La Tabla 4. 23 muestra los valores de los parámetros fijos y la Tabla 4. 24 muestra las variaciones de  $f_s$  y  $E_s$ . A cada valor de  $f_s$  y  $E_s$  se le asigna un número para facilitar la identificación de las combinaciones resultantes entre ambos parámetros.

**Tabla 4. 23.** Valores de los parámetros fijos para cada una de las variaciones de  $f_s$  y  $E_s$ .

$E_c$ (MPa)	33000
$\nu_c$	0,20
$\beta_t$	0,40
$\beta_c$	0,76
$f_t$ (MPa)	4,95
$f_c$ (MPa)	43,71
$f_{cb}$ (MPa)	52,45
$\sigma_h$ (MPa)	75,71
$f_1$ (MPa)	83,31
$f_2$ (MPa)	148,10
$\nu_s$	0,30
$E_{st}$ (MPa)	0,30
$\rho_s$	$f_r/f_s$
$f_r$ (MPa)	2,90

**Tabla 4. 24.** Variación de los valores de  $f_s$  y  $E_s$ .

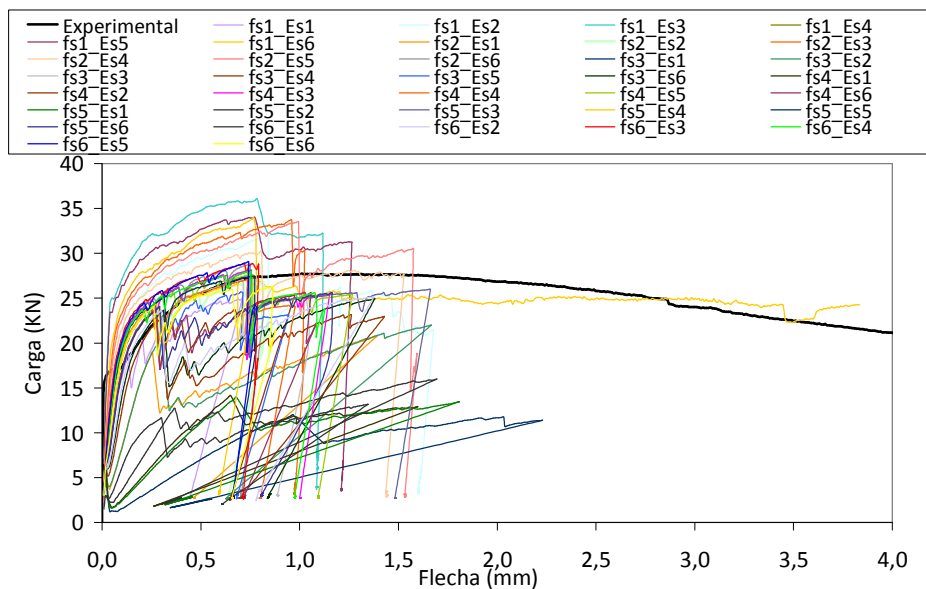
$f_s$ (MPa)	
Valor numérico	# Id
30	1
300	2
975	6
1515	4
1650	5
3000	3
$E_s$ (MPa)	
Valor numérico	# Id
20000	1
200000	2
500000	6
1010000	4
1505000	5
2000000	3

De este modo, la Tabla 4. 25 presenta las combinaciones resultantes de  $f_s$  y  $E_s$  que se simularon. El total de combinaciones resultantes es 36.

**Tabla 4. 25.** Matriz de las 36 combinaciones resultantes de las variaciones de fs y Es.

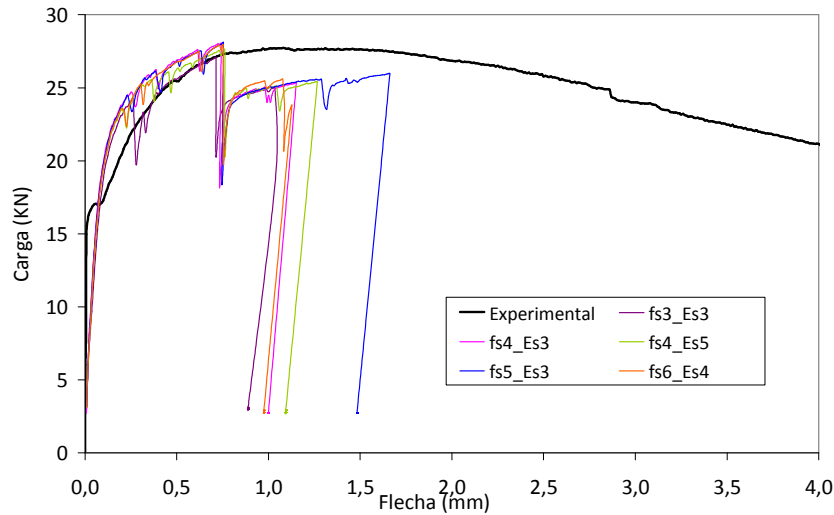
fs	Es	fs	Es	fs	Es	fs	Es	fs	Es	fs	Es
1	1	1	2	1	3	1	4	1	5	1	6
2	1	2	2	2	3	2	4	2	5	2	6
3	1	3	2	3	3	3	4	3	5	3	6
4	1	4	2	4	3	4	4	4	5	4	6
5	1	5	2	5	3	5	4	5	5	5	6
6	1	6	2	6	3	6	4	6	5	6	6

Se presentan las curvas carga-flecha numéricas resultantes de las 36 combinaciones y se comparan con la curva carga-flecha numérica del hormigón HI para cada elemento.



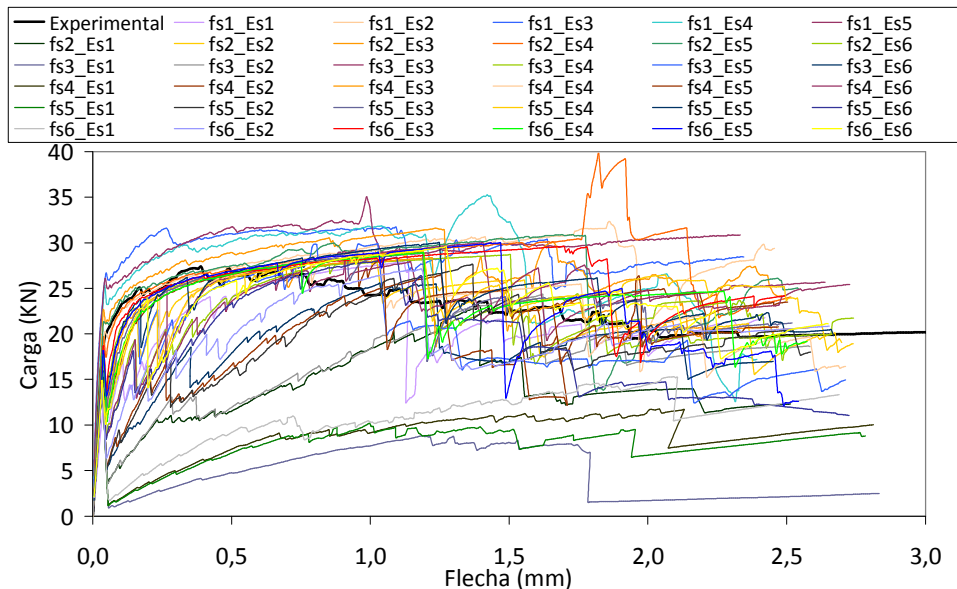
**Figura 4. 20.** Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 36 combinaciones de fs y Es, y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, EN14651.

Para el elemento EN14651 (Figura 4. 20), sólo una variación fs\_Es converge hasta superar los 3,5mm de flecha (fs1\_Es6, donde fs1=30MPa y Es6=500000MPa). Sin embargo, se observan algunos resultados que se ajustan mejor a los experimentales a pesar de no superar el nivel de flecha de 1,5mm, como las variaciones fs3\_Es3, fs4\_Es3, fs4\_Es5, fs5\_Es3, y fs6\_Es4, donde fs3=3000MPa, fs4=1515MPa, fs5=1650MPa, fs6=975MPa, Es3=2000000MPa, Es4=1010000MPa, Es5=1505000MPa (Figura 4. 21).

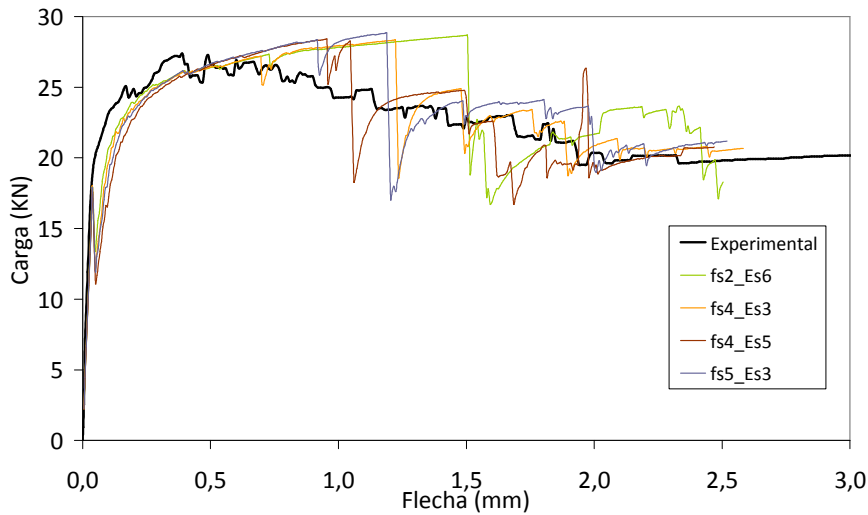


**Figura 4. 21.** Combinaciones de  $f_s$ \_Es más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, EN14651.

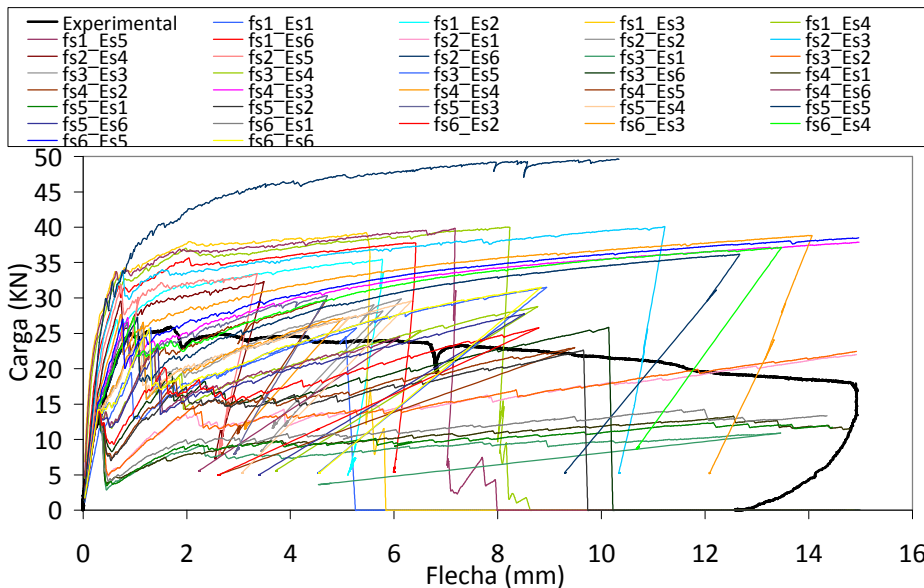
Los mejores ajustes para el armado equivalente  $f_s$ \_Es para la probeta ASTM1018 (Figura 4. 22) son las variaciones  $f_s2$ \_Es6,  $f_s4$ \_Es3,  $f_s4$ \_Es5, y  $f_s5$ \_Es3, donde  $f_s2=300\text{MPa}$ ,  $f_s4=1515\text{MPa}$ ,  $f_s5=1650\text{MPa}$ ,  $Es3=2000000\text{MPa}$ ,  $Es5=1505000\text{MPa}$  y  $Es6=500000\text{MPa}$  (Figura 4. 23). Cuando  $Es$  es bajo ( $Es1=20000\text{MPa}$ ) se observa gran discrepancia, aún cuando se varían los valores de  $f_s$ . Las variaciones  $f_s2$  y  $f_s6$  con valores de  $Es4$ ,  $Es5$  y  $Es6$  presentan buenos ajustes hasta una flecha de 2mm, siendo  $f_s6=975\text{MPa}$ , y  $Es4=1010000\text{MPa}$ .



**Figura 4. 22.** Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 36 combinaciones de  $f_s$  y  $Es$ , y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, ASTM1018.



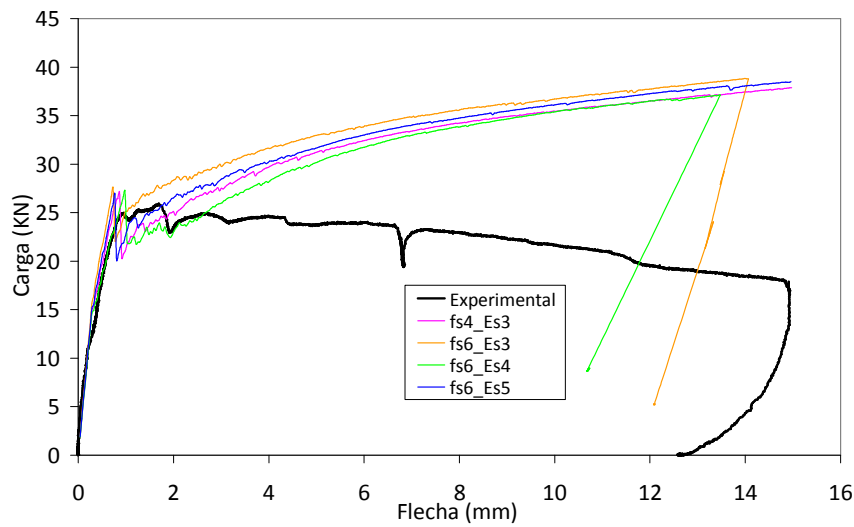
**Figura 4. 23.** Combinaciones de fs\_Es más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, ASTM1018.



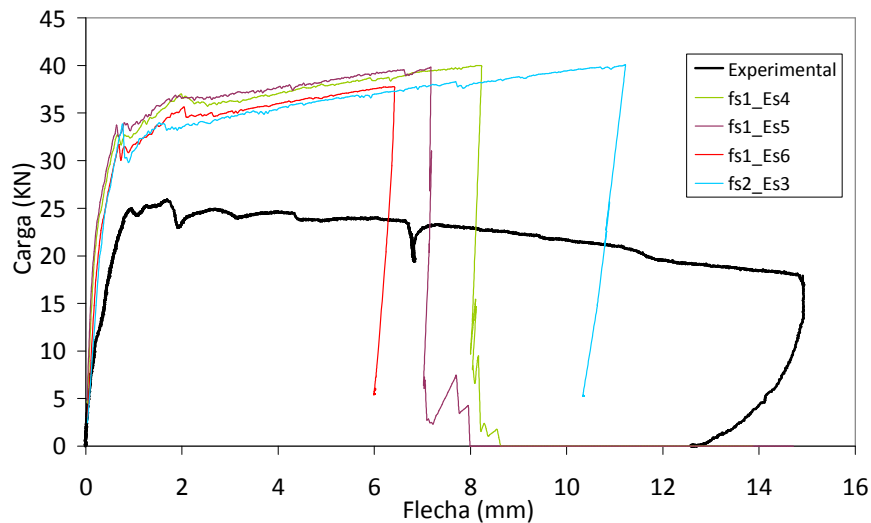
**Figura 4. 24.** Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 36 combinaciones de fs y Es, y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, Placa 1.

Las mejores variaciones de fs\_Es para la placa 1 (Figura 4. 25), son fs4\_Es3, y fs6 con los valores de Es3, Es4 y Es5, donde fs4=1515MPa, fs6=975MPa, Es3=2000000MPa, Es4=1010000MPa y Es5=1505000MPa. En este caso, no es posible representar la pérdida de resistencia del elemento siendo necesario el ajuste de otros parámetros. Cuando se emplea Es1 (Es1=20000MPa) se obtienen resultados muy desfavorables, aún cuando se varíe fs. La variación fs2\_Es2 es buena sólo hasta un nivel de flecha de 4mm, donde fs2=300MPa y Es2=200000. Las variaciones fs1 con Es4, Es5, Es6, y fs2\_Es3, donde fs1=30MPa, Es6=500000MPa, presentan una forma similar a la experimental, pero con un nivel de carga mayor (Figura 4. 26). Esto parece

indicar que puede haber un efecto orientación y que la resistencia residual utilizada es exagerada.



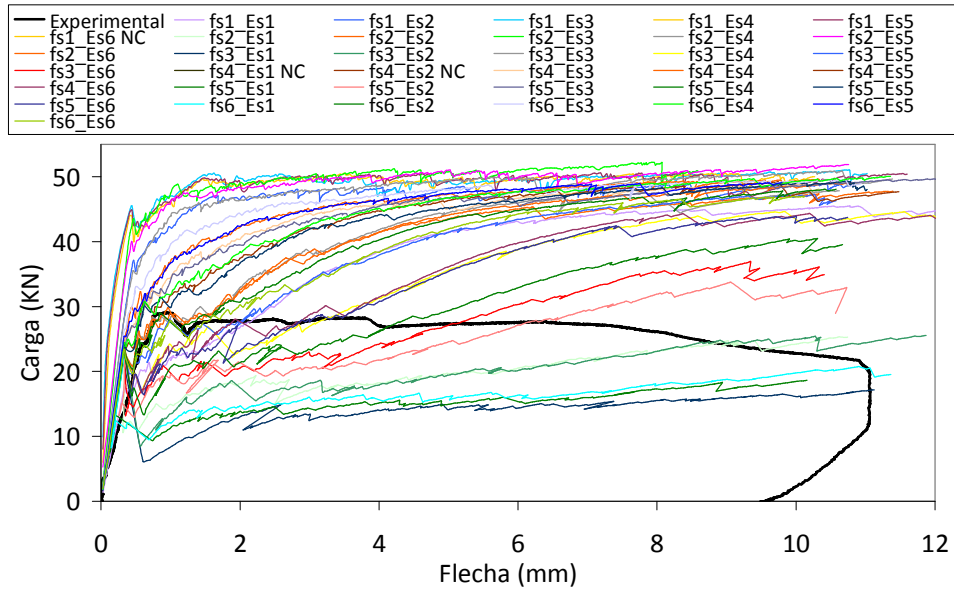
**Figura 4. 25.** Combinaciones de  $f_s$ \_Es más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, Placa 1.



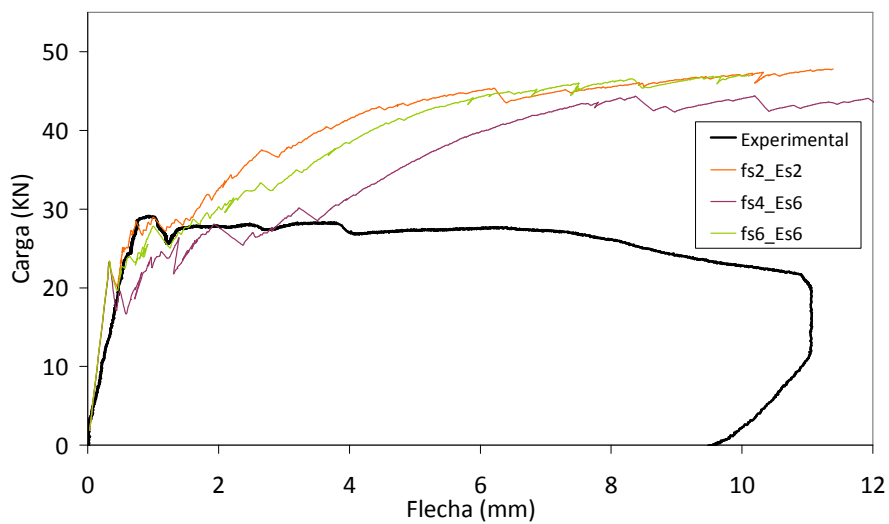
**Figura 4. 26.** Combinaciones de  $f_s$ \_Es con forma similar pero nivel de carga mayor al experimental del hormigón HI, Placa 1.

En cuanto a las variaciones de  $f_s$ \_Es para la placa 2 (Figura 4. 27) se observa que el valor de  $E_{s1}$  ( $E_{s1}=20000\text{MPa}$ ) con cualquier variación de  $f_s$  arroja resultados muy desfavorables. Las variaciones  $f_{s2}$ \_Es2,  $f_{s4}$ \_Es6, y  $f_{s6}$ \_Es6 son buenas hasta un nivel de flecha de 4mm, donde  $f_{s2}=300\text{MPa}$ ,  $f_{s4}=1515\text{MPa}$ ,  $f_{s6}=975\text{MPa}$ ,  $E_{s2}=200000\text{MPa}$  y  $E_{s6}=500000\text{MPa}$ . En general, se observan buenos resultados con las variaciones de  $E_{s2}$  y  $E_{s6}$  con casi todos los valores de  $f_s$ , excepto  $f_{s1}$  (Figura 4. 28). Las variaciones  $f_{s1}$  con  $E_{s3}$ ,  $E_{s4}$ ,  $E_{s5}$ , y  $f_{s2}$  con  $E_{s3}$  y  $E_{s5}$ , donde  $f_{s1}=30\text{MPa}$ ,  $E_{s3}=2000000\text{MPa}$ ,

$E_s4=1010000\text{MPa}$  y  $E_s5=1505000\text{MPa}$ , presentan una forma similar a la experimental, pero con un nivel de carga mayor (Figura 4. 29). Esto parece indicar que puede haber un efecto orientación y que la resistencia residual utilizada es exagerada.

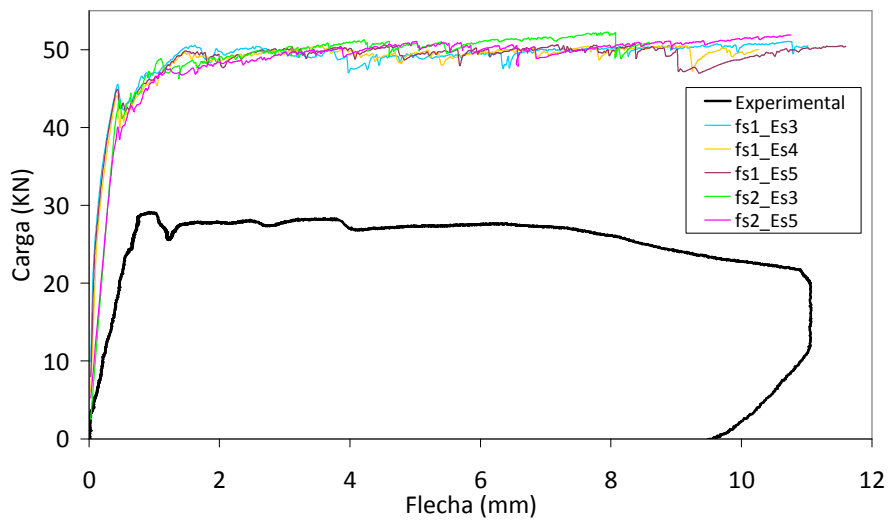


**Figura 4. 27.** Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 36 combinaciones de  $f_s$  y  $E_s$ , y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, Placa 2. (NC= No Converge).



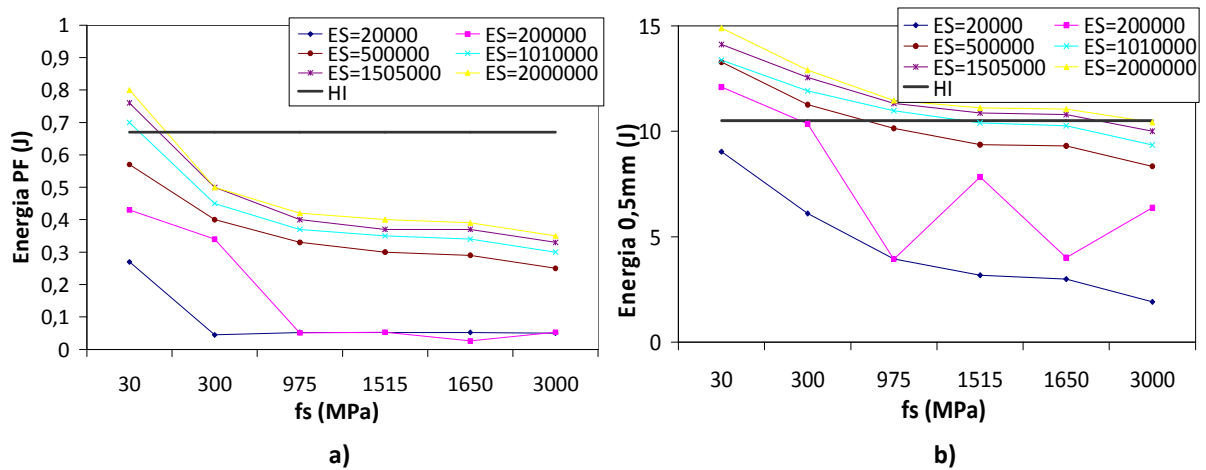
**Figura 4. 28.** Combinaciones de  $f_s$ \_Es más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, Placa 2.



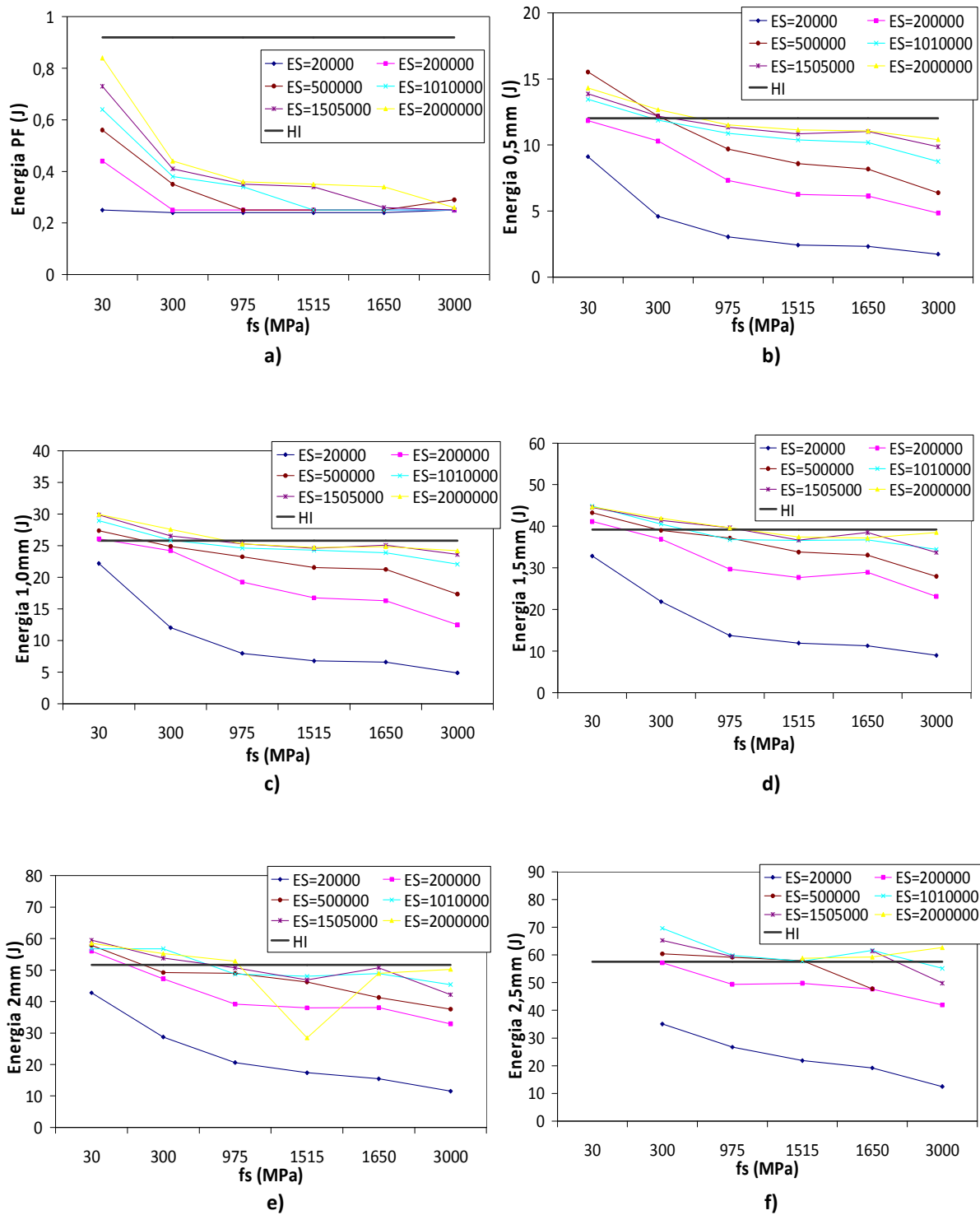


**Figura 4. 29.** Combinaciones de  $f_s$ \_Es con forma similar pero nivel de carga mayor al experimental del hormigón HI, Placa 2.

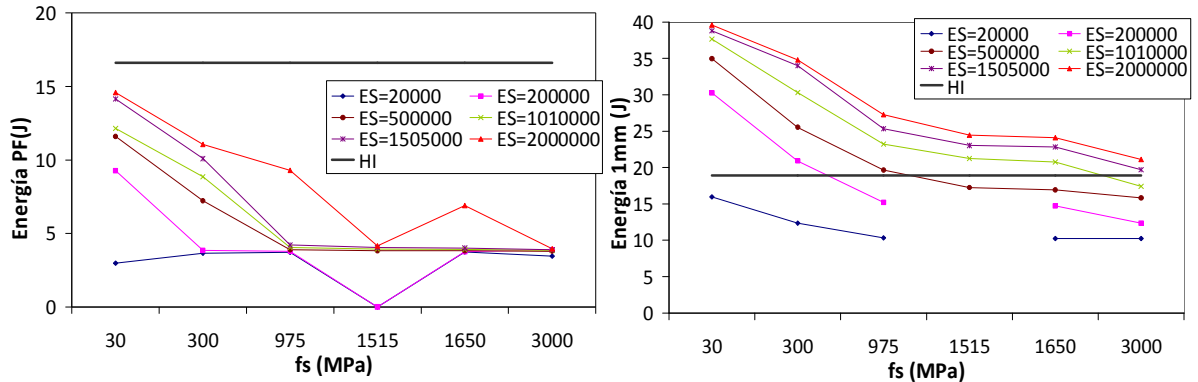
Es evidente que tanto los valores de  $E_s$  como de  $f_s$  influyen en la respuesta obtenida para el elemento EN14651 (Figura 4. 30). El parámetro  $f_s$  deja de ser influyente para valores altos de flecha, y en general la respuesta da niveles de energía y de carga inferiores o más ajustados en el caso de las probetas EN14651 y ASTM1018 (Figura 4. 31), y superiores en relación al valor experimental para las placas (Figura 4. 32). Esto hace suponer que en el caso de las placas hay un efecto de reparto en dos direcciones de las fibras, que conduce a una menor resistencia residual del hormigón, es decir a un efecto orientación.



**Figura 4. 30.** Valores de energía a: a) PF primera fisura y b) nivel de flecha de 0,5 mm, correspondientes a las combinaciones de  $f_s$ \_Es, elemento EN14651, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.

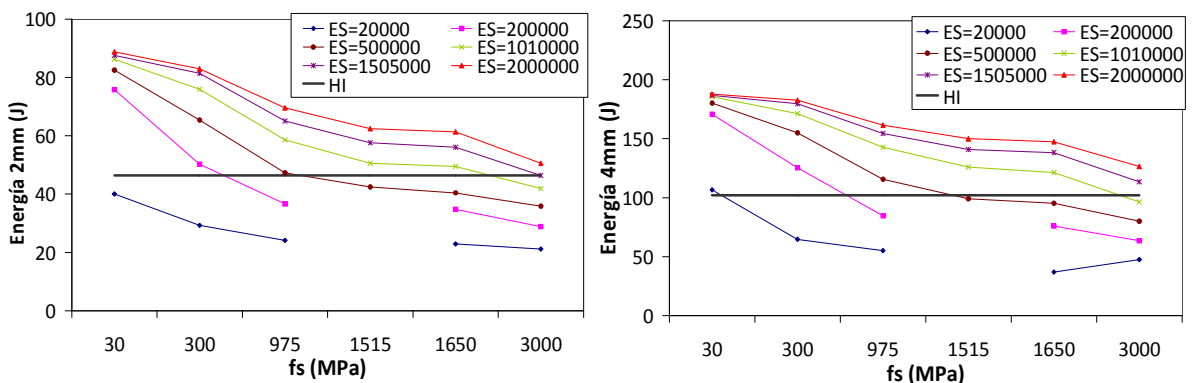


**Figura 4. 31.** Valores de energía a: a) PF primera fisura, y niveles de flechas de b) 0,5 mm, c) 1mm, d) 1,5 mm, e) 2mm y f) 2,5mm, correspondientes a las combinaciones de fs\_Es, elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.



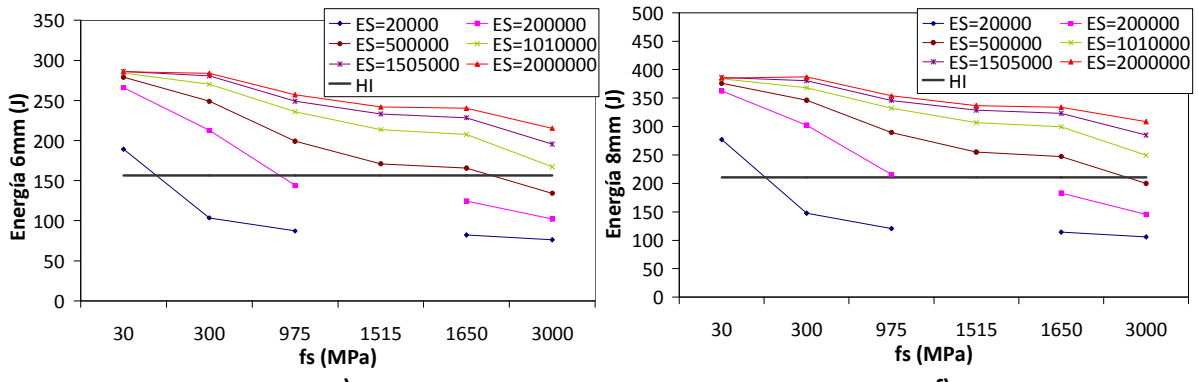
a)

b)



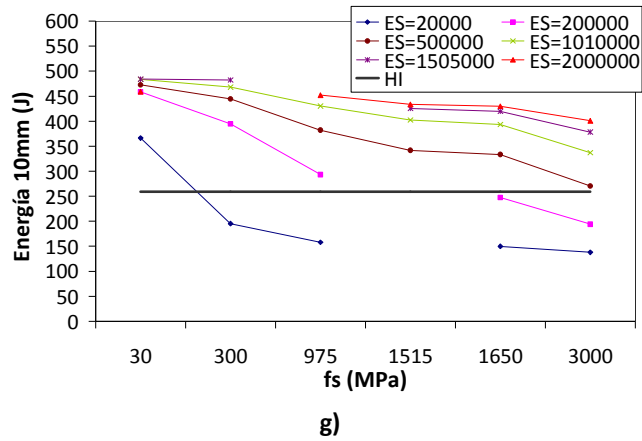
c)

d)



e)

f)



**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 fs\_Es, elemento Placa 2, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.

#### 4.8.2. VARIACIONES Y COMBINACIONES DE f1 Y f2.

En cuanto a los parámetros referentes al hormigón y que definen la superficie de rotura, f1 (resistencia del hormigón a compresión bi-axial superpuesta en estado de tensión hidrostática) y f2 (resistencia del hormigón a compresión uni-axial superpuesta en estado de tensión hidrostática), se les asigna cinco variaciones a cada uno, mientras los demás parámetros permanecen fijos.

**Tabla 4. 26.** Valores de los parámetros fijos para cada una de las variaciones de f1 y f2.

Ec (MPa)	33000
vc	0,20
$\beta_t$	0,40
$\beta_c$	0,76
ft (MPa)	4,95
fc (MPa)	43,71
fc <sub>b</sub> (MPa)	52,45
$\sigma_h$	75,71
Es (MPa)	2000000
vs	0,30
fs (MPa)	1515
Est (MPa)	0,30
$\rho_s$	fr/fs
fr (MPa)	2,90

La Tabla 4. 26 muestra los valores de los parámetros fijos y la Tabla 4. 27 muestra las variaciones de f1 y f2. A cada valor de f1 y f2 se le asigna un número para facilitar la identificación de las combinaciones resultantes entre ambos parámetros. Para este caso, se adicionó una variación más donde los valores de f1 y f2 son 83,71 y 148,10, este par se denominó f10\_f20. El total de combinaciones resultantes son 26 (Tabla 4. 28).

**Tabla 4. 27.** Variación de los valores de f1 y f2.

f1 (MPa)		
Valor numérico	# Id	f1/fc
43,71	1	1,0
83,31	0	1,9
349,68	4	8,0
655,65	2	15,0
1202,03	5	27,5
1311,30	3	30,0
f2 (MPa)		
Valor numérico	# Id	f1/fc
43,71	1	1,00
148,10	0	3,39
240,41	4	5,50
437,10	2	10,00
655,65	5	15,00
874,20	3	20,00

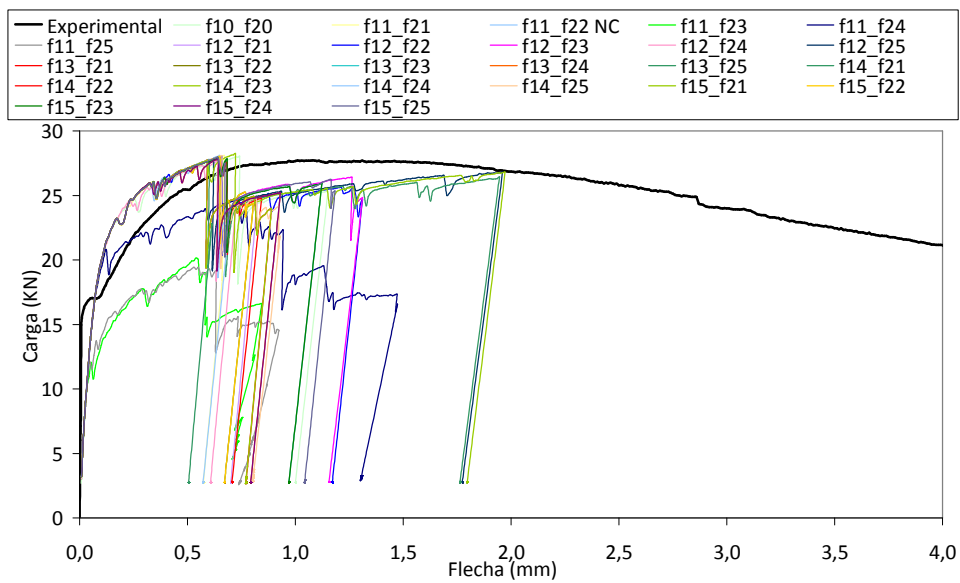
fc= 43,71MPa

**Tabla 4. 28.** Matriz de las 26 combinaciones resultantes de las variaciones de f1 y f2.

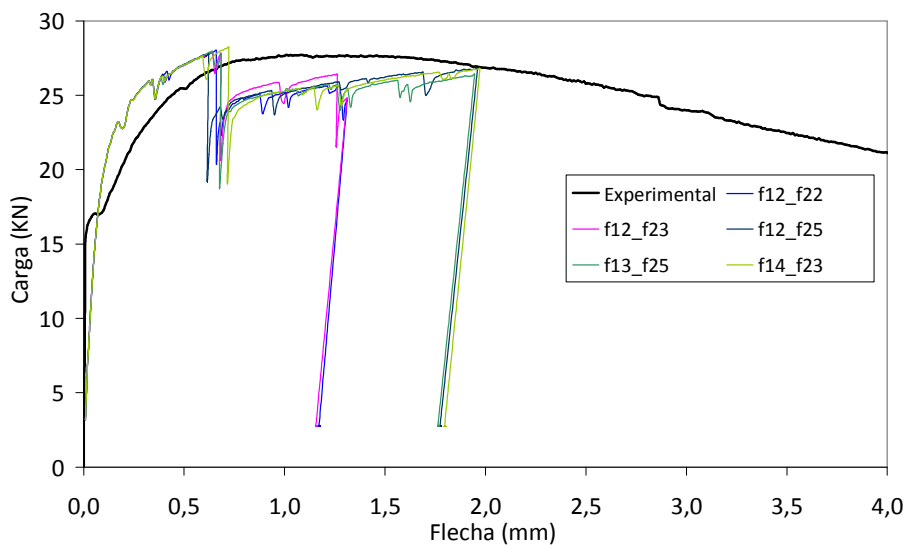
f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2
1	1	1	2	1	3	1	4	1	5
2	1	2	2	2	3	2	4	2	5
3	1	3	2	3	3	3	4	3	5
4	1	4	2	4	3	4	4	4	5
5	1	5	2	5	3	5	4	5	5
0	0								

Se presentan las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las 26 combinaciones y se comparan con la curva carga-flecha experimental obtenida con el hormigón HI.

Para el elemento EN14651 (Figura 4. 33) se observa que las mejores variaciones de  $f_1\_f_2$  son  $f_{13\_f_{25}}$ ,  $f_{14\_f_{23}}$ , y  $f_{12}$  con los valores de  $f_{22}$ ,  $f_{23}$ , y  $f_{25}$ , donde  $f_{12}=655,65\text{MPa}$ ,  $f_{13}=1311,3\text{MPa}$ ,  $f_{14}=349,68\text{MPa}$ ,  $f_{22}=437,1\text{MPa}$ ,  $f_{23}=874,20\text{MPa}$  y  $f_{25}=655,55\text{MPa}$  (Figura 4. 34). Todas las variaciones de  $f_1\_f_2$  están muy distintas de los resultados experimentales para el nivel de flecha a primera fisura (PF). Para niveles de flecha de 0,5mm todas las variaciones  $f_1\_f_2$  dan una buena aproximación, excepto  $f_{11\_f_{25}}$ , y  $f_{11\_f_{23}}$ , donde  $f_{11}=43,71\text{MPa}$ ,  $f_{23}=874,20\text{MPa}$  y  $f_{25}=655,65\text{MPa}$ . No es posible representar la respuesta carga-flecha para niveles superiores a 1,8mm, por lo cual deben ajustarse otros parámetros.

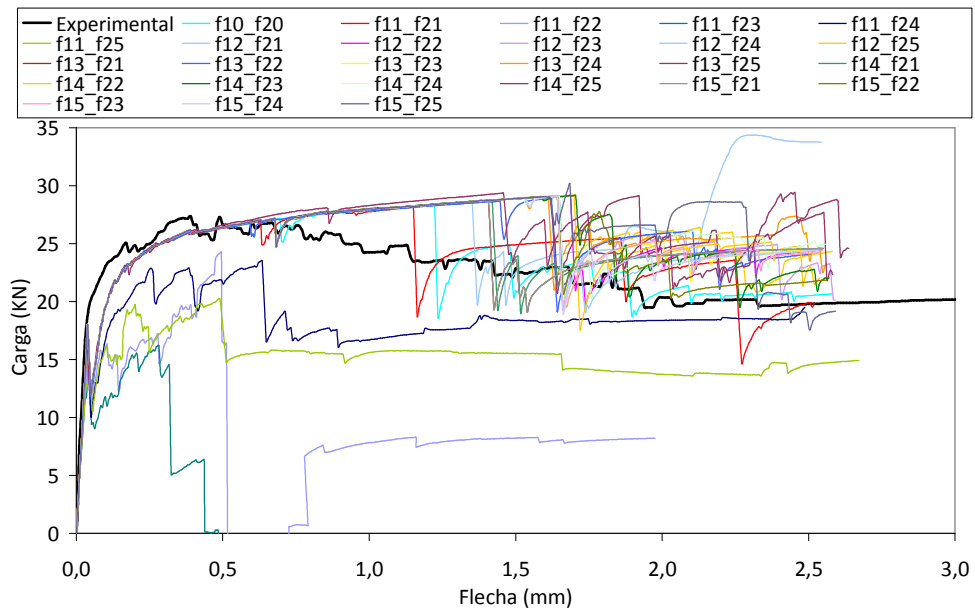


**Figura 4. 33.** Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 26 combinaciones de  $f_1$  y  $f_2$ , y su comparación con la curva experimental del hormigón HI, EN14651. (NC=No converge).

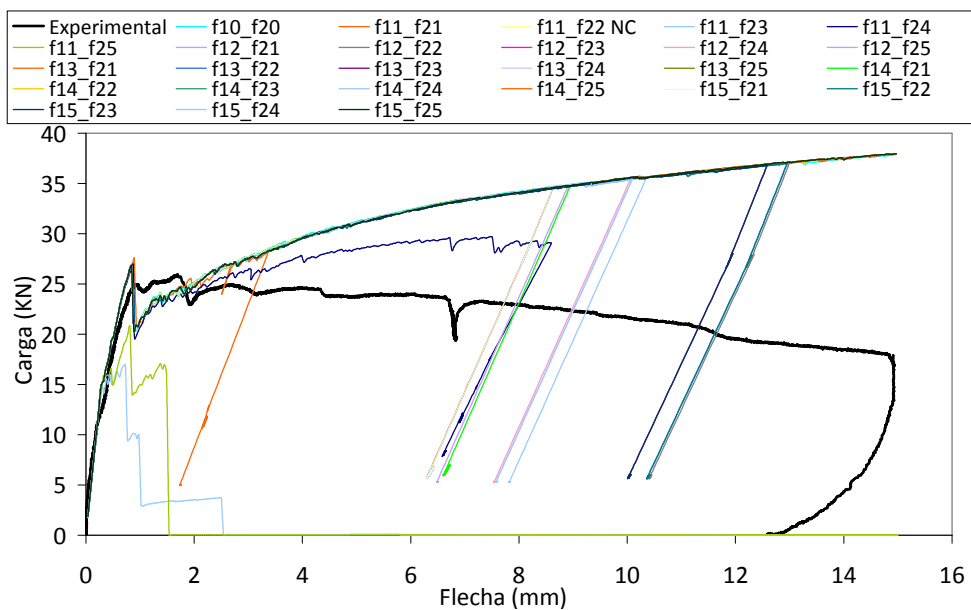


**Figura 4. 34.** Combinaciones de  $f_1\_f_2$  más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, EN14651.

Para el elemento ASTM1018 (Figura 4. 35), todas las variaciones de  $f_1$ \_f $_2$  están muy distintas de los resultados experimentales para el nivel de flecha a primera fisura (PF). Para los niveles de flecha entre 0,5 y 2mm todas las variaciones se ajustan, excepto  $f_{11\_f22}$ ,  $f_{11\_f23}$ ,  $f_{11\_f24}$ ,  $f_{11\_f25}$  y  $f_{12\_f21}$ , donde  $f_{11}=43,71\text{MPa}$ ,  $f_{12}=655,65\text{MPa}$ ,  $f_{21}=43,71\text{MPa}$ ,  $f_{22}=437,10\text{MPa}$ ,  $f_{23}=874,20\text{MPa}$ ,  $f_{24}=240,41\text{MPa}$  y  $f_{25}=655,65\text{MPa}$ . Para el nivel de flecha 2,5 la mejor variación es la  $f_{10\_f20}$ , donde  $f_{10}=83,31\text{MPa}$  y  $f_{20}=148,10\text{MPa}$ .

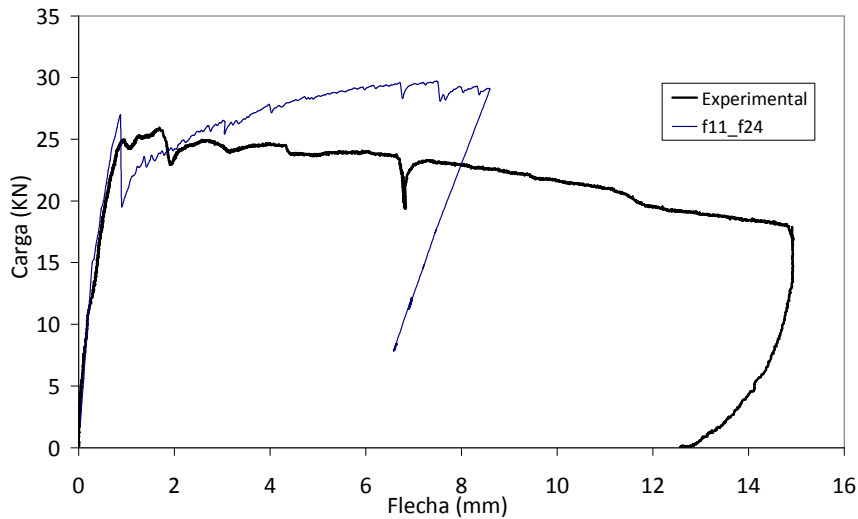


**Figura 4. 35.** Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 26 combinaciones de  $f_1$  y  $f_2$ , y su comparación con la curva experimental del hormigón HI, ASTM1018.

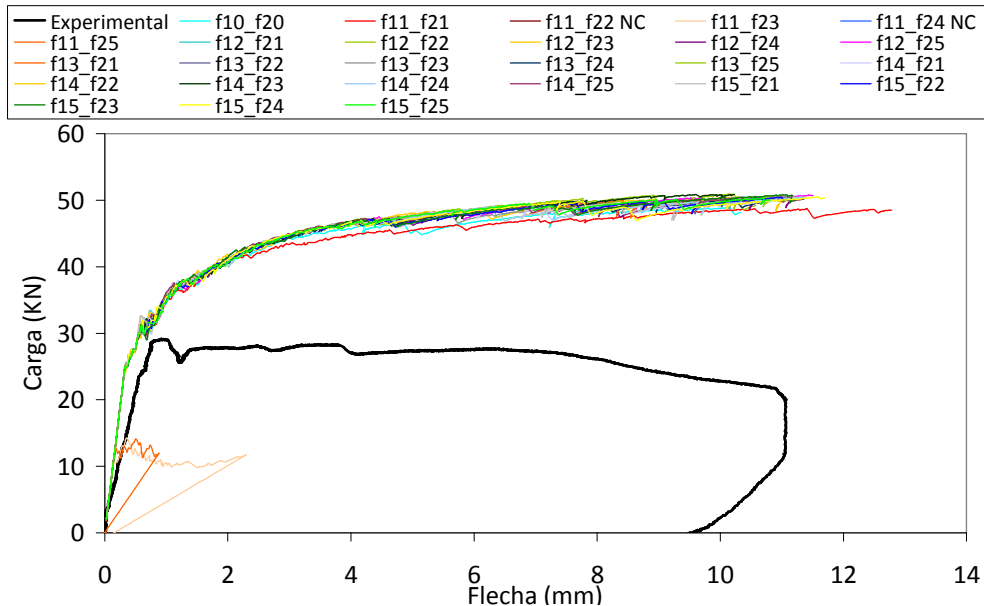


**Figura 4. 36.** Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 26 combinaciones de  $f_1$  y  $f_2$ , y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, Placa 1. (NC=No converge).

En cuanto a la Placa 1 (Figura 4. 36), el mejor ajuste se obtiene con la variación f11\_f24, donde  $f_{11}=43,71\text{MPa}$  y  $f_{24}=240,41\text{MPa}$ , aunque presenta un descontrole a partir de 8mm de flecha. Las variaciones f11\_f23, y f11\_f25 son las más desajustadas, donde  $f_{11}=43,71\text{MPa}$ ,  $f_{23}=874,20\text{MPa}$  y  $f_{25}=655,65\text{MPa}$ . Se observa que las demás variaciones son muy similares y están distantes de los resultados experimentales.



**Figura 4. 37.** Combinaciones de f1\_f2 más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, Placa 1.

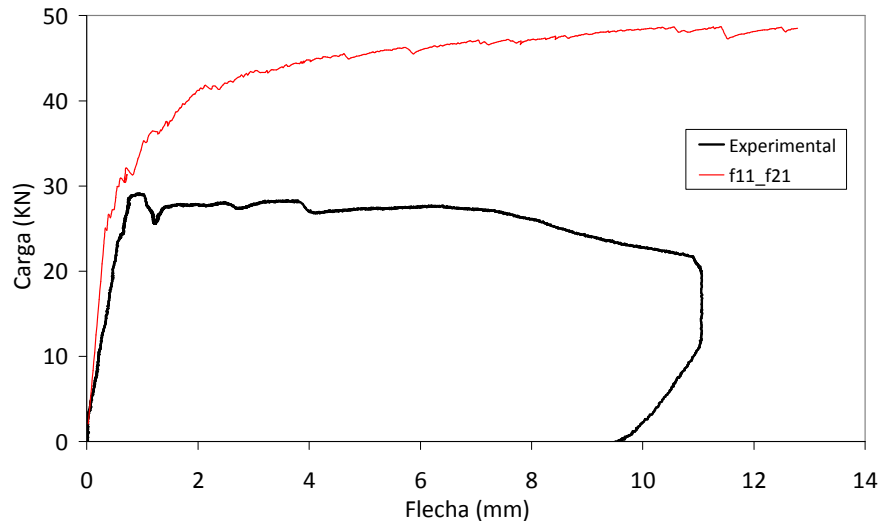


**Figura 4. 38.** Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 26 combinaciones de f1 y f2, y su comparación con la curva experimental del hormigón HI, Placa 2. (NC=No converge).

Para la Placa 2 (Figura 4. 38), las variaciones f1\_f2 no presentan gran variación en su respuesta. La variación f11\_f21, donde  $f_{11}=43,71\text{MPa}$  y  $f_{21}=43,71\text{MPa}$ , tiene



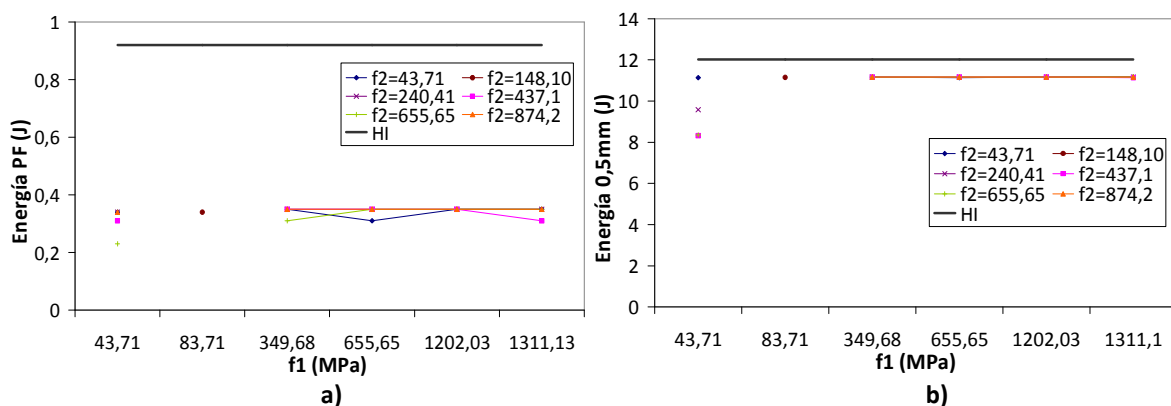
ligeramente un mejor ajuste y su forma es similar a la curva experimental (Figura 4. 39). Las variaciones  $f_{11\_f23}$ , y  $f_{11\_f25}$ , donde  $f_{11}=43,71\text{MPa}$ ,  $f_{23}=874,20\text{MPa}$  y  $f_{25}=655,65\text{MPa}$ , son las más desajustadas.

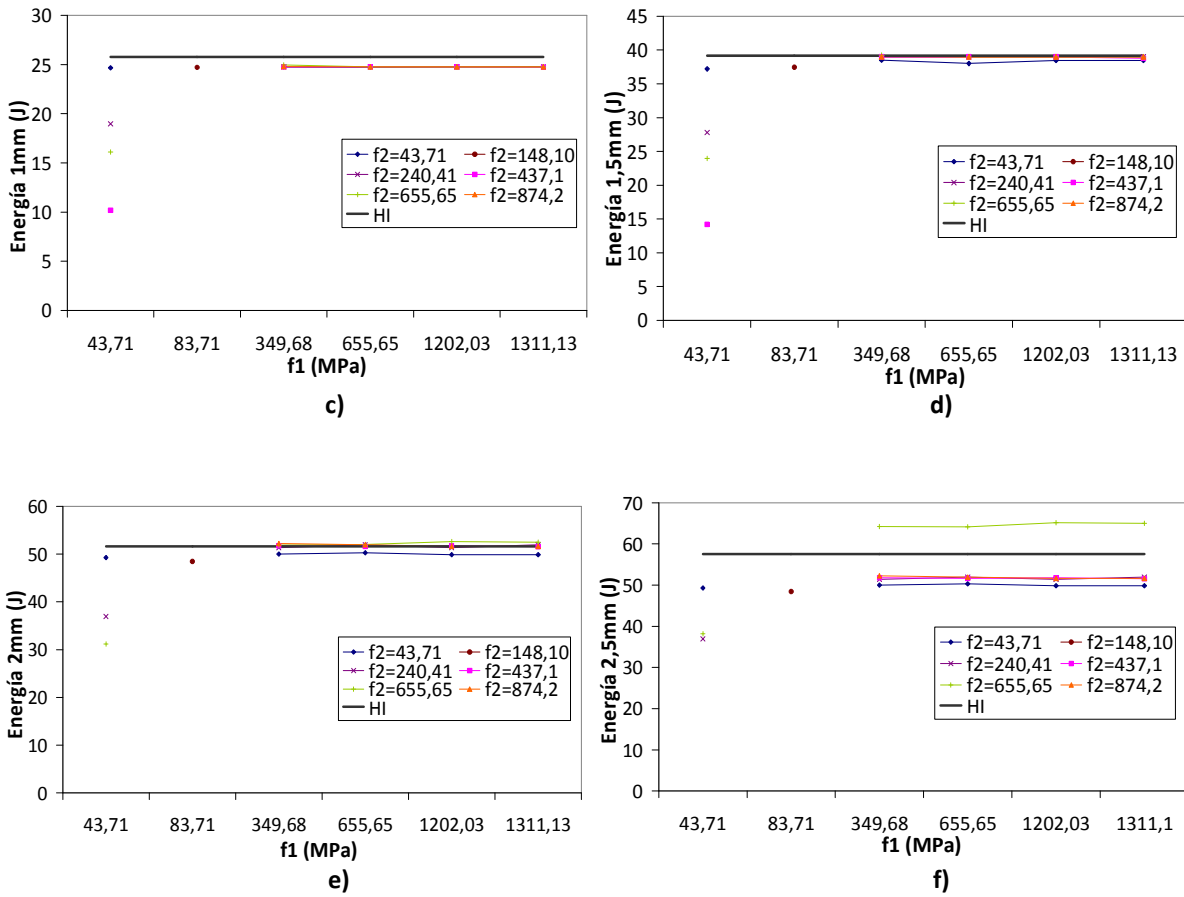


**Figura 4. 39.** Combinaciones de  $f_1$ \_ $f_2$  más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, Placa 2.

Tanto en placa 1 como en placa 2 no se ha podido representar la pérdida de resistencia del elemento, por lo que se requiere el ajuste de otros parámetros.

En general, se aprecia poca influencia de los parámetros  $f_1$  y  $f_2$  (Figura 4. 40), y una sobre estimación de las respuestas en el caso de las placas, apoyando la teoría de efecto orientación de las fibras.





**Figura 4. 40.** Valores de energía a: a) PF primera fisura, y a niveles de flecha b) 0,5 mm, c) 1mm, d) 1,5 mm, e) 2mm, y f) 2,5mm, correspondientes a las combinaciones de f1\_f2, elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.

4.8.3. VARIACIONES Y COMBINACIONES DE fcb.

El parámetro fcb (resistencia del hormigón a compresión bi-axial) se varía de forma aislada. La Tabla 4. 29 muestra los valores de los parámetros fijos y la Tabla 4. 30 presenta los valores dados al parámetro fcb y el número de identificación para cada valor asignado.

**Tabla 4. 29.** Valores de los parámetros fijos para cada variación de fcb.

Ec (MPa)	33000
vc	0,20
$\beta_t$	0,40
$\beta_c$	0,76
ft (MPa)	4,95
fc (MPa)	43,71
$\sigma_h$	75,71
f1 (MPa)	83,31
f2 (MPa)	148,10
Es (MPa)	2000000
vs	0,30
fs (MPa)	1515
Est (MPa)	0,30
$\rho_s$	fr/fs
fr (MPa)	2,90

**Tabla 4. 30.** Variación de los valores de fcb.

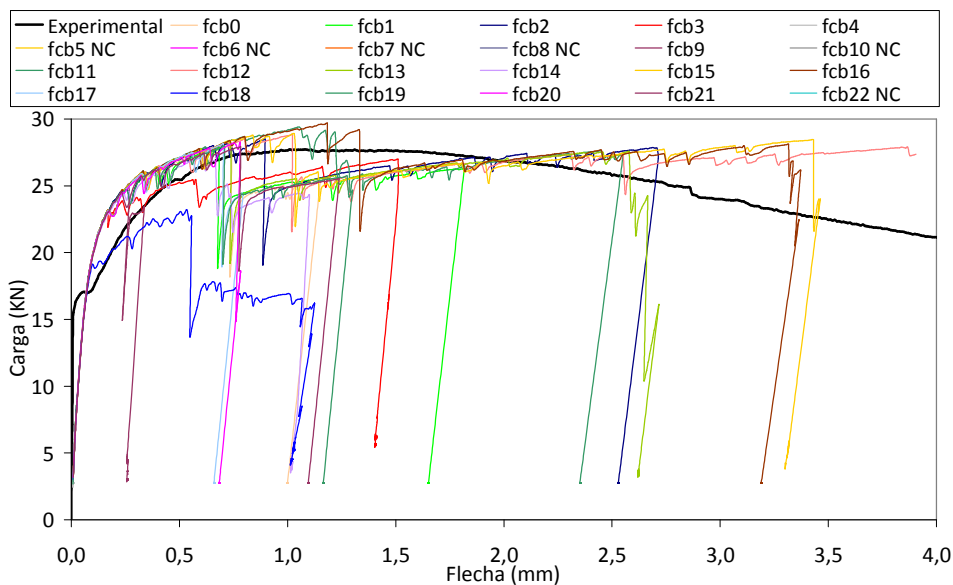
fcb (MPa)		
Valor numérico	# Id	fcb/fc
43,71	1	1,00
49,17	19	1,13
52,45	0	1,20
54,64	17	1,25
60,10	20	1,37
65,57	14	1,50
71,03	21	1,63
76,49	18	1,75
81,96	22	1,87
87,42	13	2,00
109,28	2	2,50
131,13	12	3,00
147,84	11	3,38
152,99	15	3,50
196,70	16	4,50
218,55	3	5,00
240,41	9	5,50
251,33	10	5,75
262,26	6	6,00

fc= 43,71MPa

fcb (MPa)		
Valor numérico	# Id	fcb/fc
273,19	8	6,25
284,12	7	6,50
305,97	5	7,00
437,10	4	10,00

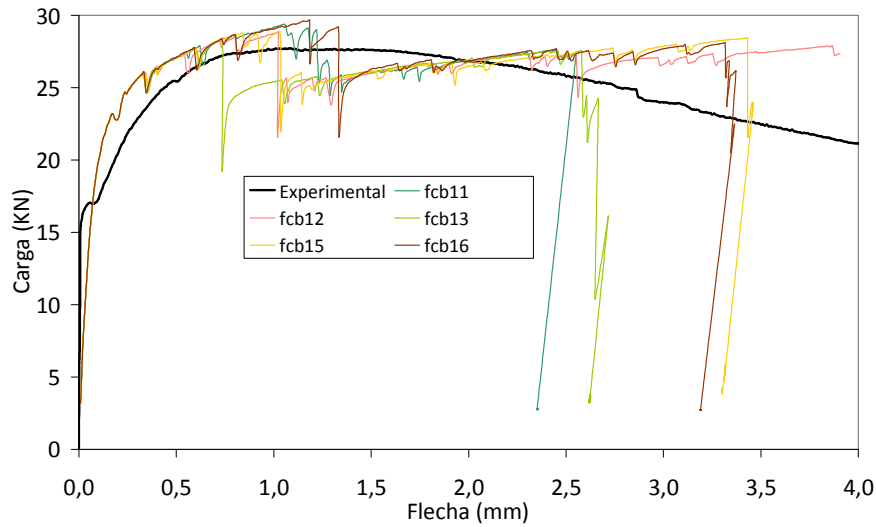
$f_c = 43,71\text{MPa}$

Las siguientes gráficas ilustran los resultados obtenidos para cada uno de los elementos analizados. Se presentan las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las 23 variaciones de fcb y se comparan con la curva carga-flecha experimental obtenida con el hormigón HI.



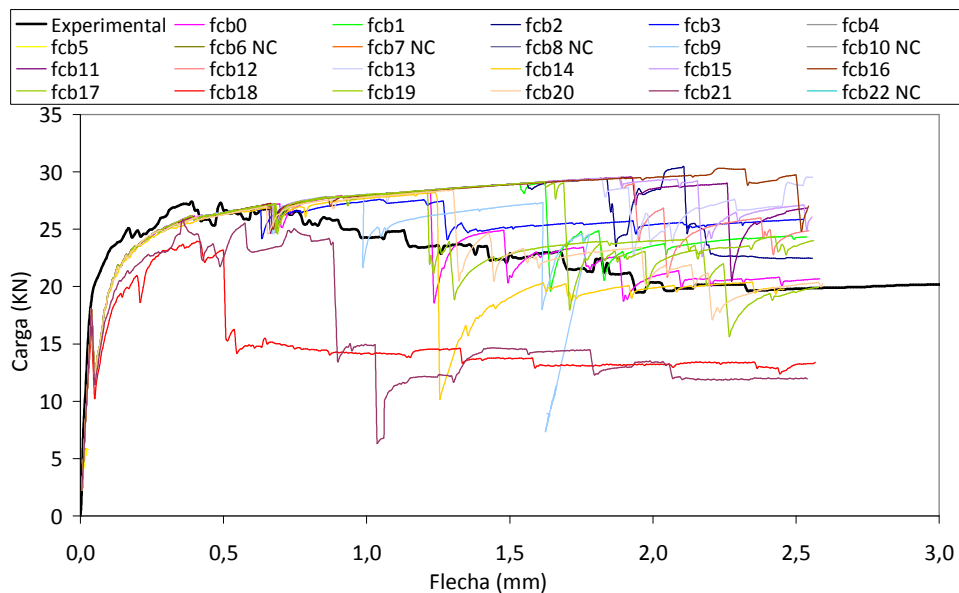
**Figura 4. 41.** Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 23 variaciones de fcb y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, EN14651. (NC=No converge).

Las mejores respuestas de la curva carga-flecha para la variación fcb en el elemento EN14651 (Figura 4. 41) son fcb11, fcb12, fcb13, fcb15, fcb16, siendo  $f_{cb11}=147,84\text{MPa}$ ,  $f_{cb12}=131,13\text{MPa}$ ,  $f_{cb13}=87,42\text{MPa}$ ,  $f_{cb15}=152,99$  y  $f_{cb16}=196,70\text{MPa}$ . Se observa que para dichas variaciones es posible obtener respuesta para flechas superiores a 2,5mm (Figura 4. 42).

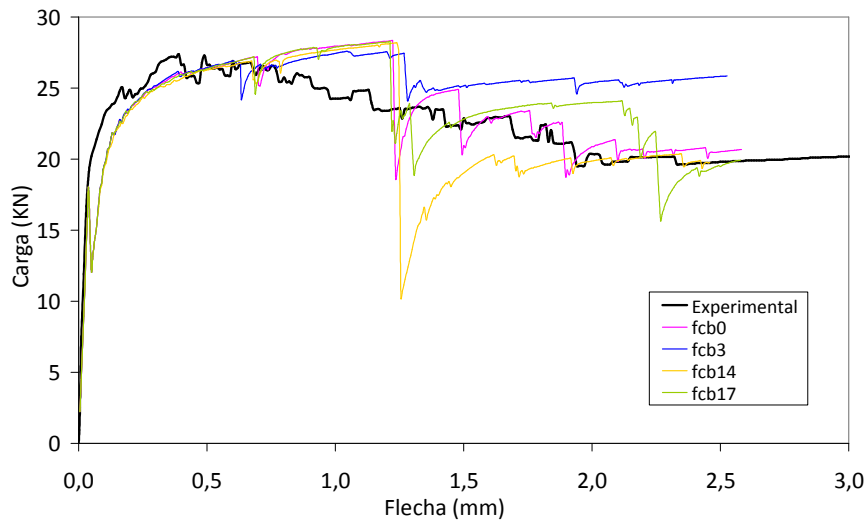


**Figura 4. 42.** Combinaciones de fcb más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, EN14651.

Para el elemento ASTM1018 (Figura 4. 43), las variaciones fcb18 y fcb21 presentan los resultados más desajustados, donde  $fcb18=76,49\text{MPa}$  y  $fcb21=71,03\text{MPa}$ . Las variaciones fcb0, fcb3 y fcb17 ofrecen los mejores resultados, siendo  $fcb0=52,45\text{MPa}$ ,  $fcb3=218,55\text{MPa}$  y  $fcb17=54,64\text{MPa}$ . Con la variación del parámetro fcb es posible representar la pérdida de resistencia del elemento, tal como se observa con la variación fcb14, donde  $fcb14=65,57\text{MPa}$  (Figura 4. 44).

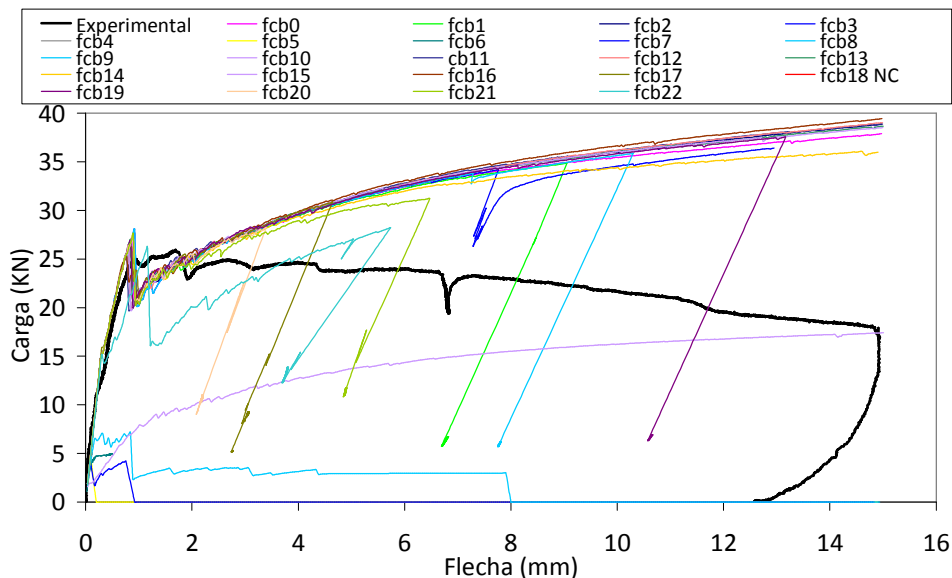


**Figura 4. 43.** Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 23 variaciones de fcb y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, ASTM1018. (NC=No converge).

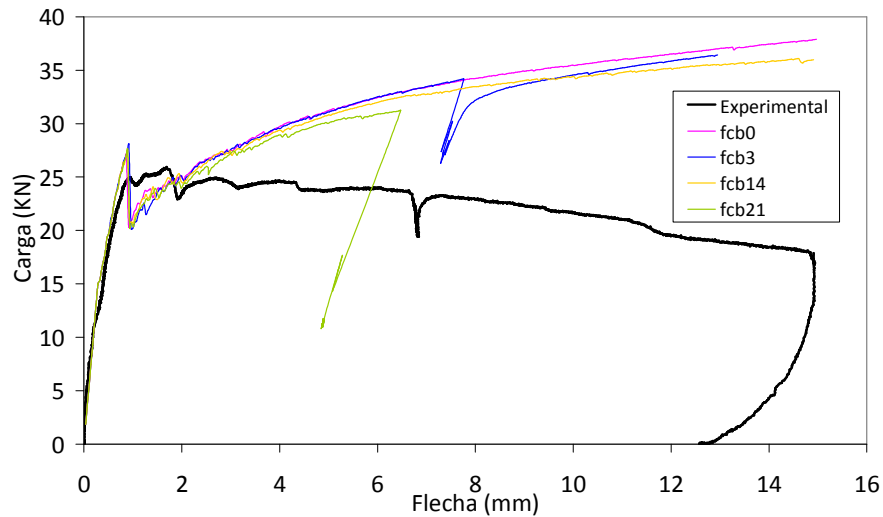


**Figura 4. 44.** Combinaciones de fcb más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, ASTM1018.

Para la Placa 1 (Figura 4. 45), las mejores variaciones de fcb son fcb0, fcb3 y fcb14, donde  $fcb0=52,45\text{MPa}$ ,  $fcb3=218,55\text{MPa}$  y  $fcb14=65,57\text{MPa}$ . La variación fcb21, siendo  $fcb21=71,03\text{MPa}$ , presenta un buen ajuste aunque se descontrola para niveles de flecha superiores a 6mm (Figura 4. 46). Las variaciones fcb5, fcb6, fcb7, fcb8 y fcb10 presentan los resultados más desajustados, donde  $fcb5=305,97\text{MPa}$ ,  $fcb6=262,26\text{MPa}$ ,  $fcb7=284,12\text{MPa}$ ,  $fcb8=273,19$  y  $fcb10=251,33$ .

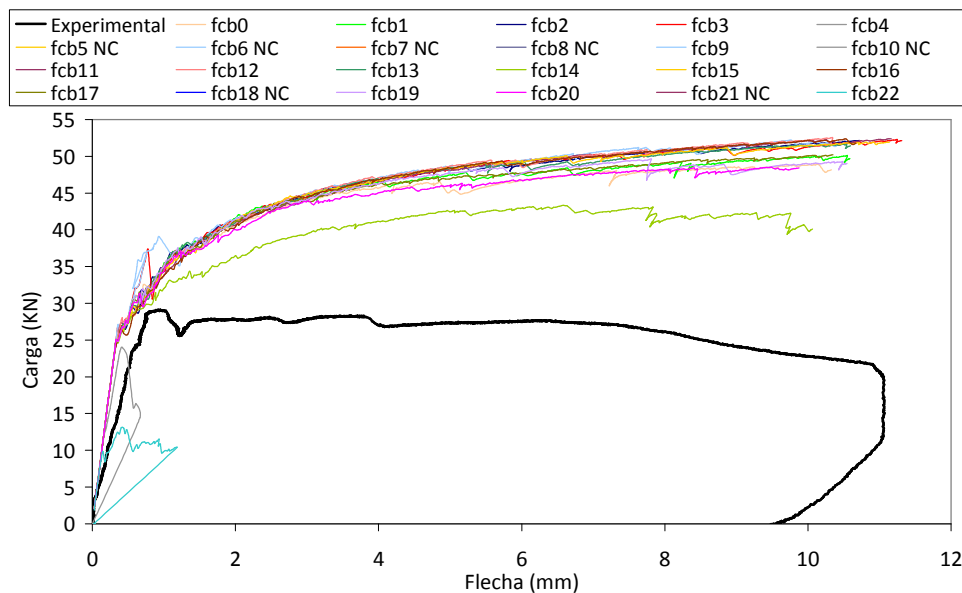


**Figura 4. 45.** Curvas carga-flecha numéricas obtenidas con las 23 variaciones de fcb y su comparación con la prueba experimental del hormigón HI, Placa 1. (NC=No converge).



**Figura 4. 46.** Combinaciones de fcb más ajustadas al comportamiento experimental del hormigón HI, Placa 1.

En cuanto a la Placa 2 (Figura 4. 47) la mejor variación es la fcb14, siendo  $fcb14=65,57\text{MPa}$ . Las variaciones fcb4 y fcb22, donde  $fcb4=437,10\text{MPa}$  y  $fcb22=81,96\text{MPa}$ , son las más desajustadas. Las demás variaciones ofrecen resultados similares, lo que evidencia que deben ser ajustados los demás parámetros.



**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. (NC=No converge).

En general, se observa poca influencia del parámetro  $f_{cb}$  y una sobre estimación de las respuestas en el caso de las placas, soportando una vez más la teoría de efecto orientación de las fibras.

La etapa de variación de parámetros aislados evidencia que se requiere un ajuste de parámetros de forma conjunta, por lo cual se plantea el siguiente apartado.

#### 4.8.4. COMBINACIÓN DE LOS PARÁMETROS.

Basados en las respuestas obtenidas se plantea analizar el efecto de modificar simultáneamente todos los parámetros influyentes a fin de analizar las influencias de orden superior a dos, y las posibles modificaciones al utilizar niveles intermedios para cada parámetro. Para ello, se genera una matriz de combinación de parámetros, combinando los parámetros seleccionados y empleando diferentes valores para cada parámetro, resultando ciento noventa y cuatro (194) combinaciones para cada elemento. La Tabla 4. 31 presenta la matriz de combinación de los parámetros:

**Tabla 4. 31.a.** Matriz de combinaciones para el ajuste de parámetros.

Combinación	Hormigón			Acero	
	$f_{cb}$	$f_1$	$f_2$	$E_s$	$f_s$
C1	65,565	655,65	43,71	2000000	3000
C2	65,565	655,65	43,71	1010000	1515
C3	65,565	655,65	43,71	2000000	1650
C4	131,13	655,65	43,71	2000000	3000
C5	131,13	655,65	43,71	1010000	1515
C6	131,13	655,65	43,71	2000000	1650
C7	218,55	655,65	43,71	2000000	3000
C8	218,55	655,65	43,71	1010000	1515
C9	218,55	655,65	43,71	2000000	1650
C10	65,565	83,31	148,1	2000000	3000
C11	65,565	83,31	148,1	1010000	1515
C12	65,565	83,31	148,1	2000000	1650
C13	131,13	83,31	148,1	2000000	3000
C14	131,13	83,31	148,1	1010000	1515
C15	131,13	83,31	148,1	2000000	1650
C16	218,55	83,31	148,1	2000000	3000
C17	218,55	83,31	148,1	1010000	1515
C18	218,55	83,31	148,1	2000000	1650
C19	65,565	655,65	437,1	2000000	3000
C20	65,565	655,65	437,1	1010000	1515
C21	65,565	655,65	437,1	2000000	1650
C22	131,13	655,65	437,1	2000000	3000
C23	131,13	655,65	437,1	1010000	1515
C24	131,13	655,65	437,1	2000000	1650
C25	218,55	655,65	437,1	2000000	3000
C26	218,55	655,65	437,1	1010000	1515
C27	218,55	655,65	437,1	2000000	1650
C28	65,565	43,71	240,405	1010000	1515



Tabla 4. 31.b. Matriz de combinaciones para el ajuste de parámetros.

Combinación	Hormigón			Acero	
	fcb	f1	f2	Es	fs
C29	54,6375	83,31	148,1	1010000	1515
C30	54,6375	43,71	240,405	1010000	1515
C31	65,565	83,31	148,1	1010000	1650
C32	65,565	43,71	240,405	1010000	1650
C33	54,6375	83,31	148,1	1010000	1650
C34	54,6375	43,71	240,405	1010000	1650
C35	65,565	43,71	43,71	1010000	1515
C36	152,985	43,71	240,405	1010000	1515
C37	152,985	43,71	43,71	1010000	1515
C38	65,565	43,71	240,405	500000	1515
C39	65,565	43,71	43,71	500000	1515
C40	152,985	43,71	240,405	500000	1515
C41	152,985	43,71	43,71	500000	1515
C42	65,565	655,65	655,65	2000000	1650
C43	52,45	83,31	148,1	2000000	1650
C44	52,45	655,65	655,65	2000000	1650
C45	65,565	83,31	148,1	1505000	300
C46	65,565	655,65	655,65	1505000	300
C47	52,45	83,31	148,1	1505000	300
C48	52,45	655,65	655,65	1505000	300
C49	131,13	1202,025	240,405	1010000	1515
C50	131,13	83,31	148,1	1010000	1515
C51	60,10125	1202,025	240,405	1010000	1515
C52	131,13	83,31	148,1	1505000	975
C53	131,13	1202,025	240,405	1505000	975
C54	60,10125	83,31	148,1	1505000	975
C55	60,10125	1202,025	148,1	1505000	975
C56	60,10125	349,68	655,65	1010000	1515
C57	71,02875	83,31	148,1	1010000	1515
C58	71,02875	349,68	655,65	1010000	1515
C59	60,10125	83,31	148,1	1505000	1515
C60	60,10125	349,68	655,65	1505000	1515
C61	71,02875	83,31	148,1	1505000	1515
C62	71,02875	349,68	655,65	1505000	1515
C63	152,985	43,71	655,65	500000	1515
C64	196,695	43,71	240,405	500000	1515
C65	196,695	43,71	655,65	500000	1515
C66	152,985	43,71	240,405	500000	975
C67	152,985	43,71	655,65	500000	975
C68	196,695	43,71	240,405	500000	975
C69	196,695	43,71	655,65	500000	975
C70	65,565	349,68	874,2	1010000	1650
C71	49,17375	83,31	148,1	1010000	1650
C72	49,17375	349,68	874,2	1010000	1650
C73	65,565	83,31	148,1	500000	1650
C74	65,565	349,68	874,2	500000	1650
C75	49,17375	83,31	148,1	500000	1650
C76	49,17375	349,68	874,2	500000	1650
C77	65,565	1311,3	655,65	1505000	300
C78	76,4925	655,65	655,65	1505000	300

Tabla 4. 31.c. Matriz de combinaciones para el ajuste de parámetros.

Combinación	Hormigón			Acero	
	fc <sub>b</sub>	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	Es	fs
C79	76,4925	1311,3	655,65	1505000	300
C80	65,565	655,65	655,65	1010000	975
C81	65,565	1311,3	655,65	1010000	975
C82	76,4925	655,65	655,65	1010000	975
C83	76,4925	1311,3	655,65	1010000	975
C84	65,565	1202,025	874,2	2000000	3000
C85	81,95625	83,31	148,1	2000000	3000
C86	81,95625	1202,025	874,2	2000000	3000
C87	65,565	83,31	148,1	2000000	1515
C88	65,565	1202,025	874,2	2000000	1515
C89	81,95625	83,31	148,1	2000000	1515
C90	81,95625	1202,025	874,2	2000000	1515
C91	218,55	83,31	148,1	2000000	975
C92	218,55	655,65	437,1	2000000	975
C93	65,565	83,31	148,1	2000000	975
C94	65,565	655,65	437,1	2000000	975
C95	152,985	349,68	655,65	1010000	1515
C96	60,10125	43,71	240,405	1010000	1515
C97	152,985	43,71	240,405	1505000	3000
C98	152,985	349,68	655,65	1505000	3000
C99	60,10125	43,71	240,405	1505000	3000
C100	60,10125	349,68	655,65	1505000	3000
C101	71,02875	43,71	43,71	1010000	1515
C102	152,985	43,71	43,71	500000	300
C103	152,985	349,68	655,65	500000	300
C104	71,02875	43,71	43,71	500000	300
C105	71,02875	349,68	655,65	500000	300
C106	60,10125	43,71	655,65	1505000	1515
C107	196,695	83,31	148,1	1505000	1515
C108	196,695	43,71	655,65	1505000	1515
C109	196,695	83,31	148,1	500000	975
C110	60,10125	83,31	148,1	500000	975
C111	60,10125	43,71	655,65	500000	975
C112	60,10125	83,31	148,1	20000	30
C113	60,10125	43,71	655,65	20000	30
C114	196,695	83,31	148,1	20000	30
C115	196,695	43,71	655,65	20000	30
C116	71,02875	43,71	655,65	1505000	1515
C117	152,985	83,31	148,1	1505000	1515
C118	152,985	43,71	655,65	1505000	1515
C119	152,985	83,31	148,1	500000	1515
C120	71,02875	83,31	148,1	500000	1515
C121	71,02875	43,71	655,65	500000	1515
C122	71,02875	83,31	148,1	500000	30
C123	71,02875	43,71	655,65	500000	30
C124	152,985	83,31	148,1	500000	30
C125	152,985	43,71	655,65	500000	30
C126	152,985	349,68	874,2	500000	975
C127	65,565	43,71	655,65	500000	975
C128	65,565	349,68	874,2	500000	975

Tabla 4. 31.d. Matriz de combinaciones para el ajuste de parámetros.

Combinación	Hormigón			Acero	
	fc <sub>b</sub>	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	E <sub>s</sub>	f <sub>s</sub>
C129	65,565	43,71	655,65	1010000	1650
C130	152,985	43,71	655,65	1010000	1650
C131	152,985	349,68	874,2	1010000	1650
C132	152,985	43,71	655,65	200000	300
C133	152,985	349,68	874,2	200000	300
C134	65,565	43,71	655,65	200000	300
C135	65,565	349,68	874,2	200000	300
C136	49,17375	655,65	43,71	2000000	3000
C137	49,17375	83,31	148,1	2000000	3000
C138	49,17375	655,65	43,71	1010000	1650
C139	65,565	655,65	43,71	1010000	1650
C140	131,13	349,68	874,2	1010000	1515
C141	49,17375	655,65	43,71	1010000	1515
C142	49,17375	349,68	874,2	1010000	1515
C143	49,17375	655,65	43,71	1010000	1650
C144	131,13	655,65	43,71	1010000	1650
C145	131,13	349,68	874,2	1010000	1650
C146	49,17375	83,31	148,1	2000000	3000
C147	131,13	83,31	148,1	500000	1650
C148	131,13	349,68	874,2	2000000	1650
C149	49,17375	83,31	148,1	2000000	1650
C150	49,17375	349,68	874,2	2000000	1650
C151	131,13	349,68	874,2	500000	1650
C152	218,55	349,68	874,2	1010000	1515
C153	65,565	655,65	437,1	1010000	1515
C154	65,565	349,68	874,2	1010000	1515
C155	65,565	655,65	437,1	500000	1650
C156	218,55	655,65	437,1	500000	1650
C157	218,55	349,68	874,2	500000	1650
C158	54,6375	83,31	148,1	500000	1650
C159	196,695	43,71	240,405	1010000	1650
C160	65,565	43,71	240,405	500000	975
C161	152,985	349,68	655,65	500000	1515
C162	71,02875	43,71	43,71	500000	1515
C163	71,02875	349,68	655,65	500000	1515
C164	71,02875	43,71	43,71	1505000	1515
C165	152,985	43,71	43,71	1505000	1515
C166	152,985	349,68	655,65	1505000	1515
C167	65,565	349,68	655,65	2000000	1650
C168	60,10125	655,65	655,65	2000000	1650
C169	60,10125	349,68	655,65	2000000	1650
C170	60,10125	655,65	655,65	1505000	1515
C171	65,565	655,65	655,65	1505000	1515
C172	65,565	349,68	655,65	1505000	1515
C173	131,13	655,65	655,65	1010000	1515
C174	76,4925	1202,025	240,405	1010000	1515
C175	76,4925	655,65	655,65	1010000	1515
C176	76,4925	1202,025	240,405	1010000	975
C177	131,13	1202,025	240,405	1010000	975
C178	131,13	655,65	655,65	1010000	975

**Tabla 4. 31.e.** Matriz de combinaciones para el ajuste de parámetros.

Combinación	Hormigón			Acero	
	fc <sub>b</sub>	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	E <sub>s</sub>	f <sub>s</sub>
C179	60,10125	655,65	655,65	1010000	1515
C180	65,565	1202,025	240,405	1010000	1515
C181	65,565	655,65	655,65	1010000	1515
C182	65,565	1202,025	240,405	1010000	975
C183	60,10125	1202,025	240,405	1010000	975
C184	60,10125	655,65	655,65	1010000	975
C185	52,45	1202,025	240,405	2000000	1650
C186	60,10125	83,31	148,1	2000000	1650
C187	60,10125	1202,025	240,405	2000000	1650
C188	52,45	1202,025	240,405	1505000	975
C189	131,13	43,71	240,405	1505000	975
C190	152,985	83,31	148,1	1505000	975
C191	152,985	43,71	240,405	1505000	975
C192	152,985	83,31	148,1	500000	975
C193	131,13	83,31	148,1	500000	975
C194	131,13	43,71	240,405	500000	975

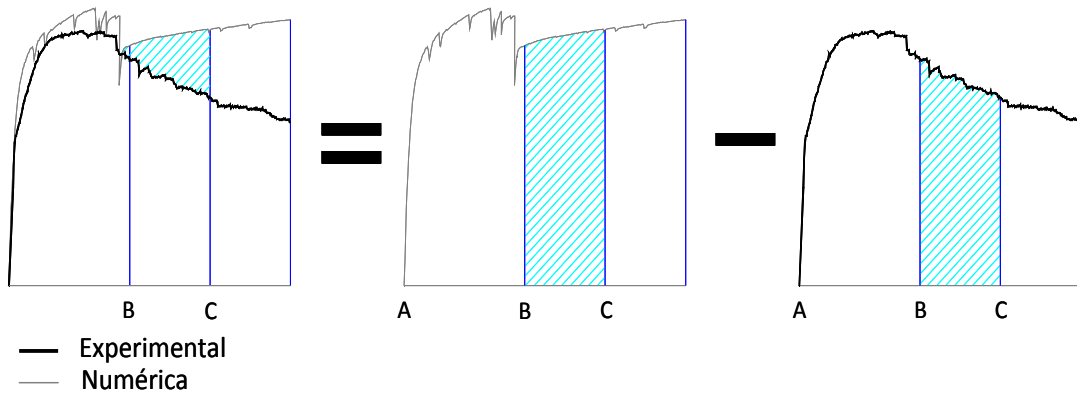
Una vez realizadas las ciento noventa y cuatro (194) combinaciones y con el fin de determinar las mejores combinaciones, se decide que el criterio que será evaluado es la energía. La selección de las combinaciones más ajustadas para cada uno de los elementos estudiados se realiza a través del proceso de selección que se detalla a continuación.

1. Se divide la curva por tramos de flecha, y en cada uno de los tramos se calcula el área bajo la curva (energía), tanto para la curva media del ensayo experimental como para las 194 curvas numéricas.

De este modo, para el elemento EN 14651 se calcula la energía en los tramos: 0-0,5, 0,5-1, 1-1,5, 1,5-2,5 y 2,5-3,5; en el elementos ASTM1018 en los tramos 0-0,5, 0,5-1, 1-1,5, 1,5-2 y 2-2,5; y para las placas 1 y 2 en los tramos 0-1, 1-2, 2-4, 4-6, 6-8 y 8-10.

2. Para cada tramo se valora la diferencia de área (energía) entre la curva numérica y la media experimental ( $Dif_{(Num-Exp)}$ ) en porcentaje, aplicando la siguiente fórmula. La Figura 4. 48 ilustra el procedimiento.

$$Dif_{(Num-Exp)}(\%) = \frac{|A_{NumTramo BC} - A_{ExpTramo BC}|}{A_{ExpTramo BC}} * 100 \quad (4. 13)$$



**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.

3. La diferencia de área (energía) para cada tramo se pondera con un peso (P) que se asigna a cada nivel de flecha. Lo anterior obedece a la necesidad de otorgar una mejor valoración a las curvas que presentan similitud a la curva experimental en los niveles de flecha próximos a la primera fisura; puesto que es en esta etapa cuando el modelo tiende a descontrolarse y a no converger. En la Tabla 4. 32 se presenta la asignación de pesos para cada uno de los tramos evaluados en cada elemento.

**Tabla 4. 32.** Peso asignado a cada uno de los tramos para cada elemento.

EN14651	
Tramo	P
0,0 - 0,5	0,25
0,5 - 1,0	0,25
1,0 - 1,5	0,25
1,5 - 2,5	0,15
2,5 - 3,5	0,10
ASTM1018	
Tramo	P
0,0 - 0,5	0,35
0,5 - 1,0	0,25
1,0 - 1,5	0,20
1,5 - 2,0	0,10
2,0 - 2,5	0,10
PLACAS 1 Y 2	
Tramo	P
0,0 - 1,0	0,25
1,0 - 2,0	0,25
2,0 - 4,0	0,20
4,0 - 6,0	0,20
6,0 - 8,0	0,05
8,0 - 10,0	0,05

Por otra parte, los tramos iniciales son los de mayor interés ya que cubren la respuesta en servicio del elemento, mientras que, los tramos finales llegan a cubrir incluso fases posteriores a la rotura total del elemento.

4. Una vez ponderadas las diferencias de área, se calcula el valor medio de dichas diferencias. Para considerar todas las curvas, pero considerando los problemas de convergencia, y por tanto, valorando el hecho que en una simulación no se alcance el valor máximo de flecha previsto, el valor medio es calculado de dos formas:
  - ✓ Media de los niveles a los que llega la curva D1 (%).

Por ejemplo, D1 para el elemento EN14651 es:

$$D1(\%) = \frac{0,25Dif_{(Num-Exp)}^{(\%)}_{0-0,5} + 0,25Dif_{(Num-Exp)}^{(\%)}_{0,5-1,0} + 0,25Dif_{(Num-Exp)}^{(\%)}_{1,0-1,5} + 0,15Dif_{(Num-Exp)}^{(\%)}_{1,5-2,5} + 0,1Dif_{(Num-Exp)}^{(\%)}_{2,5-3,5}}{N1} \quad (4.14)$$

Donde:

N1 = número de tramos hasta donde llega la curva numérica.

- ✓ Media de todos los niveles, valorando como cero las diferencias en los niveles a los que no llega la curva D2 (%). Por ejemplo, D2 para el elemento EN14651 es:

$$D2(\%) = \frac{0,25Dif_{(Num-Exp)}^{(\%)}_{0-0,5} + 0,25Dif_{(Num-Exp)}^{(\%)}_{0,5-1,0} + 0,25Dif_{(Num-Exp)}^{(\%)}_{1,0-1,5} + 0,15Dif_{(Num-Exp)}^{(\%)}_{1,5-2,5} + 0,1Dif_{(Num-Exp)}^{(\%)}_{2,5-3,5}}{N2} \quad (4.15)$$

Donde:

N2 = número de tramos considerados.

5. Se calcula una media corregida Dc (en porcentaje) valorando el nivel que alcanza la curva. Como las curvas que dejan de converger antes de la flecha objetivo tendrán un valor de D2 menor que D1, Dc será mayor que D1 y por tanto, las curvas que no llegan al nivel de flecha máximo considerado son penalizadas.

$$Dc(\%) = D1x \left[ \frac{D1}{D2} \right]^3 \quad (4.16)$$

6. Se ordenan los valores de la media corregida (Dc) de menor a mayor.

Las combinaciones numéricas son ordenadas de acuerdo con los valores de Dc, de menor a mayor y se asigna una posición basada en esta ordenación; de esta manera, se tiene un ranking desde la posición 1 hasta la 194.

El Anejo D contiene las tablas que presentan los valores de Dc y el ranking de las 194 combinaciones para cada uno de los cuatro elementos analizados.

## 7. Selección de combinaciones.

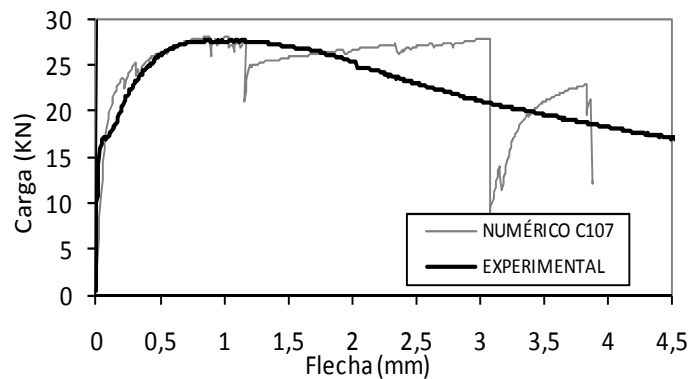
La Tabla 4. 33 resume las combinaciones que ocupan las cinco primeras posiciones en el ranking, para cada uno de los cuatro elementos analizados.

**Tabla 4. 33.** Cinco mejores combinaciones para cada elemento.

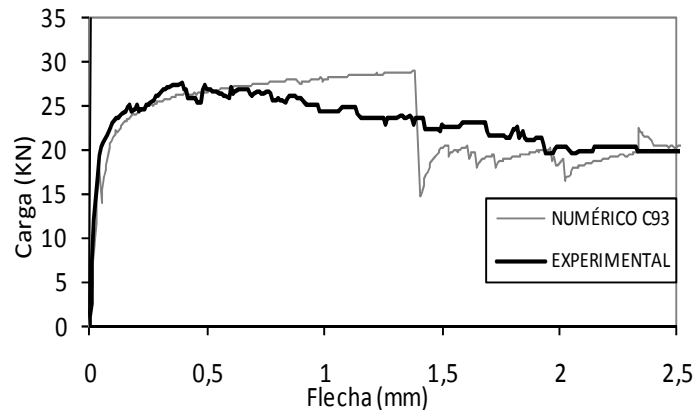
Elemento \ Posición	1	2	3	4	5
EN14651	107	36	97	117	136*
ASTM1018	93	43	91	27	29
PLACA 1	96	25	26	29	13
PLACA 2	96	161	151	31	74

\* Curva hasta flecha 0,5mm

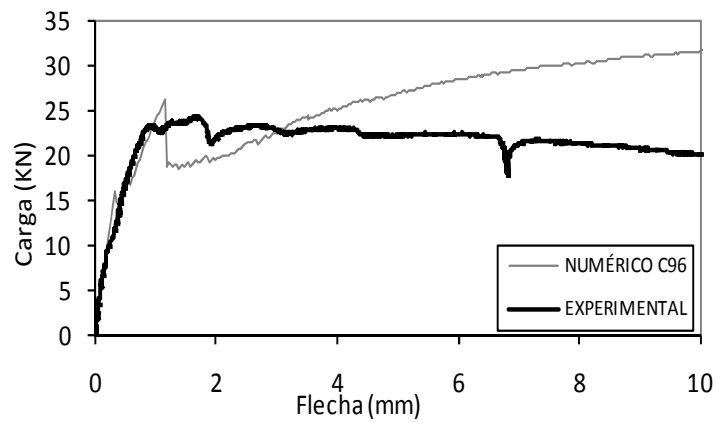
Las Figuras 4. 49 a 4. 52, presentan las curvas carga-flecha de las combinaciones numéricas que ocupan el primer lugar en el ranking para cada uno de los cuatro elementos considerados.



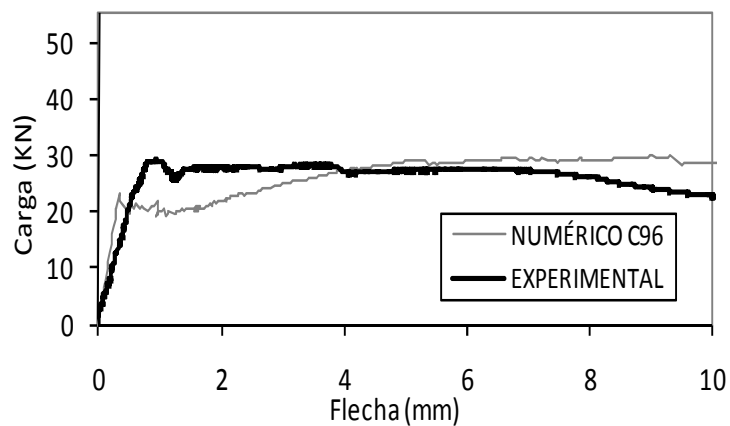
**Figura 4. 49.** Comparación curva carga-flecha experimental media con la curva carga-flecha numérica 107, correspondiente a la mejor combinación de acuerdo con ranking individual, EN14651.



**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.



**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.



**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.

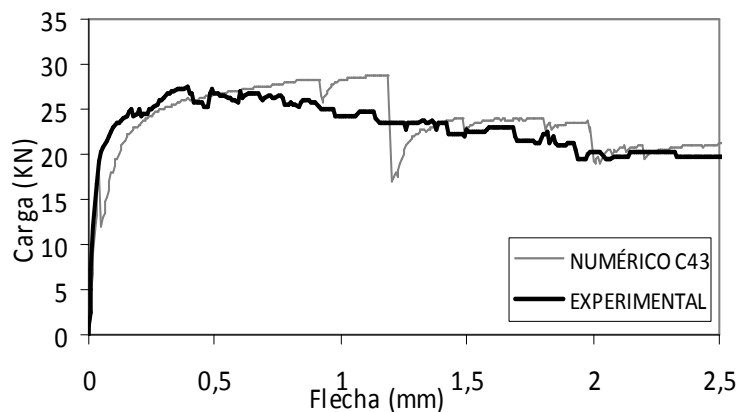


Adicional al ranking de las combinaciones numéricas resultante del cálculo de la media corregida  $D_c$ , se decide verificar gráficamente las curvas carga-flecha obtenidas de las ciento noventa y cuatro (194) combinaciones numéricas y compararlas con la curva experimental media para los cuatro elementos.

Una vez se realiza la verificación gráfica, son ocho (8) las combinaciones numéricas más ajustadas:

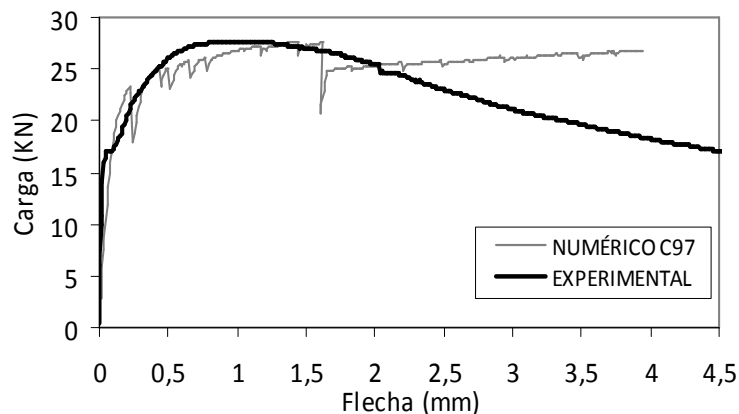
- Tres (3) son número uno en los ranking individuales (combinaciones 93, 96 y 107), corroborando así el procedimiento realizado previamente.
- Tres (3) son elegidas por su forma y además hacen parte de las cinco mejores combinaciones en el ranking individual (combinaciones 43, 97 y 161).
- Finalmente, se eligen otras dos (2) por su forma, pese a que no se encuentran bien situadas dentro de los ranking individuales (combinaciones 87 y 123) sus tendencias se adaptan bien a los resultados experimentales.

La combinación 43 para la probeta prismática ASTM1018 entre 1 y 1,5mm de flecha presenta un salto pero su forma se ajusta bastante bien a lo largo de los niveles de flecha estudiados, Figura 4. 53.



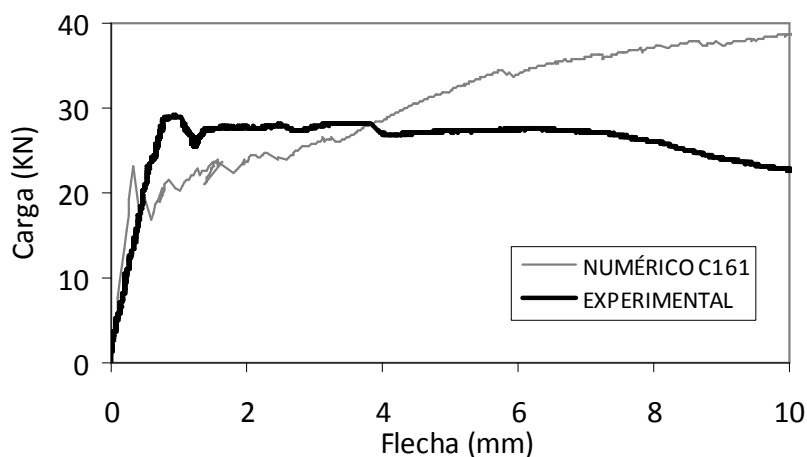
**Figura 4. 53.** Comparación curva carga-flecha experimental media con la curva carga-flecha numérica 43, correspondiente a una de las mejores combinaciones de acuerdo con la verificación gráfica y el ranking individual, ASTM1018.

En la combinación 97 para la probeta EN14651, se aprecia un buen ajuste hasta los 2mm de flecha, a partir de este punto se presenta un leve endurecimiento, Figura 4. 54, apartándose del comportamiento real de la probeta.



**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.

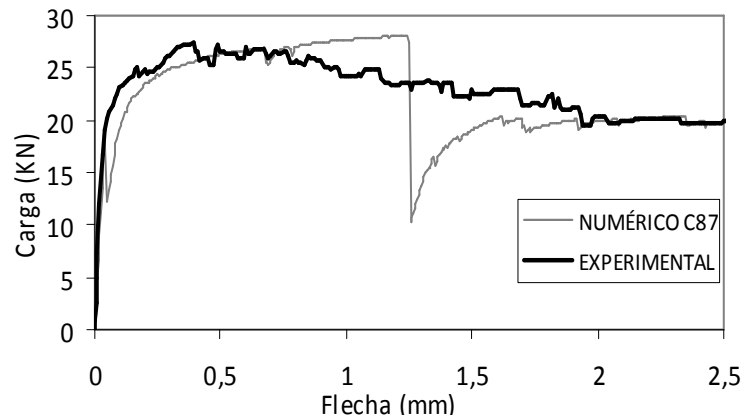
En la combinación 161 para la Placa 2, se observa que hasta los 4mm de flecha hay un ajuste adecuado, a partir de este punto se presenta un endurecimiento del elemento. Cuando se comparan la capacidad de disipación de energía (área bajo la curva) entre la curva numérica y la media experimental de este elemento, aparece un efecto compensatorio de las energías, ya que antes de los 4mm la curva numérica se encuentra por debajo de la experimental y después de 4mm se encuentra por encima de esta Figura 4. 55.



**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.

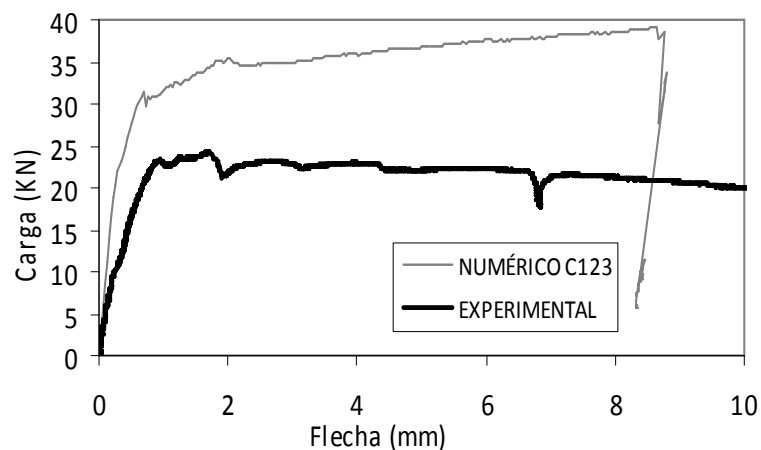
Finalmente, se presentan las gráficas de las combinaciones 87 y 123 para la ASTM1018 y las placas delgadas, respectivamente. Estas combinaciones se tienen en cuenta por su forma. La combinación 87 tiene un buen ajuste a lo largo de todo el

recorrido pese a que entre 1mm y 1.5mm de flecha presenta un salto, evidenciando descontrol en la forma de rotura del elemento, Figura 4. 56.

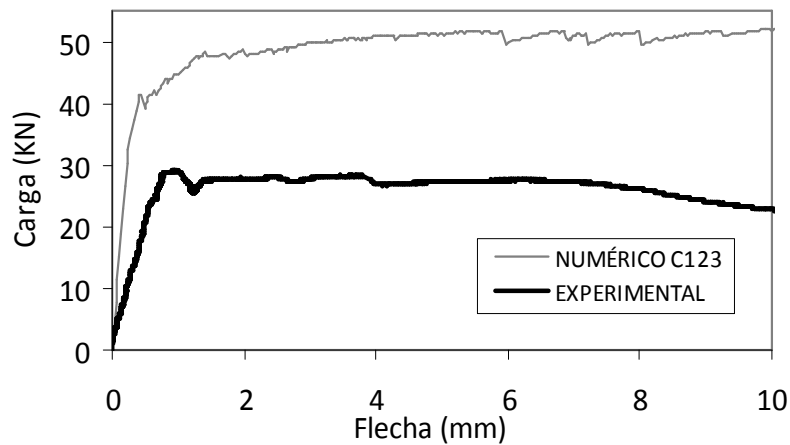


**Figura 4. 56.** Comparación curva carga-flecha experimental media con la curva carga-flecha numérica 87, correspondiente a una de las mejores combinaciones de acuerdo con la verificación gráfica, ASTM1018.

Al compararse los resultados experimentales de la placa 1 y placa 2 con los resultados numéricos de la combinación 123, se observa una forma similar a lo largo del recorrido lo que indica que variando el valor de la resistencia residual ( $f_r$ ) se puede obtener un ajuste adecuado para estos elementos Figura 4. 57 y Figura 4. 58. La reducción en la resistencia residual se debe a que en las placas las fibras no presentan una orientación preferencial debido a su geometría plana.



**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.



**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.

Para ello se modifica  $f_r$  según el criterio

$$f_r' = 0.55 \cdot f_r \quad (4.17)$$

Donde:

$f_r'$ : Resistencia residual modificada (la cual será empleada en el modelo).

$f_r$ : Resistencia residual experimental de acuerdo con el ensayo EN14651.

De este modo, se afecta la cantidad de armado equivalente en las placas, ya que estos elementos a la hora de ser fabricados carecen de una orientación preferencial de las fibras. Por tanto, el valor modificado del armado equivalente  $\rho_s'$  es:

$$\rho_s' = \frac{f_r'}{f_s} \quad (4.18)$$

Reemplazando  $f_r'$  se tiene que:

$$\rho_s' = \frac{0,55 f_r}{f_s} \quad (4.19)$$

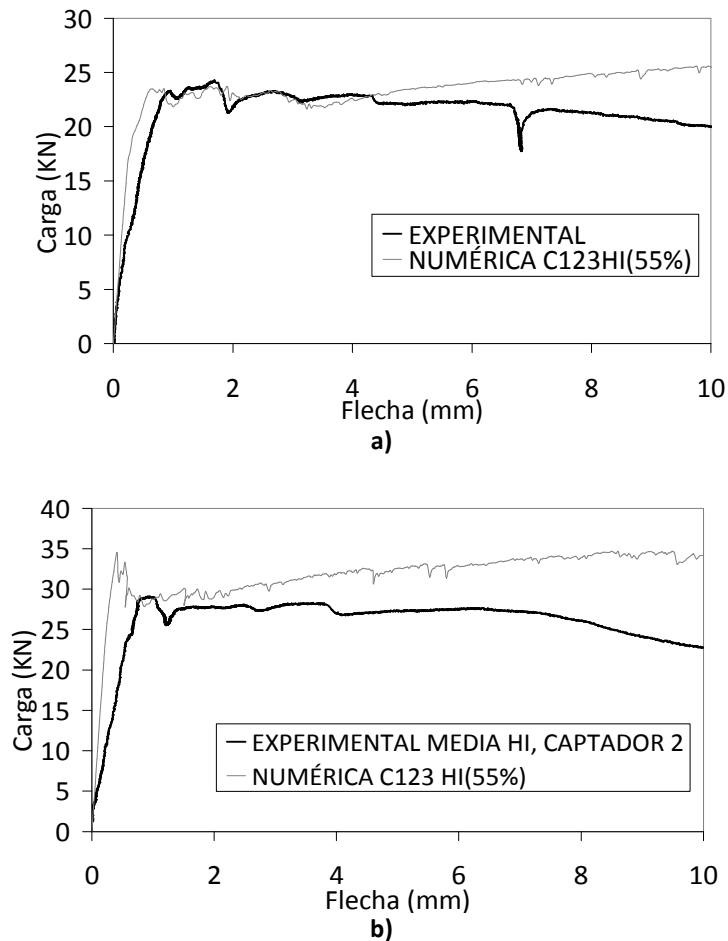
Por definición (ecuación 3.2) se tiene que:

$$\rho_s = \frac{fr}{fs} \quad (4. 20)$$

Reemplazando se tiene que:

$$\rho_s' = 0,55 \cdot \rho_s$$

Con lo anterior se modifica la capacidad resistente de los elementos tipo placa, y la curva carga-flecha de la combinación 123 conserva su forma y presenta una reducción en la capacidad de carga, ajustándose mejor a los resultados experimentales (Figura 4. 59). Lo anterior se evidencia al calcular los valores de  $D_c$  del hormigón HI para la combinación 123 con reducción en su resistencia residual (Tabla 4. 39).



**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.

La Tabla 4. 34 presenta los valores de los parámetros  $f_{cb}$ ,  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $E_s$  y  $f_s$  para cada una de las combinaciones elegidas.

**Tabla 4. 34.** Relación de los parámetros influyentes con las combinaciones elegidas.

Combinaciones Elegidas	Parámetros									
	fcb		f1		f2		Es		fs	
	# Id	fcb(fc)	# Id	f1(fc)	# Id	F2(fc)	# Id	Valor Numérico (MPa)	# Id	Valor Numérico (MPa)
c43	0	1,2fc	0	1,9fc	0	3,4fc	3	2000000	5	1650
c87	14	1,5fc	0	1,9fc	0	3,4fc	3	2000000	4	1515
c93	14	1,5fc	0	1,9fc	0	3,4fc	3	2000000	6	975
c96	20	1,37fc	1	1fc	4	5,5fc	4	1010000	4	1515
c97	15	3,5fc	1	1fc	4	5,5fc	5	1505000	3	3000
c107	16	1,25fc	0	1,9fc	0	3,4fc	5	1505000	4	1515
c123	21	1,63fc	1	1fc	5	15fc	6	500000	1	30
c161	15	3,5fc	4	8fc	5	15fc	6	500000	4	1515

Se observa coincidencia en los valores de los parámetros de las combinaciones más ajustadas para los elementos tipo probeta prismática: fcb (1,2-1,5fc), f1 (1,9fc), f2 (3,4fc), Es (2000000MPa), y fs (1515-1650MPa). Dicha coincidencia permite concluir que combinaciones numéricas con estos valores pueden presentar un buen ajuste para este tipo de elementos.

#### 4.8.5. COMPARACIÓN DE LOS AJUSTES CON LA VARIABILIDAD DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Con el fin de determinar la variabilidad de los resultados experimentales se calcula la media corregida  $D_c$  para cada una de las probetas de cuatro de los elementos ensayados, con respecto a la curva media experimental de los hormigones HI, HA y HB. Los valores de  $D_c$  permiten conocer que las curvas numéricas cuyo  $D_c$  no supere el  $D_c$  máximo para cada hormigón presentan un ajuste permisible teniendo en cuenta los resultados experimentales.

Las Tablas 4.35 a 4. 38 muestran los valores de  $D_c$  experimentales para los elementos EN14651, ASTM1018, placa 1 y placa 2, respectivamente. Las probetas del elemento ASTM1018 son las que presentan mayor variación, lo que sugiere que no es tan razonable tratar de ajustarse a los valores experimentales medios, sobretodo bajo las condiciones del hormigón HI. Por su parte, las placas 1 y 2 presentan valores de  $D_c$  relativamente bajos, debido a que sólo se ensayaron dos probetas para los hormigones HA y HB. No es posible calcular  $D_c$  de las probetas fabricadas con el hormigón HI para las placas 1 y 2 ya que sólo se elaboró una probeta para cada ensayo.

**Tabla 4. 35.** Valores de Dc con respecto a la curva media experimental de los hormigones HI, HA y HB, EN14651.

Dc=D1x(D1/D2)^3	
HI	
EN14651 HI1	1,12
EN14651 HI2	1,12
HA	
EN14651 HA1	1,51
EN14651 HA2	1,94
EN14651 HA3	0,47
HB	
EN14651 HB1	3,32
EN14651 HB2	0,42
EN14651 HB3	3,07

Al comparar los valores de Dc experimentales y numéricos para el elemento EN14651, se observa que seis (6) de las combinaciones numéricas presentan un valor de Dc inferior al experimental; lo que evidencia que la simulación de este tipo de elemento es viable con éxito con cualquiera de los valores de los parámetros seleccionados.

**Tabla 4. 36.** Valores de Dc con respecto a la curva media experimental de los hormigones HI, HA y HB, ASTM1018.

Dc=D1x(D1/D2)^3	
HI	
ASTM1018HI1	6,42
ASTM1018HI2	6,18
ASTM1018HI3	6,25
ASTM1018HI4	6,57
HA	
ASTM1018HA1	4,91
ASTM1018HA2	2,20
ASTM1018HA3	2,45
ASTM1018HA4	0,84
HB	
ASTM1018HB1	1,88
ASTM1018HB2	1,97
ASTM1018HB3	1,22
ASTM1018HB4	1,22

Contrario al elemento EN14651, para el elemento ASTM1018 son ciento setenta y dos (172) las combinaciones numéricas que presentan un valor de  $D_c$  inferior al  $D_c$  experimental, lo que muestra que cambios en los parámetros empleados no influyen significativamente en la respuesta carga flecha de este tipo de probeta.

**Tabla 4. 37.** Valores de  $D_c$  con respecto a la curva media experimental de los hormigones HA y HB, Placa 1.

$D_c = D_1 \times (D_1/D_2)^3$	
HA	
Placa 1 HA1	1,72
Placa 1 HA2	1,72
HB	
Placa 1 HB1	1,73
Placa 1 HB2	1,73

**Tabla 4. 38.** Valores de  $D_c$  con respecto a la curva media experimental del captador 2 para los hormigones HA y HB, Placa 2.

$D_c = D_1 \times (D_1/D_2)^3$	
HA Captador 2	
Placa 2 HA1	1,27
Placa 2 HA2	1,27
HB Captador 2	
Placa 2 HB1	1,03
Placa 2 HB2	1,03

Para la placa 1, la combinación más ajustada al hormigón HI presenta un  $D_c$  de 2,14 (combinación numérica 96); al no tener un  $D_c$  experimental para HI no es posible hacer una comparación directa de las medias corregidas. Sin embargo, con la combinación 123 con reducción en un 55% en la resistencia residual, se obtiene un valor de  $D_c$  inferior ( $D_c=1,55$ ). En el Anejo D se muestra el cálculo de  $D_c$  para todas las combinaciones numéricas.

Algo similar sucede con la placa 2, cuya combinación numérica más ajustada (combinación numérica 96) presenta un  $D_c$  de 3,27 hasta un nivel de flecha de 4mm, y de 2,01 para un nivel de flecha de 10mm; pero al calcularse el valor de  $D_c$  para la combinación 123 con reducción en un 55% en la resistencia residual, se obtiene un valor de  $D_c$  de 1,63 para un nivel de flecha de 4mm y de 3,30 para un nivel de flecha de 10mm. Aparentemente, la combinación más ajustada sería la combinación 96 al presentar un valor de  $D_c$  inferior hasta un nivel de flecha de 10mm; sin embargo, se debe considerar el efecto compensatorio de esta curva. Es por ello que la combinación



123 con reducción en la resistencia residual se considera una mejor alternativa (Tabla 4. 39).

**Tabla 4. 39.** Valores de Dc obtenidos con las combinaciones numéricas 96 y 123 con reducción en la resistencia residual fr a un 55%.

	Dc=D1x(D1/D2)^3	
	HI (4mm)	HI (10mm)
Placa 2 C96	3,27	2,01
Placa 2 C123 (55%)	1,63	3,3

La Tabla 4. 40 resume los valores de Dc para cada una de las combinaciones seleccionadas como las más ajustadas, calculados con respecto a la curva carga-flecha experimental media HI, y su posición dentro del ranking de cada elemento estudiado.

**Tabla 4. 40.** Valores de Dc y posición dentro del ranking individual de las combinaciones elegidas.

Combinaciones Elegidas	EN14651		ASTM1018		Placa 1		Placa 2	
	Dc (%)	Posición	Dc (%)	Posición	Dc (%)	Posición	Dc (%)	Posición
c43	7,8	64	1,35	2	16,92	176	8,46	131
c87	8,06	143	2,78	63	3,44	16	6,39	98
c93	7,21	58	1,31	1	106,39	190	8,64	140
c96	84,18	170	4,23	118	2,14	1	2,01	1
c97	0,99	2	4,23	119	2,84	29	4,16	28
c107	0,81	1	6,49	172	2,93	37	7,65	108
c161	70,33	165	2,3	37	2,98	41	2,61	2
c123 (fr55%)	-	-	-	-	1,55	-	1,63*	-

\* Dc hasta un nivel de flecha de 4mm

Con el procedimiento de selección realizado ha sido posible encontrar combinaciones numéricas que permiten simular el comportamiento de los elementos estudiados y obtener resultados bastante ajustados.

#### 4.8.6. ANÁLISIS DE ADECUACIÓN AL CONJUNTO DE LOS ELEMENTOS ENSAYADOS.

Dado que no hay una coincidencia clara entre los parámetros que conducen al mejor ajuste en cada uno de los elementos, se decide plantear un criterio de selección que considerara la adecuación de forma conjunta. El criterio de ordenación consiste en la suma de la posiciones (SR<sub>i</sub>) de cada combinación para cada uno de los elementos (Tabla 4. 41). Posteriormente, se ordena de forma ascendente, lo que permite valorar

conjuntamente el grado de adaptación a todos los elementos estudiados. La tabla que resume el criterio de ordenación para las 194 combinaciones, resultante del análisis en conjunto se presenta en el Anejo D.

**Tabla 4. 41.** Criterio de ordenación de las mejores combinaciones, para el conjunto de los cuatro elementos.

	EN14651	ASTM1018	PLACA1	PLACA2	SRI	Orden
C1	$P_{EN}(C_i)$	$P_{ASTM}(C_i)$	$P_{P1}(C_i)$	$P_{P2}(C_i)$	$P_{EN}(C_i)+P_{ASTM}(C_i)+P_{P1}(C_i)+P_{P2}(C_i)$	Menor
C2	$P_{EN}(C_i)$	$P_{ASTM}(C_i)$	$P_{P1}(C_i)$	$P_{P2}(C_i)$	$P_{EN}(C_i)+P_{ASTM}(C_i)+P_{P1}(C_i)+P_{P2}(C_i)$	↓
C3	$P_{EN}(C_i)$	$P_{ASTM}(C_i)$	$P_{P1}(C_i)$	$P_{P2}(C_i)$	$P_{EN}(C_i)+P_{ASTM}(C_i)+P_{P1}(C_i)+P_{P2}(C_i)$	
C4	$P_{EN}(C_i)$	$P_{ASTM}(C_i)$	$P_{P1}(C_i)$	$P_{P2}(C_i)$	$P_{EN}(C_i)+P_{ASTM}(C_i)+P_{P1}(C_i)+P_{P2}(C_i)$	
C5	$P_{EN}(C_i)$	$P_{ASTM}(C_i)$	$P_{P1}(C_i)$	$P_{P2}(C_i)$	$P_{EN}(C_i)+P_{ASTM}(C_i)+P_{P1}(C_i)+P_{P2}(C_i)$	
.	$P_{EN}(C_i)$	$P_{ASTM}(C_i)$	$P_{P1}(C_i)$	$P_{P2}(C_i)$	$P_{EN}(C_i)+P_{ASTM}(C_i)+P_{P1}(C_i)+P_{P2}(C_i)$	
.	$P_{EN}(C_i)$	$P_{ASTM}(C_i)$	$P_{P1}(C_i)$	$P_{P2}(C_i)$	$P_{EN}(C_i)+P_{ASTM}(C_i)+P_{P1}(C_i)+P_{P2}(C_i)$	
.	$P_{EN}(C_i)$	$P_{ASTM}(C_i)$	$P_{P1}(C_i)$	$P_{P2}(C_i)$	$P_{EN}(C_i)+P_{ASTM}(C_i)+P_{P1}(C_i)+P_{P2}(C_i)$	
.	$P_{EN}(C_i)$	$P_{ASTM}(C_i)$	$P_{P1}(C_i)$	$P_{P2}(C_i)$	$P_{EN}(C_i)+P_{ASTM}(C_i)+P_{P1}(C_i)+P_{P2}(C_i)$	
.	$P_{EN}(C_i)$	$P_{ASTM}(C_i)$	$P_{P1}(C_i)$	$P_{P2}(C_i)$	$P_{EN}(C_i)+P_{ASTM}(C_i)+P_{P1}(C_i)+P_{P2}(C_i)$	
C194	$P_{EN}(C_i)$	$P_{ASTM}(C_i)$	$P_{P1}(C_i)$	$P_{P2}(C_i)$	$P_{EN}(C_i)+P_{ASTM}(C_i)+P_{P1}(C_i)+P_{P2}(C_i)$	

Es así como las diez combinaciones más ajustados para el conjunto de los elementos son:

**Tabla 4. 42.** Mejores combinaciones para el conjunto de los cuatro elementos.

Elem. Comb.	EN14651	ASTM1018	PLACA 1	PLACA 2	SRI	orden
32	17	69	19	53	158	1
14	11	75	8	72	166	2
134	13	79	14	62	168	3
50	12	76	9	73	170	4
109	10	92	39	29	170	5
129	54	50	18	56	178	6
97	3	119	29	28	179	7
13	16	85	5	78	184	8
28	33	64	10	79	186	9
130	8	111	26	44	189	10

Dada la falta de coincidencia, y teniendo en cuenta que cada combinación numérica ocupa un ranking para cada elemento, se decide conocer su nivel de

concordancia o unanimidad empleando el coeficiente de concordancia Kendall (W) (Kendall y Babington, 1939). Este coeficiente se evalúa por medio de:

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12}k^2(n^3 - n)}; \quad S = \sum (SR_i - SR)^2 \quad (4.21)$$

Donde:

- W = Coeficiente de Kendall.
- k = número de elementos.
- n = número de combinaciones.
- SR<sub>i</sub> = suma de las posiciones de los ranking.
- SR = media de todos los SR<sub>i</sub>.

Según:

- Si W = 1, es porque hay total unanimidad entre los ensayos, dando lugar al mismo ranking.
- Si W = 0, es porque no hay ni el más mínimo punto de acuerdo entre los ensayos.

En función de si W queda más cerca de 0 o más cerca de 1, se puede valorar hasta qué punto tiene sentido determinar un ranking general a partir de los ranking particulares.

El coeficiente de Kendall (W) obtenido analizando los cuatro elementos conjuntamente es de 0,36, lo que evidencia un nivel de unanimidad medio, por tanto, los elementos estudiados no son lo suficientemente comparables como para poder establecer un ranking general de las combinaciones. Por lo cual, se decide evaluar grupos de elementos para determinar su unanimidad y por tanto posibilidad de comparación. En el Anejo D se presentan las tablas que ilustran el procedimiento de obtención del coeficiente de Kendall (W) para grupos de elementos. La Tabla 4. 43 resume el coeficiente de Kendall (W) obtenido para cada grupo analizado.

**Tabla 4. 43.** Coeficiente de Kendall (W) para grupo de elementos.

No. Elem.	EN14651	ASTM1018	PLACA 1	PLACA 2	W
4	X	X	X	X	0,36
2	X	X			0,50
2	X		X		0,63
2	X			X	0,62
2	X		X	X	0,52
2		X	X		0,41
2		X		X	0,61
2			X	X	0,67

Este análisis conduce a considerar que las dos placas ensayadas mantienen un nivel de concordancia amplio entre sí, lo cual indica un modo de respuesta similar. Las dos probetas normalizadas muestran poca concordancia entre sí, y sólo parece haber una ligera concordancia entre las placas y la probeta EN14651.

A partir del análisis en conjunto y con base en los coeficientes de Kendall obtenidos, se observa que los cuatro ensayos no son comparables entre sí.

# 5

## EXTRAPOLACIÓN A OTRAS CALIDADES DE HORMIGÓN



## **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>





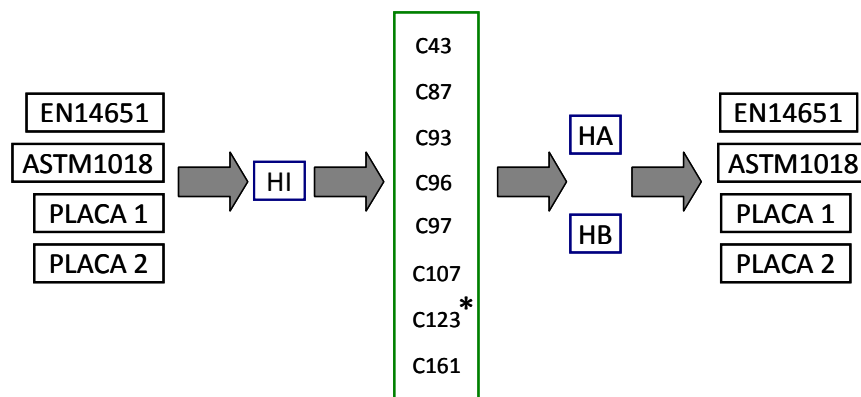
# CAPÍTULO 5.

## EXTRAPOLACIÓN A OTRAS CALIDADES DE HORMIGÓN

### 5.1. INTRODUCCIÓN.

En el capítulo 4 son seleccionadas las combinaciones numéricas más ajustadas para los elementos EN14651, ASTM1018, placa 1 y placa 2 bajo las condiciones del hormigón HI. En el presente capítulo se pretende determinar si las combinaciones elegidas presentan un buen ajuste bajo otras calidades de hormigón, en este caso bajo las condiciones de los hormigones HA y HB.

La Figura 5. 1, muestra la relación de las combinaciones elegidas con los hormigones estudiados y con los elementos simulados.



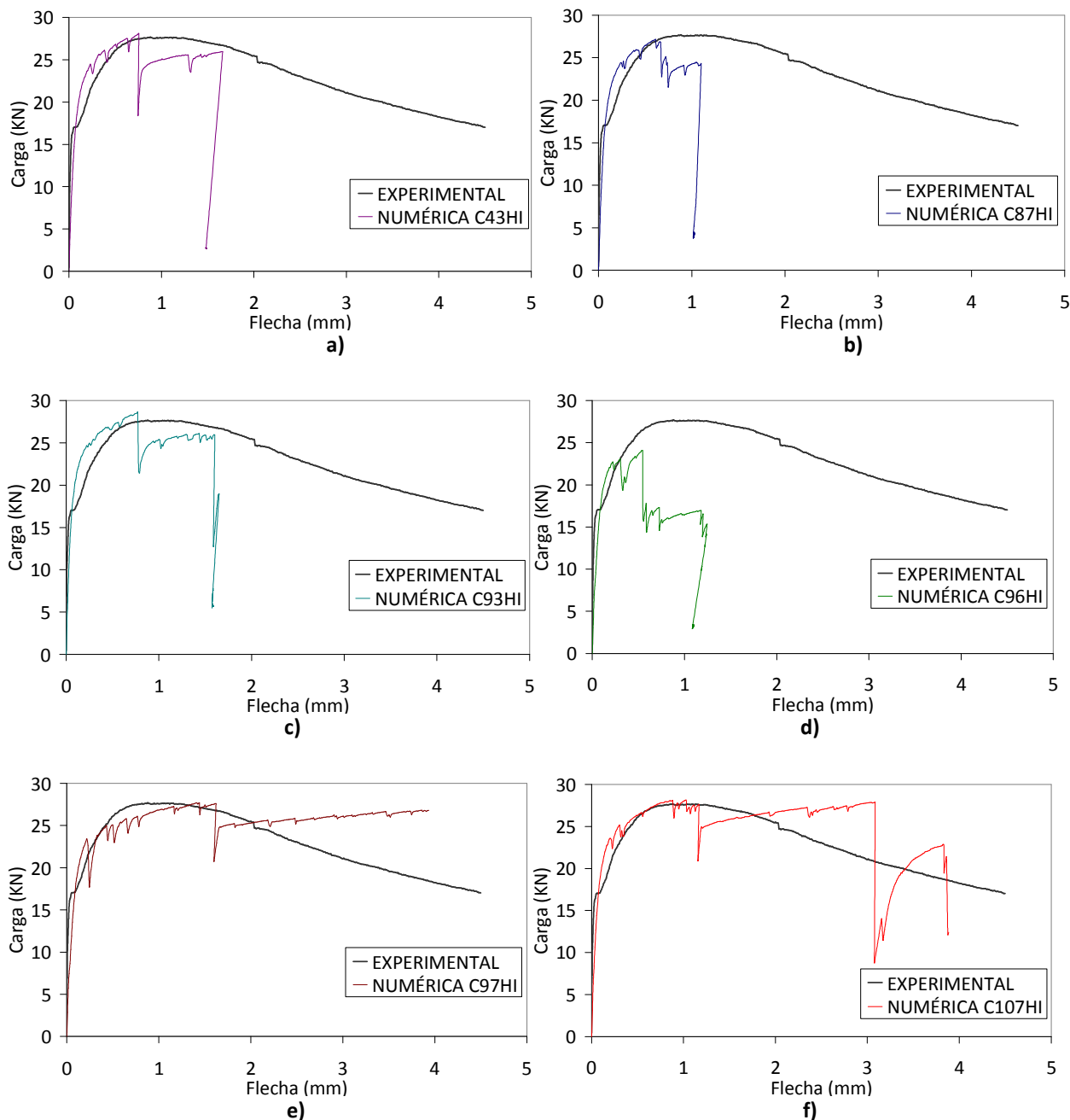
\* Combinación numérica utilizada sólo para las Placas 1 y 2.

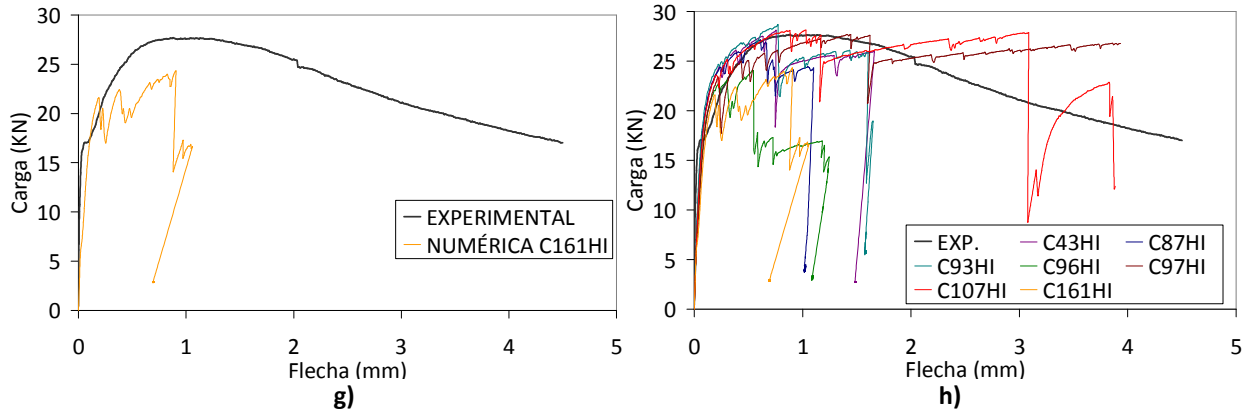
**Figura 5. 1.** Relación de las combinaciones numéricas elegidas y los hormigones HI, HA y HB.

Se procede a presentar las curvas carga-flecha para todos los elementos bajo las condiciones de los hormigones HI, HA y HB y compararlas con la curva experimental media correspondiente. Además, se comparan en profundidad las combinaciones más ajustadas para cada uno de los elementos; se comparan aspectos como las características principales de la curva, los valores de carga y energía, los mapas de fisuración, las tensiones principales, la flecha y la deformación principal.

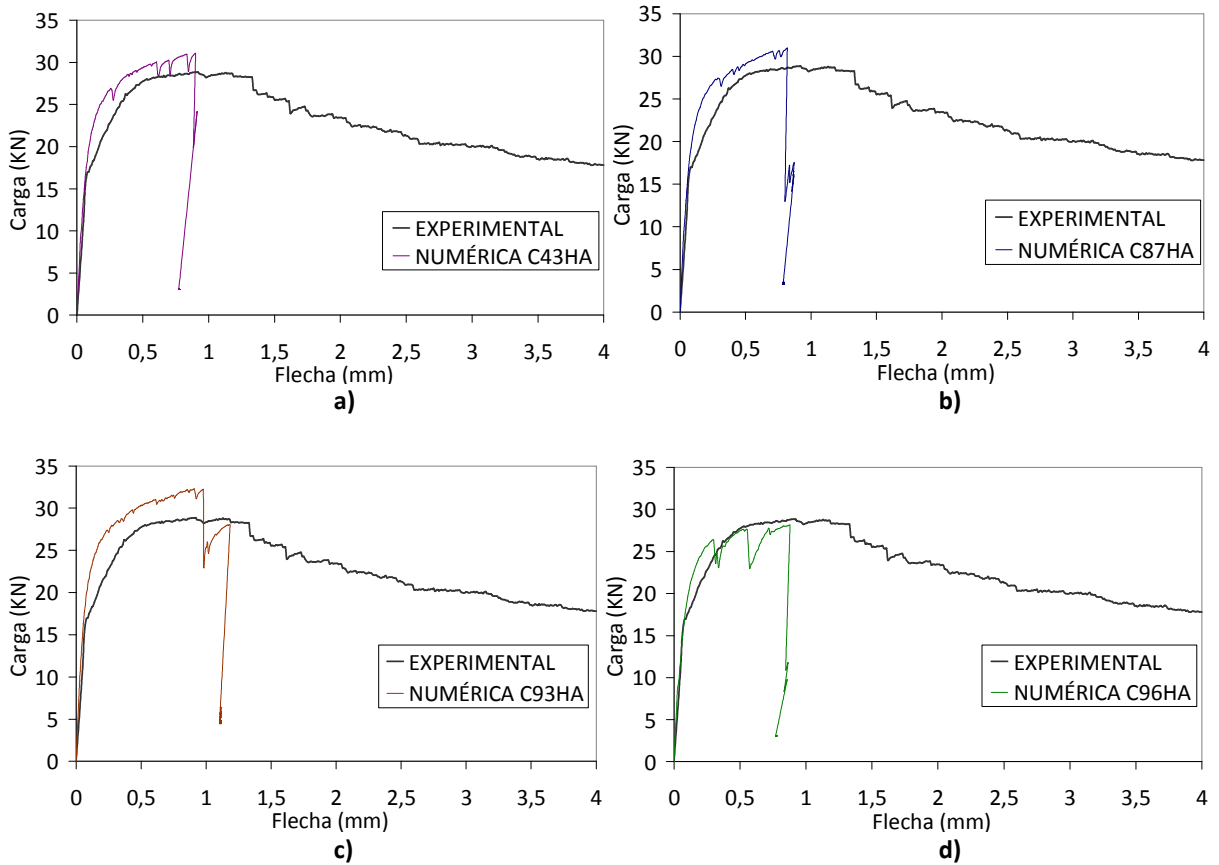
### 5.2. CURVAS CARGA-FLECHA EN14651.

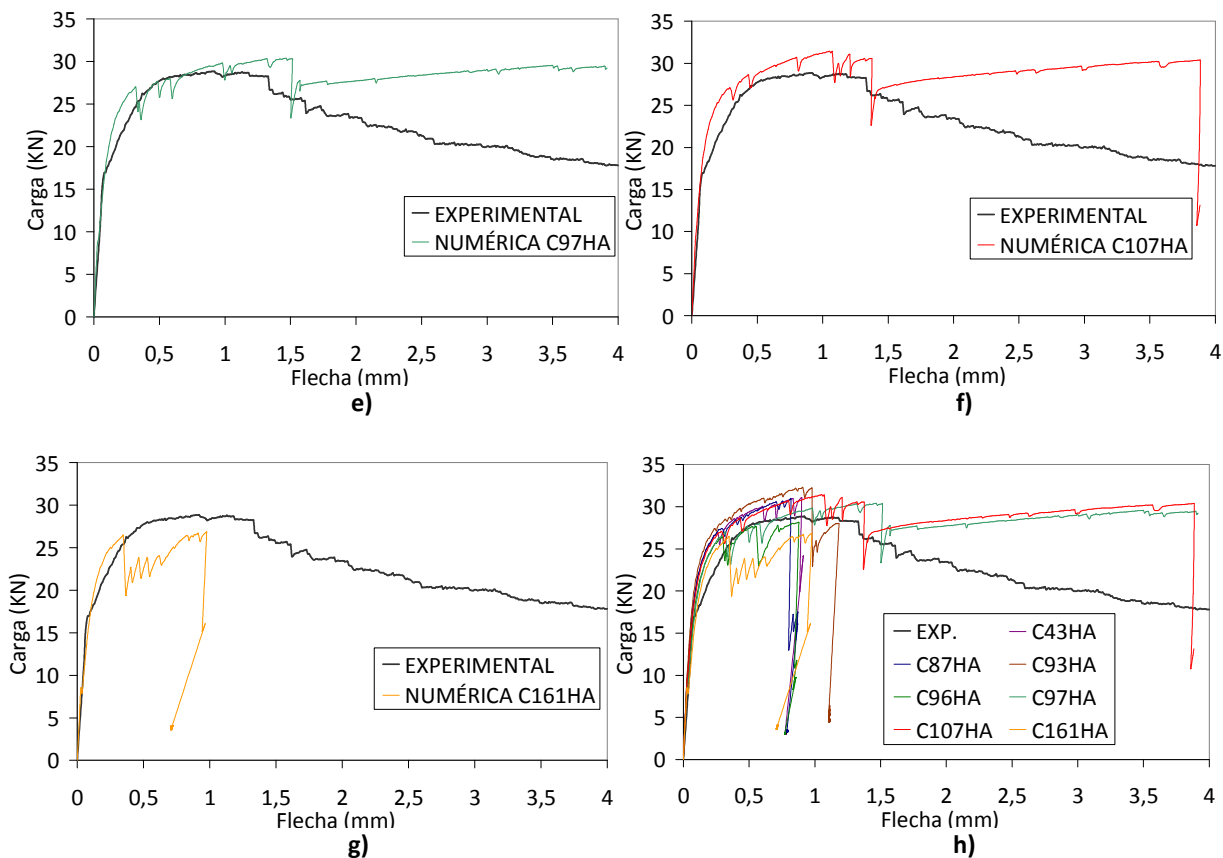
Las Figura 5. 2, 5. 3 y 5. 4 presentan los resultados de las combinaciones numéricas más ajustadas y su comparación con la curva experimental media para los hormigones HI, HA, y HB, para el elemento EN14651.



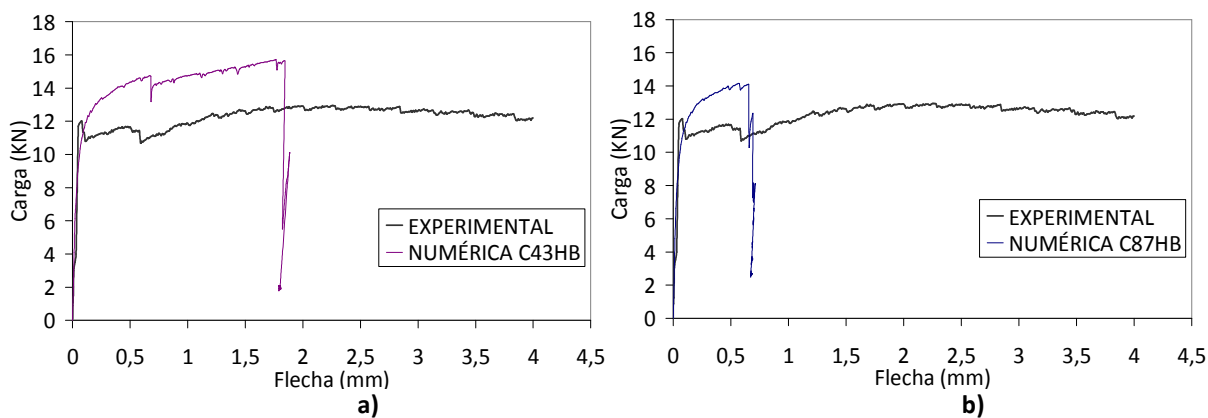


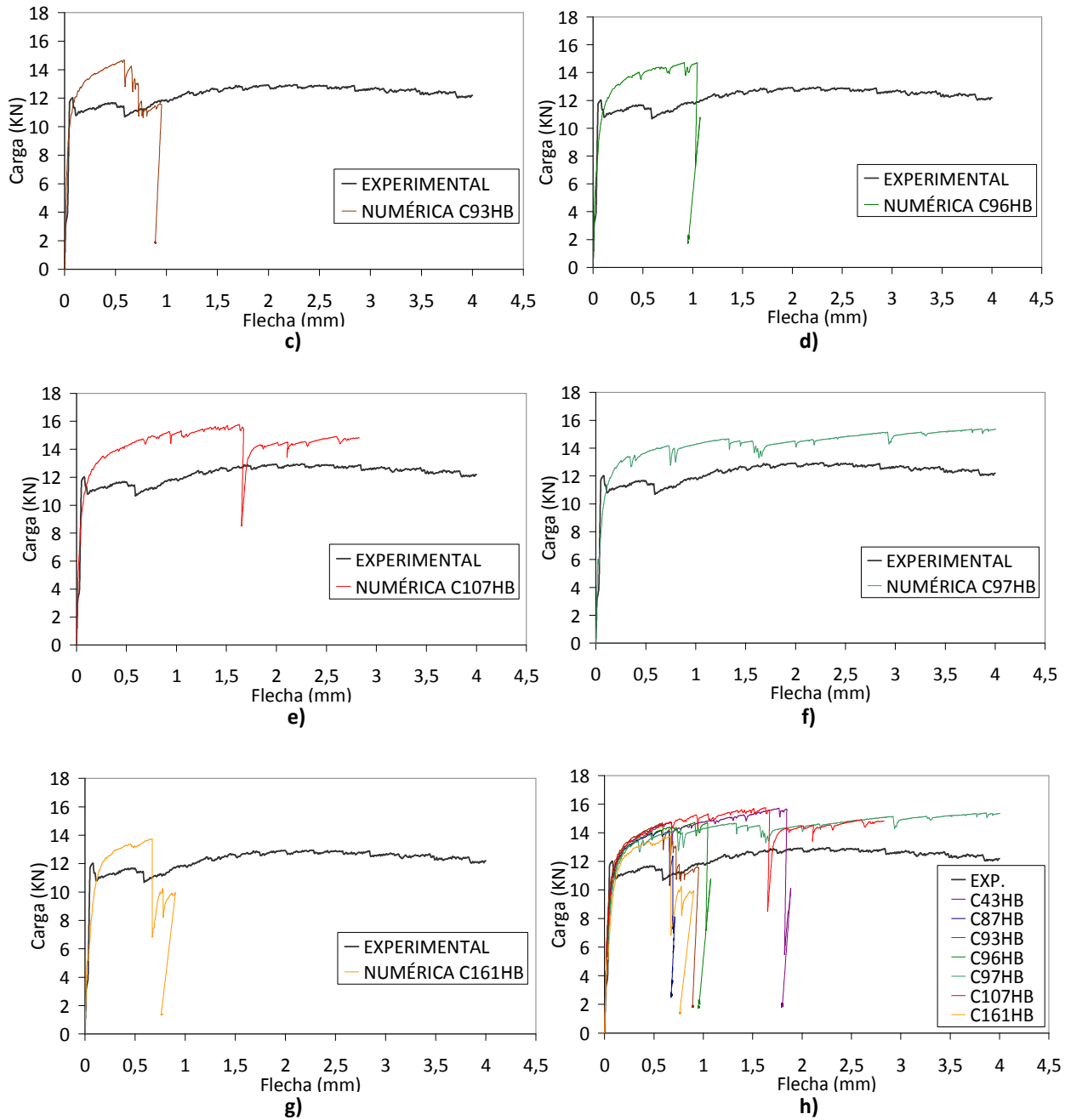
**Figura 5. 2.** Comparación curva carga-flecha experimental media EN14651 HI con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, y g) C161, EN14651 HI.





**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.





**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.

Para el elemento EN14651, cuando es simulado bajo las condiciones del hormigón HI, se observa que las curvas numéricas más ajustadas son las combinaciones 107 y 97. La curva correspondiente a la combinación 107 presenta un buen ajuste hasta alcanzar una flecha de 1,16mm; sin embargo, en la etapa de ablandamiento presenta caídas bruscas y posteriores recuperaciones. En cuanto a la curva correspondiente a la combinación 97 presenta un comportamiento inicial similar

al experimental pero una vez alcanzada la carga máxima no presenta ablandamiento. Cabe mencionar que las demás combinaciones elegidas no superan los 2mm de flecha.

Es así como a partir de las combinaciones 107 y 97, se observa que para este elemento son importantes en particular los parámetros  $f_s$ ,  $E_s$  y  $f_{cb}$ . Los parámetros  $f_s$  y  $E_s$  permiten un mejor ajuste a lo largo de las zonas de primera fisura y endurecimiento; mientras,  $f_{cb}$  permite obtener respuestas para flechas superiores a 2,5mm. Por tanto, para simular este elemento se recomiendan los siguientes valores:  $f_s=1515\text{MPa}$  y  $3000\text{MPa}$ ,  $E_s=1505000\text{MPa}$ , y  $f_{cb}=3,5f_c$  y  $4,5f_c$ .

Para las combinaciones 107 y 97 se comparan los resultados numéricos con los experimentales en cuanto a principales características, capacidad de disipación de energía, niveles de carga y mapas de fisuración. Además, se presentan los resultados numéricos de las tensiones principales, la flecha y la deformación principal correspondientes al último paso de carga bajo las condiciones del hormigón HA.

En las Tablas 5. 1 y 5. 2 se comparan las principales características de las curvas carga-flecha de las combinaciones 107 y 97, respectivamente. La columna Num/Exp indica la relación entre los resultados numéricos y experimentales; una relación igual a 1 indica que el modelo simula de forma exacta el comportamiento del elemento.

**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.

Principales Características	COMBINACIÓN C107								
	HI			HA			HB		
	Exp.	Num.	Num/Exp	Exp.	Num.	Num/Exp	Exp.	Num.	Num/Exp
Carga a primera fisura (KN)	16,89	15,78	0,93	17,04	16,95	0,99	12,01	10,91	0,91
Flecha a primera fisura (mm)	0,05	0,06	1,20	0,08	0,07	0,88	0,08	0,08	1,00
Carga máxima soportada por el elemento (KN)	27,68	28,12	1,02	28,84	31,44	1,09	12,94	15,75	1,22
Flecha a carga máxima (mm)	0,88	1,02	1,16	0,92	1,05	1,14	2,24	1,63	0,73

**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.

Principales Características	COMBINACIÓN C97								
	HI			HA			HB		
	Exp.	Num.	Num/Exp	Exp.	Num.	Num/Exp	Exp.	Num.	Num/Exp
Carga a primera fisura (KN)	16,89	16,07	0,95	17,04	16,99	1,00	12,01	10,69	0,89
Flecha a primera fisura (mm)	0,05	0,08	1,33	0,08	0,08	1,00	0,08	0,10	1,19
Carga máxima soportada por el elemento (KN)	27,68	27,68	1,00	28,84	30,4	1,05	12,94	15,38	1,19
Flecha a carga máxima (mm)	0,88	1,24	1,41	0,92	1,4	1,52	2,24	3,80	1,70

Se observa que para ambas combinaciones, el resultado más cercano al experimental es la carga a primera fisura con una diferencia que varía entre el 0 y 11%; mientras que, la flecha a carga máxima es el resultado que más difiere alcanzando hasta un 70% por encima del resultado experimental (hormigón HB para la combinación 97). La flecha a primera fisura y la carga máxima soportada por el elemento difieren hasta en un 33% y un 22% superior al experimental, respectivamente.

Bajo las condiciones del hormigón HI, la combinación 107 es la más cercana al comportamiento experimental. Una vez realizada la parametrización y aplicada a las condiciones de los hormigones HA y HB, se observa leves mejores en la carga y flecha a primera fisura, pero resultados más alejados al experimental en cuanto a carga y flecha máxima del elemento. Por su parte, la combinación 97 es la más cercana al comportamiento experimental del hormigón HA, puesto que la carga y flecha a primera fisura y carga máxima numéricas son bastante cercanas a los valores experimentales.

Las Tablas 5. 3 a 5. 6 resumen los valores de carga y energía.

**Tabla 5. 3.** Comparación de la capacidad de disipación de energía entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 107), EN14651.

Energía Acum (J)	COMBINACIÓN C107								
	HI			HA			HB		
Flecha (mm)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)
PF	0,67	0,58	0,87	0,64	0,69	1,07	0,33	0,36	1,09
0,50	10,51	11,04	1,05	10,79	11,75	1,09	5,61	6,18	1,10
1,00	24,14	24,54	1,02	25,03	26,82	1,07	11,29	13,6	1,20
1,50	37,86	37,72	1,00	38,91	41,47	1,07	17,44	21,23	1,22
2,50	63,07	64,13	1,02	62,18	69,79	1,12	30,21	35,72	1,18
3,50	84,26	87,07	1,03	82,11	99,38	1,21	42,84	-	-

G: Capacidad de disipación de energía (tenacidad)

**Tabla 5. 4.** Comparación de la capacidad de disipación de energía entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 97), EN14651.

Energía Acum (J)	COMBINACIÓN C97								
	HI			HA			HB		
Flecha (mm)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)
PF	0,67	0,59	0,88	0,64	0,53	0,82	0,33	0,32	0,97
0,50	10,51	10,18	0,97	10,79	11,14	1,03	5,61	5,91	1,05
1,00	24,14	23,18	0,96	25,03	25,61	1,02	11,29	12,89	1,14
1,50	37,86	36,62	0,97	38,91	40,48	1,04	17,44	20,09	1,15
2,50	63,07	62,21	0,99	62,18	68,2	1,10	30,21	34,57	1,14
3,50	84,26	88,21	1,05	82,11	97,27	1,18	42,84	49,51	1,16

G: Capacidad de disipación de energía (tenacidad)

Mediante las combinaciones 107 y 97 es posible alcanzar valores de energía muy cercanos al experimental a lo largo de toda la curva carga-flecha, bajo las condiciones del hormigón HI, con diferencias que no superan el 5%, a excepción de la energía a primera fisura. Una vez aplicadas éstas combinaciones para los hormigones HA y HB, se observa que aumenta la diferencia entre la energía numérica y la experimental, sobretudo para el hormigón HB, y son más notorias las diferencias a medida que aumenta el nivel de flecha.



**Tabla 5. 5.** Comparación de la carga a diferentes niveles de flecha entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 107), EN14651.

		COMBINACIÓN C107								
Carga (KN)	HI			HA			HB			
Flecha (mm)	Exp	Num	Num/Exp	Exp	Num	Num/Exp	Exp	Num	Num/Exp	
PF	16,89	15,78	0,93	17,04	16,95	0,99	12,01	10,81	0,90	
0,50	26,02	26,36	1,01	28,02	28,72	1,02	11,65	14,22	1,22	
1,00	27,57	28,01	1,02	28,59	31,22	1,09	11,96	15,16	1,27	
1,50	26,99	25,87	0,96	25,58	27,2	1,06	12,59	15,62	1,24	
2,50	23,05	27,01	1,17	21,36	28,97	1,36	12,90	14,76	1,14	
3,50	19,66	21,09	1,07	18,60	30,14	1,62	12,33	-	-	

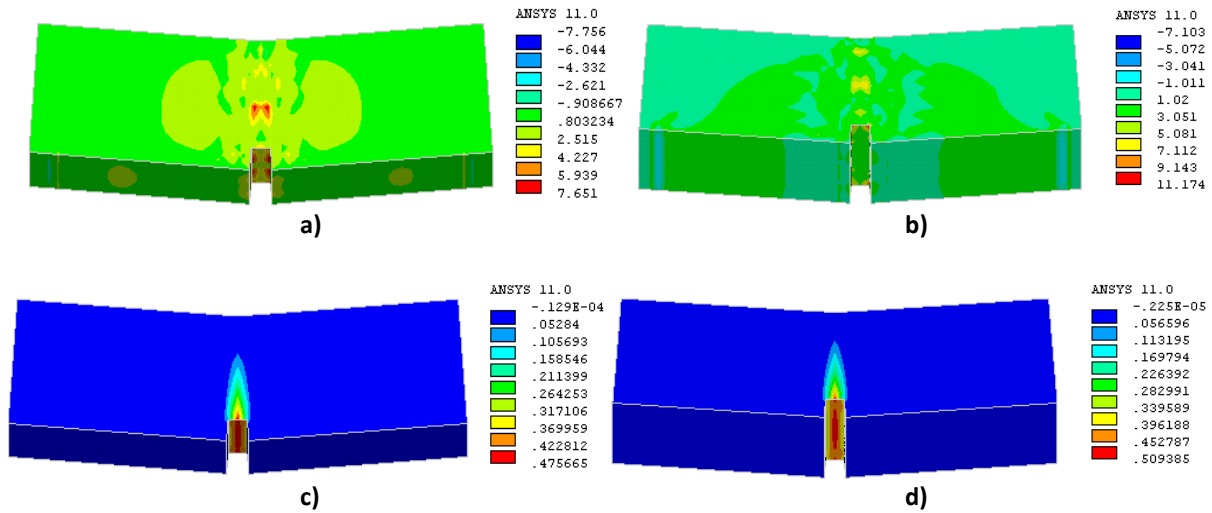
**Tabla 5. 6.** Comparación de la carga a diferentes niveles de flecha entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 97), EN14651.

		COMBINACIÓN C97								
Carga (KN)	HI			HA			HB			
Flecha (mm)	Exp	Num	Num/Exp	Exp	Num	Num/Exp	Exp	Num	Num/Exp	
PF	16,89	16,07	0,95	17,04	16,99	1,00	12,01	10,86	0,90	
0,50	26,02	25,05	0,96	28,02	25,81	0,92	11,65	13,67	1,17	
1,00	27,57	26,85	0,97	28,59	28,67	1,00	11,96	14,28	1,19	
1,50	26,99	27,45	1,02	25,58	23,46	0,92	12,59	14,42	1,15	
2,50	23,05	25,55	1,11	21,36	28,38	1,33	12,90	14,82	1,15	
3,50	19,66	26,27	1,34	18,60	29,24	1,57	12,33	15,16	1,23	

Los valores de carga numéricos obtenidos con las combinaciones 107 y 97 se ajustan bastante al experimental hasta niveles de flecha de 1,5mm, bajo las condiciones de los hormigones HI y HA. Mientras que, para niveles de flecha superiores se alcanzan mayores diferencias. Bajo las condiciones del hormigón HB, se obtiene un ajuste medio a lo largo de toda la curva carga-flecha.

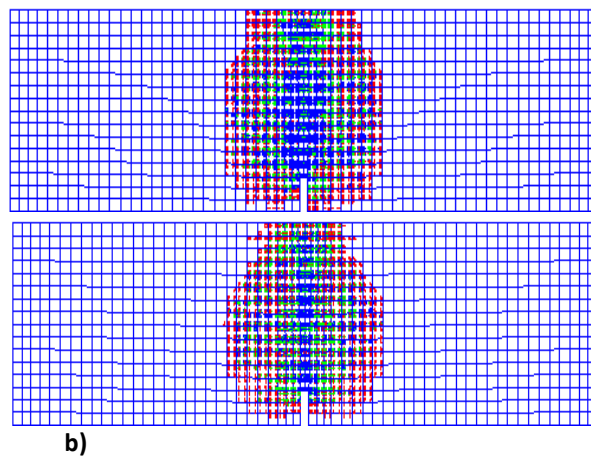
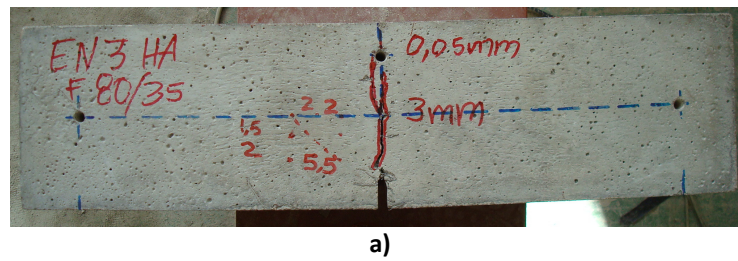
En general, los valores de energía y carga han permitido observar un mayor desajuste para el hormigón HB; este desajuste se debe a la variación existente entre sus probetas experimentales.

Además de obtener la curva carga-flecha con el programa ANSYS® V.11, es posible obtener resultados gráficos de tensiones y deformaciones principales (Figura 5. 5), mapas de fisuración (Figura 5. 6), diagrama de flecha y, posición inicial y final (Figura 5. 7); correspondientes al último *sub-step* de carga.



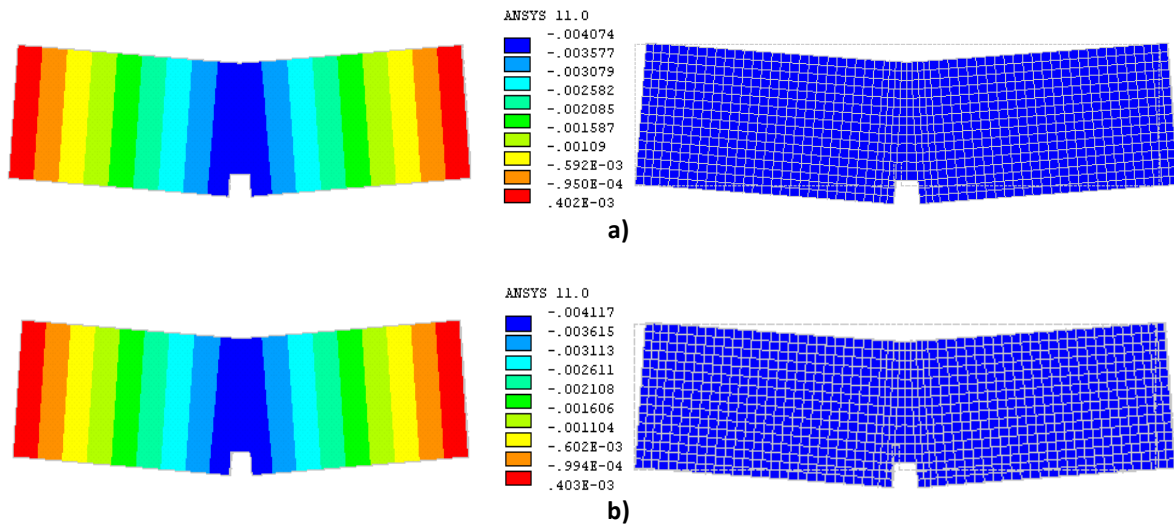
**Figura 5. 5.** Diagrama de: a) tensiones principales de la combinación 107, b) tensiones principales de la combinación 97, c) deformación principal de la combinación 107 y d) deformación principal de la combinación 97, EN14651 HA. (Valores numéricos en MPa).

Nótese que la concentración de tensiones y deformaciones se produce en la zona central del elemento, tal como se esperaba. Además, las zonas adyacentes a la entalla también asumen tensiones en el último *sub step* de carga (Figura 5. 5).



**Figura 5. 6.** a) Fisuración de la probeta, y mapa de fisuración numérico b) combinación 107, y c) combinación 97, EN14651 HA.

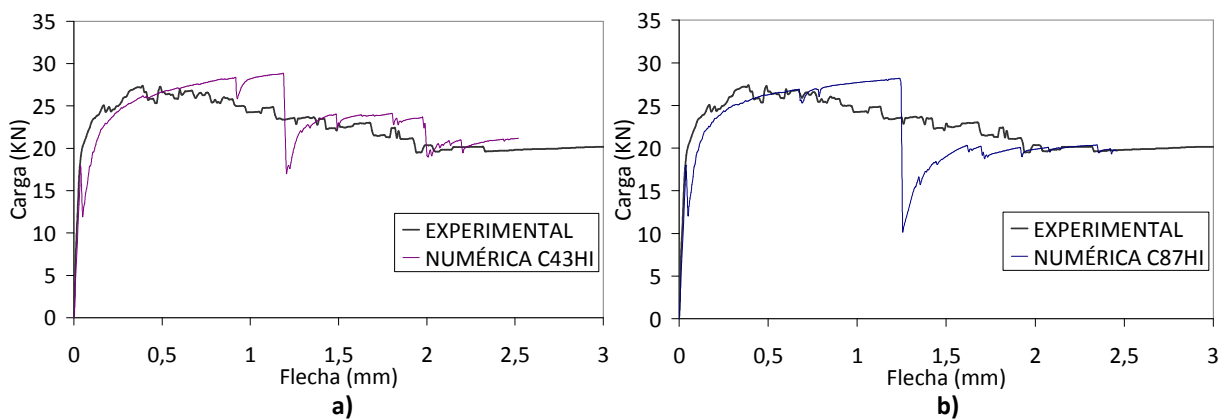
En los mapas de fisuración se observa gran coincidencia entre la fisuración de la probeta y el mapa de fisuración numérico (Figura 5. 6). El mayor desplazamiento se presenta en la zona central del elemento y corresponde a 4,074mm y 4,117mm para las combinaciones 107 y 97, respectivamente (Figura 5. 7).

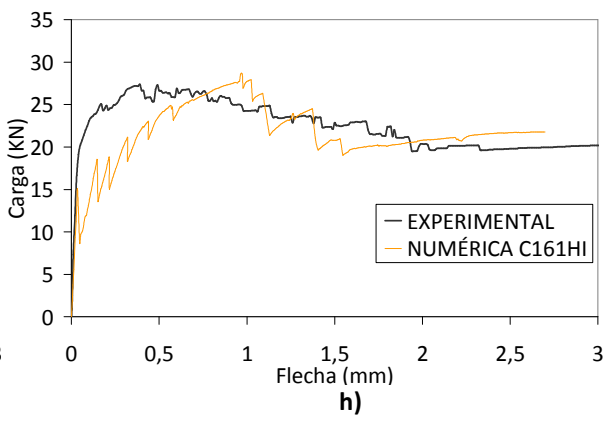
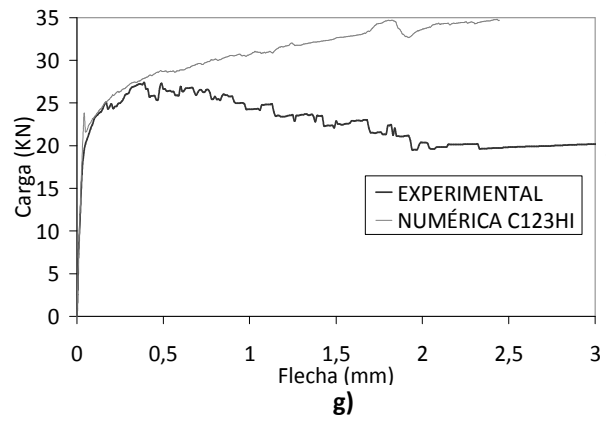
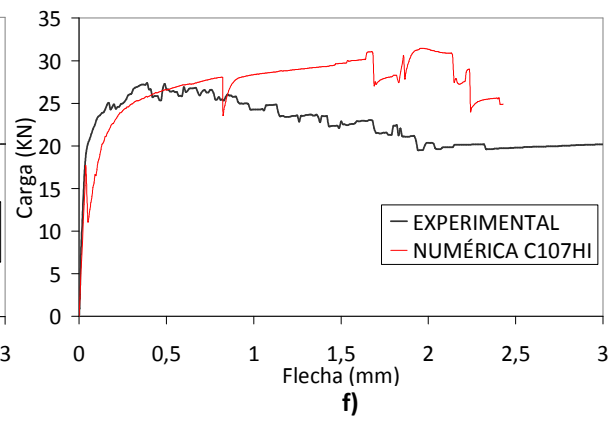
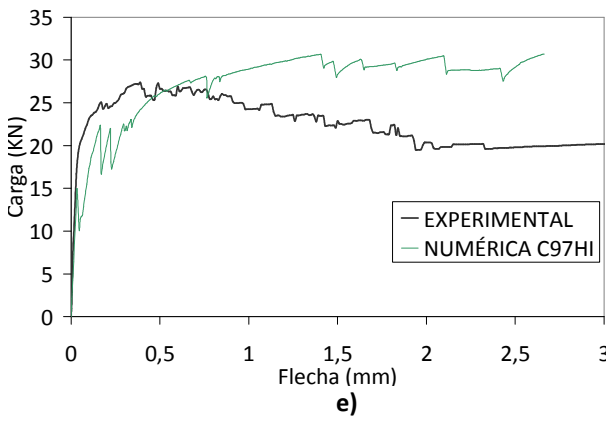
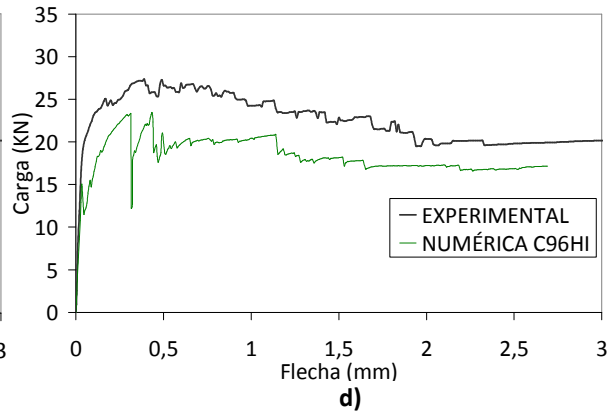
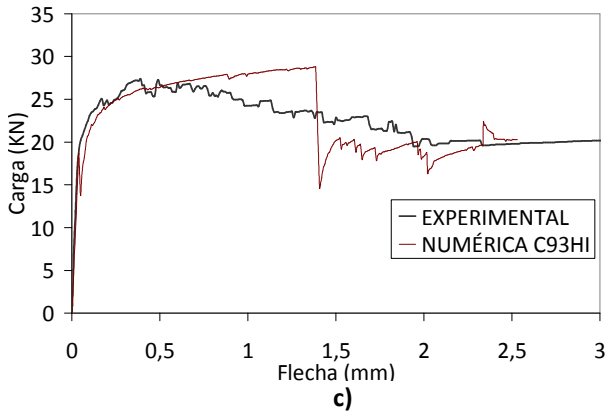


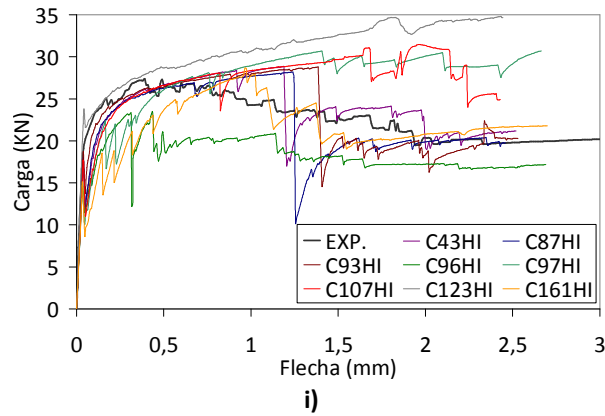
**Figura 5. 7.** Diagrama de flecha y diagrama de posición inicial y final de la combinación a) 107 y b) 97, EN14651 HA. (Valores numéricos en metros).

### 5.3. CURVAS CARGA-FLECHA ASTM1018.

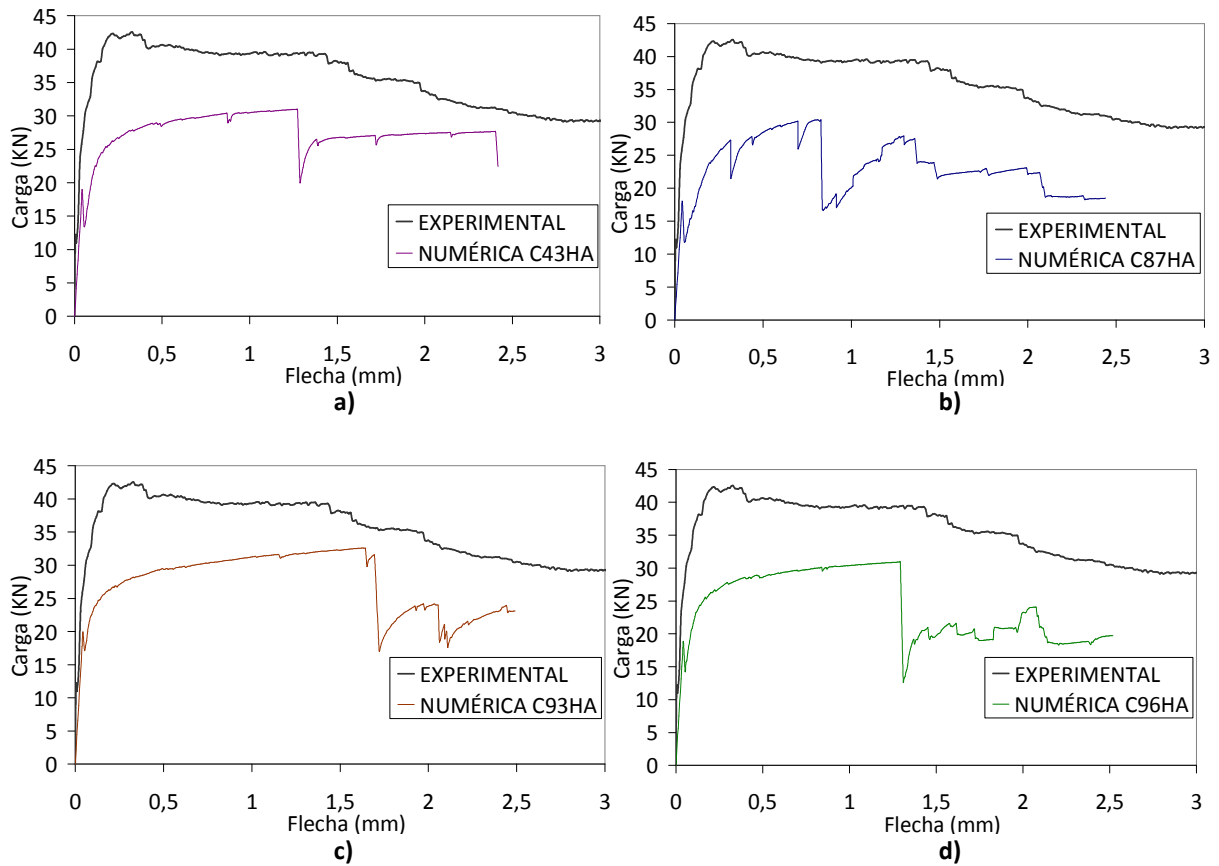
Las Figura 5. 8, 5. 9 y 5. 10 muestran las curvas carga-flecha de las combinaciones numéricas más ajustadas para los hormigones HI, HA, y HB para el elemento ASTM1018.

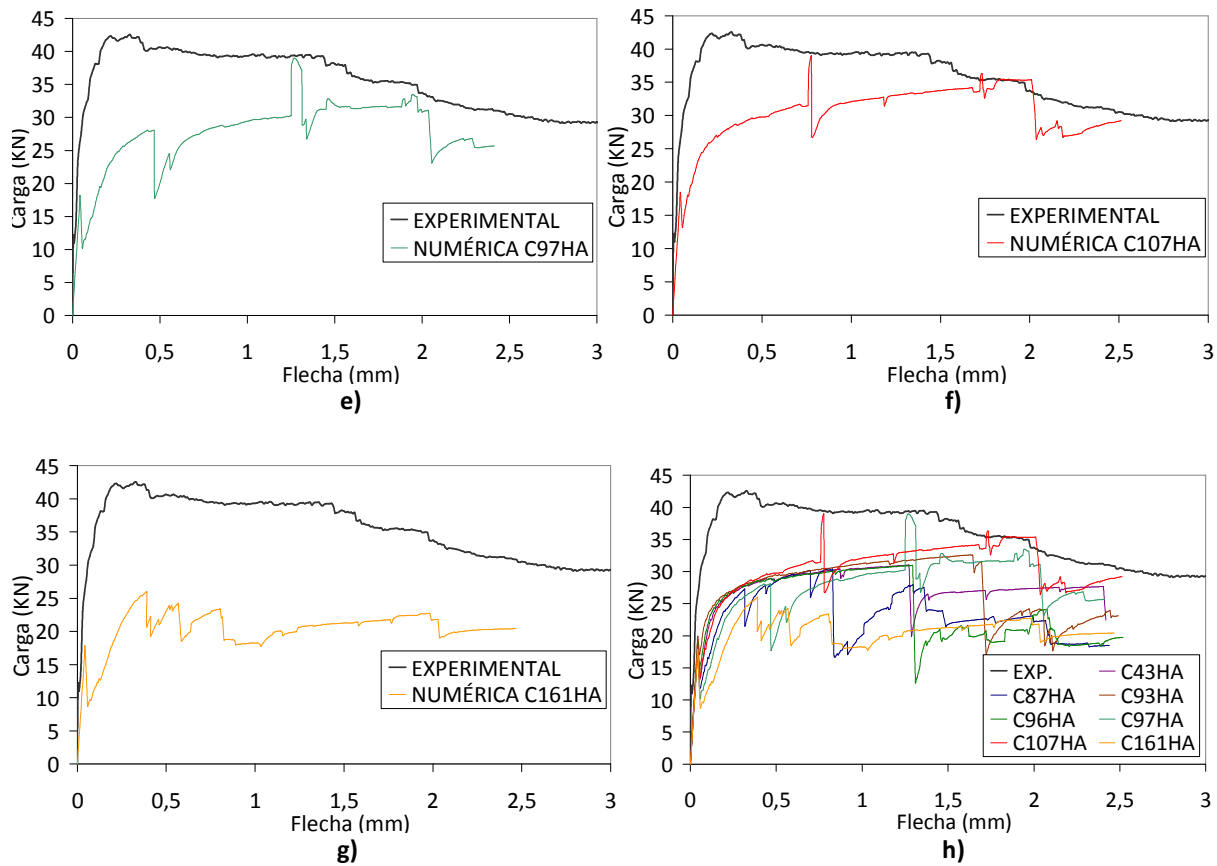




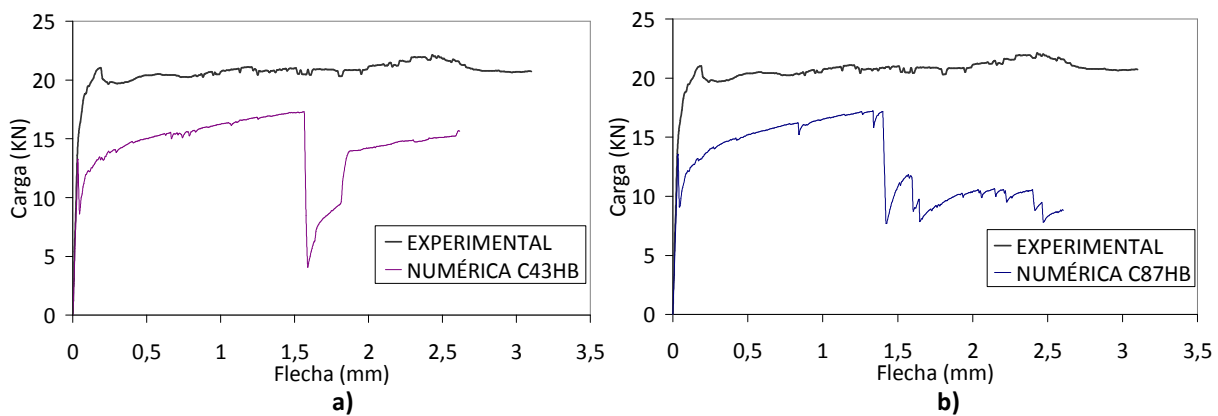


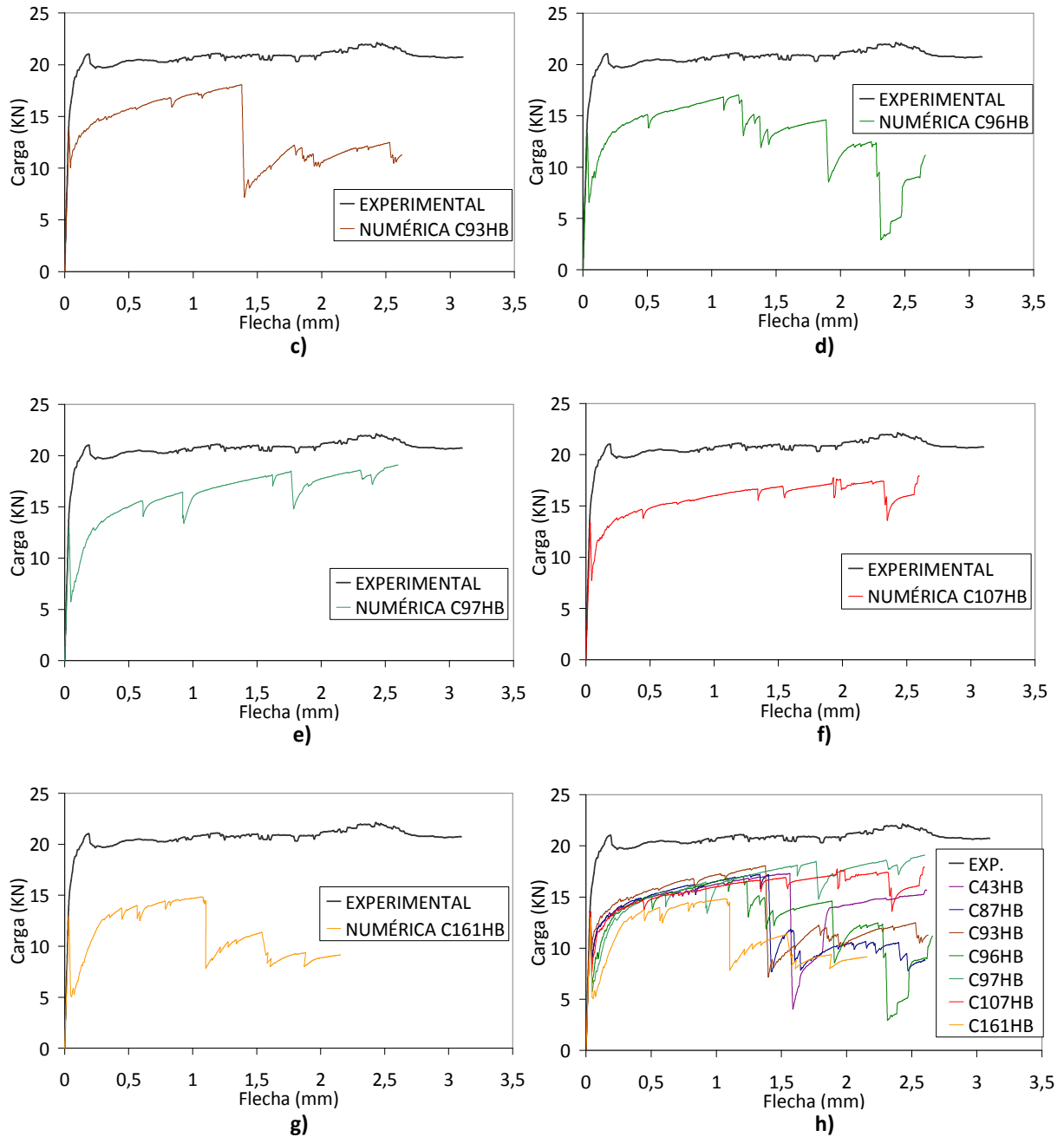
**Figura 5. 8.** Comparación curva carga-flecha experimental media ASTM1018 HI con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, g) C123, y h) C161, ASTM1018 HI.





**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.





**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.

Para el elemento ASTM1018, cuando es simulado bajo las condiciones del hormigón HI, se observa que las curvas numéricas más ajustadas son las combinaciones 43 y 93. Sin embargo, se observa que alcanzan la carga a primera fisura para niveles de flecha inferiores y posterior a ella viene un descenso seguido por el endurecimiento. Además, la carga máxima se alcanza para niveles de flecha superiores a los experimentales. Lo anterior se debe a que el inicio de la etapa de ablandamiento

de la curva experimental es anterior a la etapa de ablandamiento de las curvas numéricas. En las curvas numéricas 43 y 93 se observa que la etapa de ablandamiento va precedida por un descenso brusco de carga.

Basados en el análisis de las mejores combinaciones, se observa que para valores bajos de  $f_s$  y valores altos de  $E_s$  es posible alcanzar valores de carga a primera fisura más altos y reducir el descenso brusco posterior a la primera fisura. Para controlar el ablandamiento del material es necesario modificar los parámetros que influyen en la superficie de rotura, es decir,  $f_{cb}$ ,  $f_1$  y  $f_2$ . Cuando  $f_2$  es mayor que  $f_1$  se inicia el ablandamiento con un descenso brusco en la capacidad de carga, por lo cual los valores de  $f_1$  y  $f_2$  deben ser los más cercanos posible.

Para las combinaciones 43 y 93 se comparan los resultados numéricos con los experimentales en cuanto a principales características, capacidad de disipación de energía, niveles de carga y mapas de fisuración. Además, se presentan los resultados numéricos de las tensiones principales, la flecha y la deformación principal.

En las Tablas 5. 7 y 5. 8 se comparan las principales características de las curvas carga-flecha de las combinaciones 43 y 93, respectivamente. La columna Num/Exp indica la relación entre los resultados numéricos y experimentales; una relación igual a 1 indica que el modelo simula de forma exacta el comportamiento del elemento.

**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.

Principales Características	COMBINACIÓN C43								
	HI			HA			HB		
	Exp.	Num.	Num/Exp	Exp.	Num.	Num/Exp	Exp.	Num.	Num/Exp
Carga a primera fisura (KN)	24,94	17,81	0,71	25,46	18,90	0,74	18,20	13,20	0,73
Flecha a primera fisura (mm)	0,17	0,04	0,24	0,04	0,04	1,00	0,07	0,04	0,57
Carga máxima soportada por el elemento (KN)	27,38	28,85	1,05	42,54	31,00	0,73	22,12	17,30	0,78
Flecha a carga máxima (mm)	0,39	1,18	3,03	0,33	1,27	3,85	2,43	1,56	0,64



**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.

Principales Características	COMBINACIÓN C93								
	HI			HA			HB		
	Exp.	Num.	Num/Exp	Exp.	Num.	Num/Exp	Exp.	Num.	Num/Exp
Carga a primera fisura (KN)	24,94	18,66	0,75	25,46	19,95	0,78	18,20	13,59	0,75
Flecha a primera fisura (mm)	0,17	0,04	0,24	0,04	0,04	1,00	0,07	0,04	0,57
Carga máxima soportada por el elemento (KN)	27,38	28,78	1,05	42,54	32,61	0,77	22,12	18,05	0,82
Flecha a carga máxima (mm)	0,39	1,38	3,54	0,33	1,62	4,91	2,43	1,37	0,56

Bajo las condiciones del hormigón HI, ambas combinaciones 43 y 93, presentan valores de carga a primera fisura inferiores a la experimental con diferencias de hasta un 29%, además, alcanzan la carga a primera fisura para niveles de flecha muy inferiores con diferencias de hasta un 76%. En ambos casos, el valor de carga máxima es bastante cercano al experimental, pero se alcanza para niveles de flecha muy superiores a los experimentales.

Una vez realizada la parametrización y aplicada a las condiciones de los hormigones HA y HB, se observan mejoras en la flecha a carga máxima pero aumento en la diferencia del valor de carga máxima. El hormigón HB presenta diferencias mucho menores en la flecha a carga máxima porque la carga máxima experimental se presenta a niveles de flecha superiores. En términos generales, para los tres hormigones no se evidencian diferencias muy marcadas entre las combinaciones 43 y 93.

Las Tablas 5. 9 a 5. 12 resumen los valores de carga y energía.

**Tabla 5. 9.** Comparación de la capacidad de disipación de energía entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 43), ASTM1018.

		COMBINACIÓN C43								
Energía Acum (J)		HI			HA			HB		
Flecha (mm)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)	
PF	0,92	0,34	0,37	0,56	0,4	0,71	0,65	0,22	0,34	
0,50	11,97	11,13	0,93	18,89	12,11	0,64	9,43	6,55	0,69	
1,00	24,93	24,96	1,00	38,71	27,18	0,70	19,66	14,4	0,73	
1,50	36,73	37,26	1,01	58,29	41,18	0,71	30,09	22,77	0,76	
2,00	47,60	48,97	1,03	76,19	54,82	0,72	40,30	28,42	0,71	
2,50	57,56	59,36	1,03	92,08	-	-	51,28	35,75	0,70	

G: Capacidad de disipación de energía (tenacidad)

**Tabla 5. 10.** Comparación de la capacidad de disipación de energía entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 93), ASTM1018.

		COMBINACIÓN C93								
Energía Acum (J)		HI			HA			HB		
Flecha (mm)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)	
PF	0,92	0,36	0,39	0,56	0,43	0,77	0,65	0,22	0,34	
0,50	11,97	11,59	0,97	18,89	12,55	0,66	9,43	6,92	0,73	
1,00	24,93	25,27	1,01	38,71	27,75	0,72	19,66	15,11	0,77	
1,50	36,73	38,30	1,04	58,29	43,55	0,75	30,09	22,85	0,76	
2,00	47,60	47,97	1,01	76,19	56,61	0,74	40,30	28,26	0,70	
2,50	57,56	57,64	1,00	92,08	-	-	51,28	34,12	0,67	

G: Capacidad de disipación de energía (tenacidad)

Mediante las combinaciones 43 y 93 es posible alcanzar valores de energía (Tablas 5. 9 y 5. 10) muy cercanos al experimental a lo largo de toda la curva carga-flecha, bajo las condiciones del hormigón HI, con diferencias que no superan el 5%, a excepción de la energía a primera fisura. Sin embargo, una vez aplicadas estas combinaciones para los hormigones HA y HB, se observa que aumenta la diferencia entre la energía numérica y la experimental a lo largo de toda la curva, hasta alcanzar diferencias inferiores de hasta un 56%.

**Tabla 5. 11.** Comparación de la carga a diferentes niveles de flecha entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 43), ASTM1018.

Carga (KN)	COMBINACIÓN C43								
	HI			HA			HB		
	Exp	Num	Num/Exp	Exp	Num	Num/Exp	Exp	Num	Num/Exp
PF	24,94	17,81	0,71	25,46	18,9	0,74	18,20	13,2	0,73
0,50	26,71	26,67	1,00	37,29	28,59	0,77	18,88	15,03	0,80
1,00	27,02	28,23	1,04	37,24	30,5	0,82	18,44	16,28	0,88
1,50	26,29	28,88	1,10	36,64	26,74	0,73	18,57	17,21	0,93
2,00	23,02	19,18	0,83	32,51	27,33	0,84	18,68	14,22	0,76
2,50	19,82	21,15	1,07	30,08	-	-	19,18	15,11	0,79

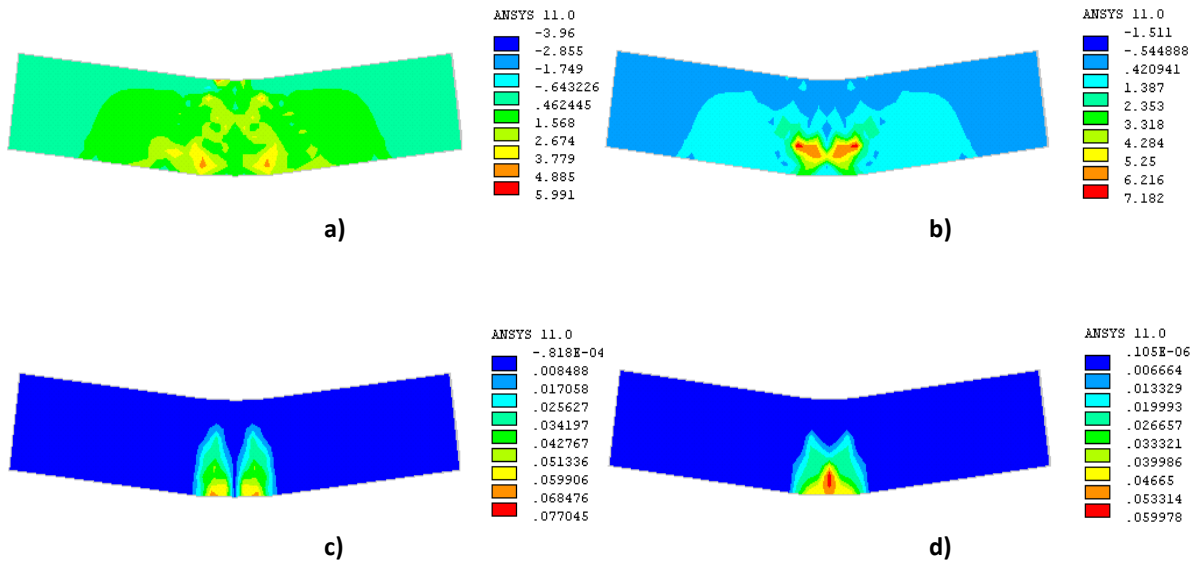
**Tabla 5. 12.** Comparación de la carga a diferentes niveles de flecha entre los hormigones experimentales y los numéricos (C 93), ASTM1018.

Carga (KN)	COMBINACIÓN C93								
	HI			HA			HB		
	Exp	Num	Num/Exp	Exp	Num	Num/Exp	Exp	Num	Num/Exp
PF	24,94	18,66	0,75	25,46	19,95	0,78	18,20	13,59	0,75
0,50	26,71	26,45	0,99	37,29	29,39	0,79	18,88	15,75	0,83
1,00	27,02	27,97	1,04	37,24	31,26	0,84	18,44	17,17	0,93
1,50	26,29	20,23	0,77	36,64	32,24	0,88	18,57	9,19	0,49
2,00	23,02	18,44	0,80	32,51	23,81	0,73	18,68	10,56	0,57
2,50	19,82	20,3	1,02	30,08	-	-	19,18	12,40	0,65

En cuanto a la carga (Tablas 5. 11 y 5. 12) la combinación 43 se ajusta mucho más a la curva experimental que la 93, bajo las condiciones del hormigón HI. Bajo las condiciones del hormigón HA, ambas combinaciones presentan resultados similares; a diferencia del hormigón HB, donde la combinación 43 presenta levemente mejores resultados.

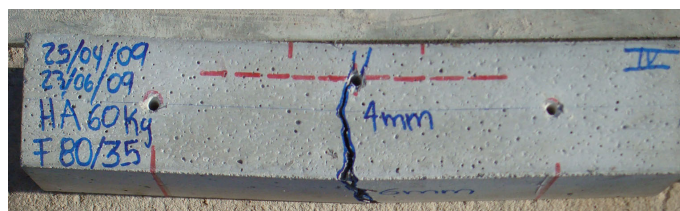
En general, los valores de energía y carga han permitido observar un desajuste para los hormigones HA y HB; este desajuste se debe a la variación existente entre sus probetas experimentales.

Además de obtener la curva carga-flecha con el programa ANSYS® V.11, es posible obtener resultados gráficos de tensiones y deformaciones principales (Figura 5. 11), mapas de fisuración (Figura 5. 12), diagrama de flecha y, posición inicial y final (Figura 5. 13), correspondientes al último *sub-step* de carga.

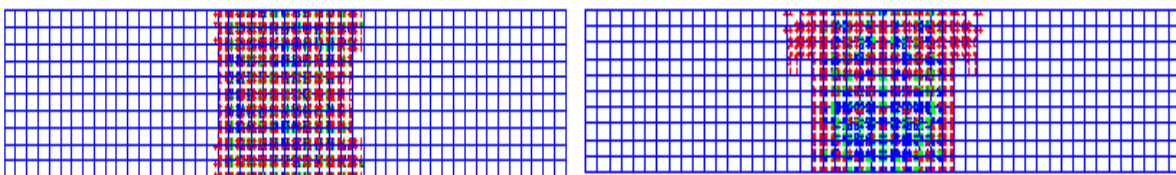


**Figura 5. 11.** Diagrama de: a) tensiones principales de la combinación 43, b) tensiones principales de la combinación 93, c) deformación principal de la combinación 43 y d) deformación principal de la combinación 93, ASTM1018 HB.

Para este elemento, las mayores tensiones y deformaciones se presentan en el tercio central del elemento, tal como se esperaba. En el último *sub step* de carga se observan zonas más allá del tercio central que inician procesos de tracción (Figura 5. 11). Los mapas de fisuración evidencian gran coincidencia entre la fisuración de la probeta y el mapa de fisuración numérico (Figura 5. 12).



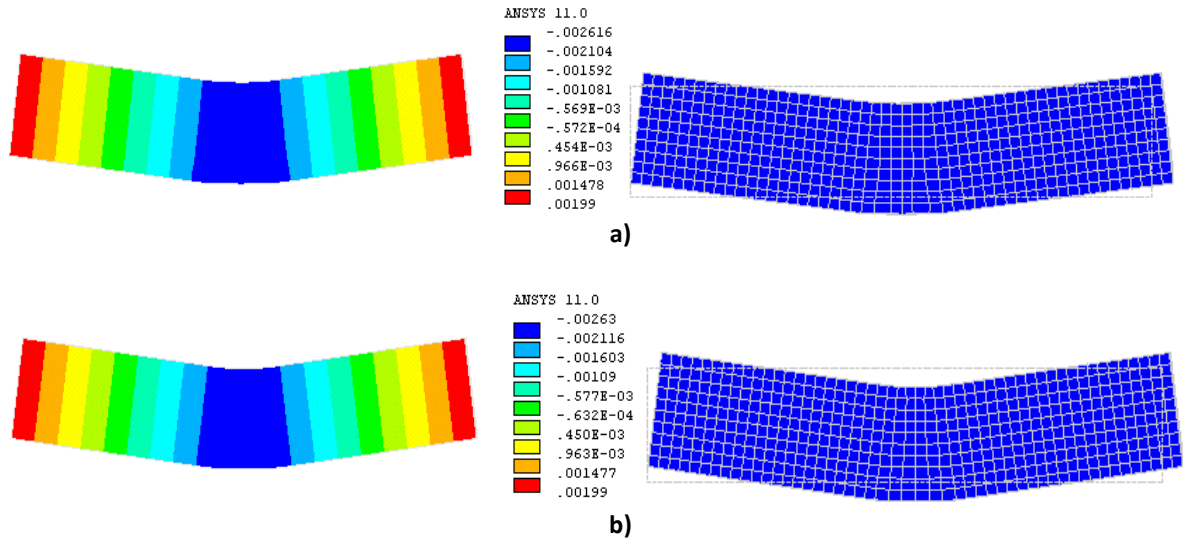
a)



b)

c)

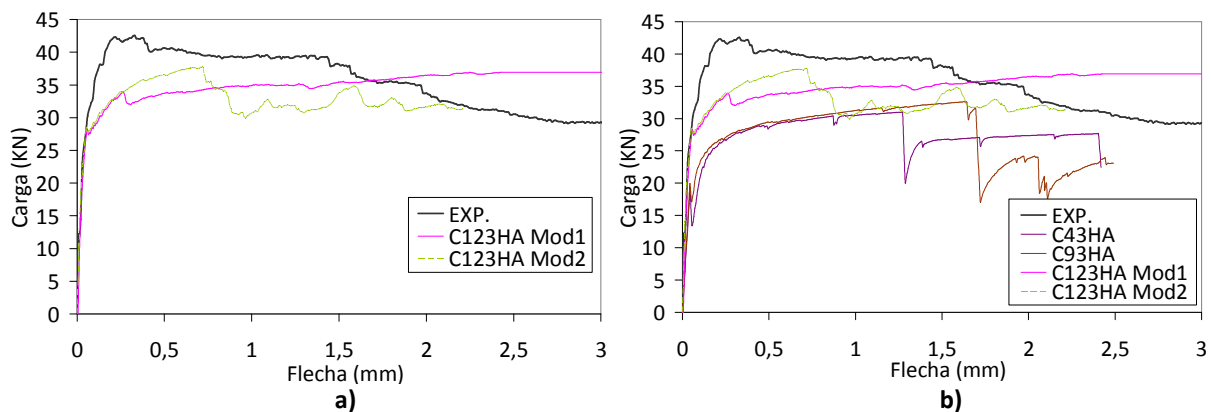
**Figura 5. 12.** a) Fisuración de la probeta, y mapa de fisuración numérico b) combinación 43, y c) combinación 93, ASTM1018 HB.



**Figura 5. 13.** Diagrama de flecha y diagrama de posición inicial y final de la combinación a) 43 y b) 93, ASTM1018 HB.

Teniendo en cuenta que las combinaciones 43 y 93, elegidas como las más ajustadas para el elemento ASTM1018, no arrojan resultados del todo satisfactorios bajo las condiciones de los hormigones HA y HB; se decide escoger otra combinación y mostrar cómo es posible modificar los parámetros hasta alcanzar un mejor ajuste.

Es así como, mediante la verificación gráfica se observó que la combinación 123 muestra una curva similar aunque es necesario modificar los parámetros  $E_s$  y  $f_{cb}$ . Para este elemento,  $E_s$  interviene en la energía en todos los niveles de flecha, y  $f_{cb}$  modifica el endurecimiento de la curva. A continuación, se presenta a manera de ejemplo cómo es posible modificar algunos parámetros y obtener curvas numéricas más ajustadas a la experimental (Figura 5. 14).



**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  $E_s$  y  $f_{cb}$ , y b) mejores combinaciones C43, C93 y C123 con modificación.

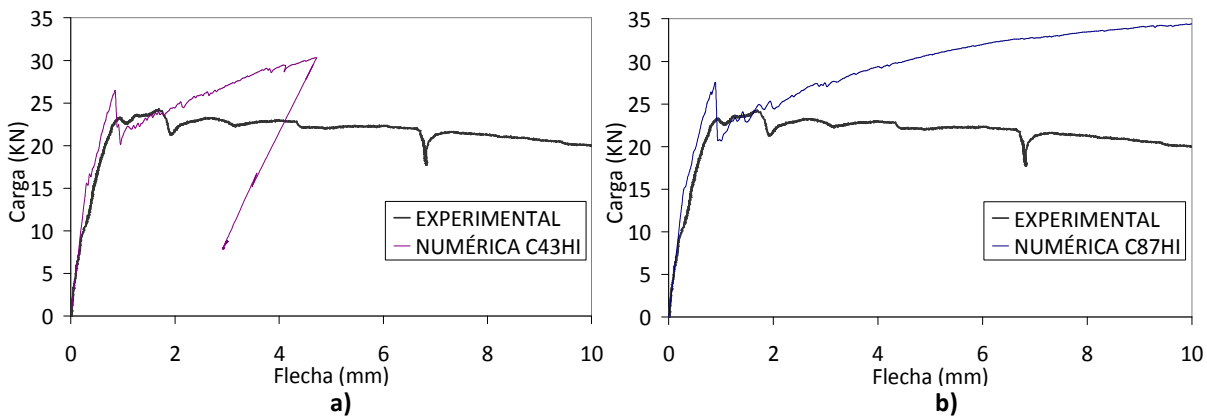
Se realizan dos modificaciones para la combinación 123, aumentando los valores de  $f_{cb}$  y  $E_s$ . De esta manera, en ambas modificaciones se adopta el mismo valor de  $f_{cb}$  y  $E_s$ , y se diferencian en los valores de  $f_1$  y  $f_2$  (Tabla 5. 13). Tal como se observa en la Figura 5. 14, al aumentar  $E_s$  y  $f_{cb}$  es posible aumentar la capacidad de disipación de energía y controlar el endurecimiento del material. Además, se evidencia que cuando  $f_1$  es mayor que  $f_2$  se presenta ablandamiento pero no de forma controlada.

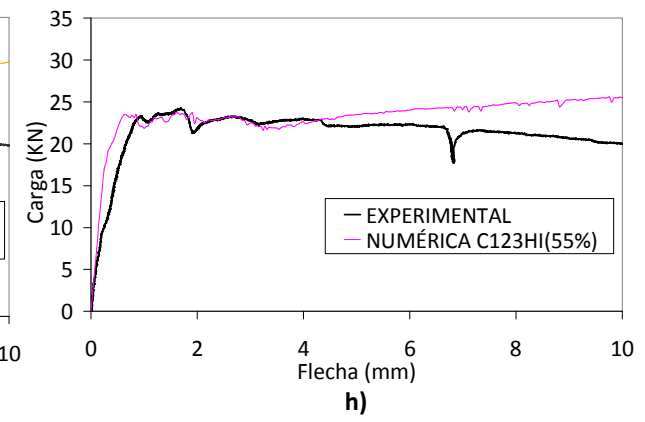
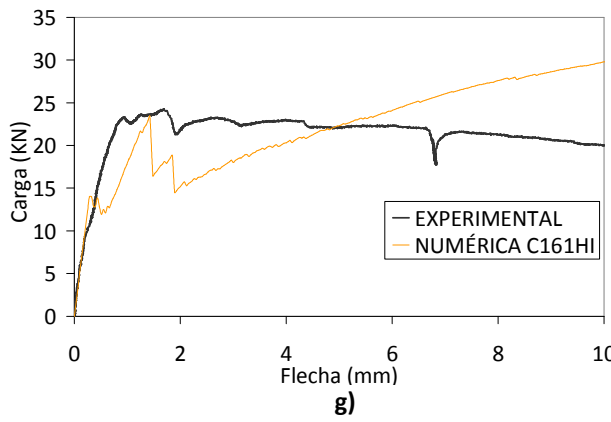
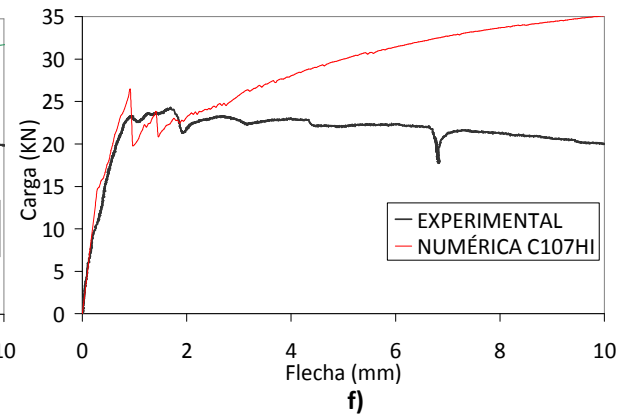
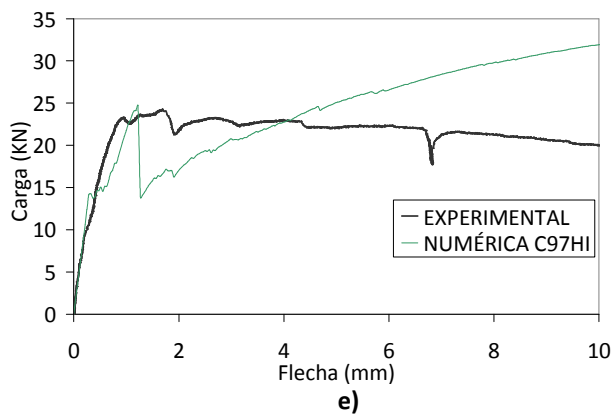
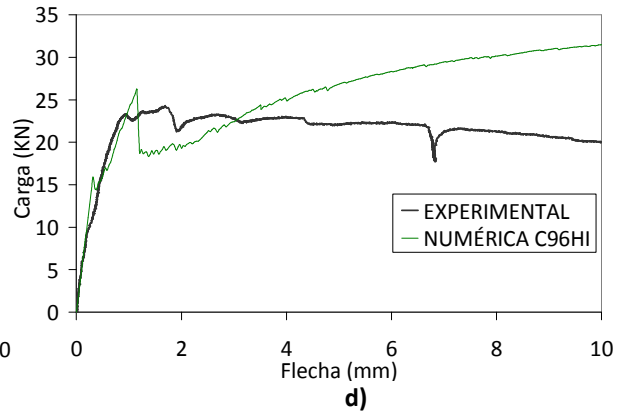
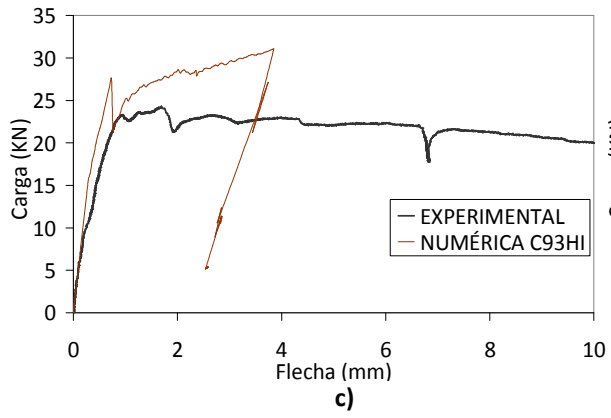
**Tabla 5. 13.** Valores de los parámetros para las modificaciones de la combinación 123.

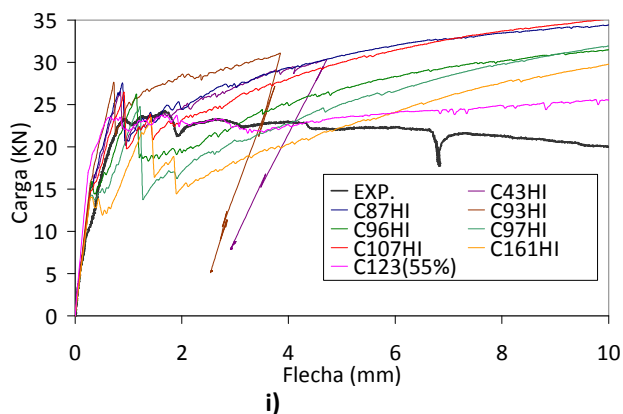
Modificación C123	Parámetros									
	fcb		f1		f2		Es		fs	
	# Id	fcb(fc)	# Id	f1(fc)	# Id	f2(fc)	# Id	Valor Numérico (MPa)	# Id	Valor Numérico (MPa)
c123	21	1,63fc	1	1fc	5	15fc	6	500000	1	30
c123 Mod.1	12	3fc	1	1fc	5	15fc	3	2000000	1	30
c123 Mod.2	12	3fc	2	15fc	1	1fc	3	2000000	1	30

#### 5.4. CURVAS CARGA-FLECHA PLACA 1.

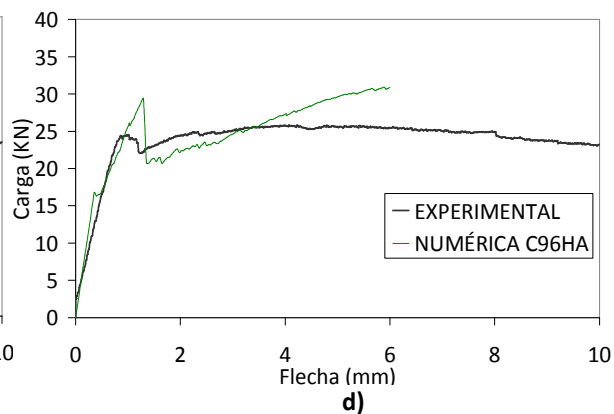
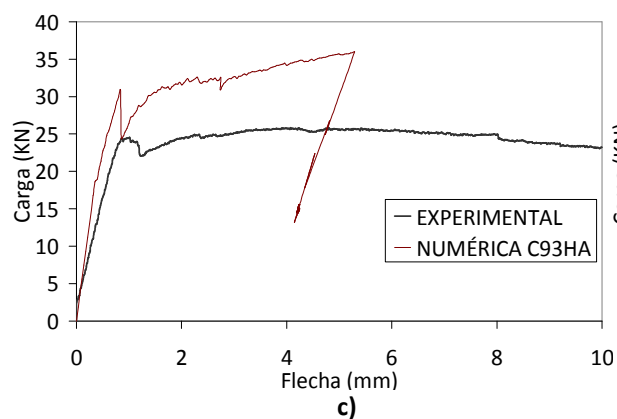
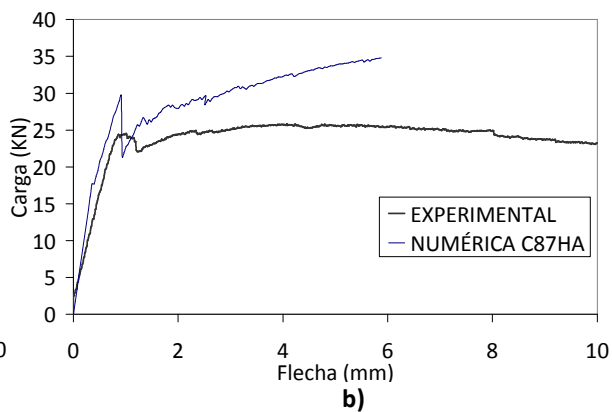
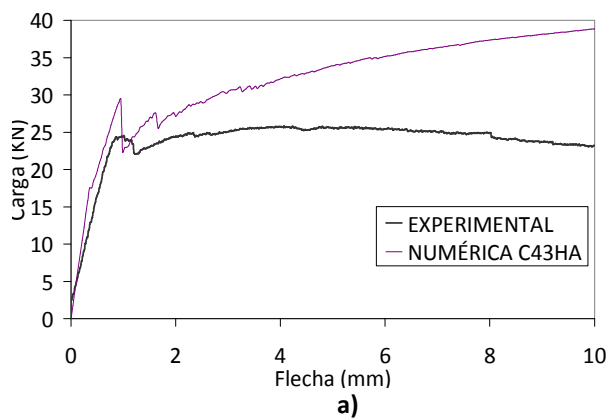
Las Figuras 5. 15, 5. 16 y 5. 17 presentan los resultados de la combinaciones numéricas más ajustadas para los hormigones HI, HA, y HB, incluyendo la combinación 123 con reducción a un 55% de su resistencia residual, ya que se conserva la forma de la curva numérica 123 y se obtiene un mejor ajuste al reducir la capacidad de carga.



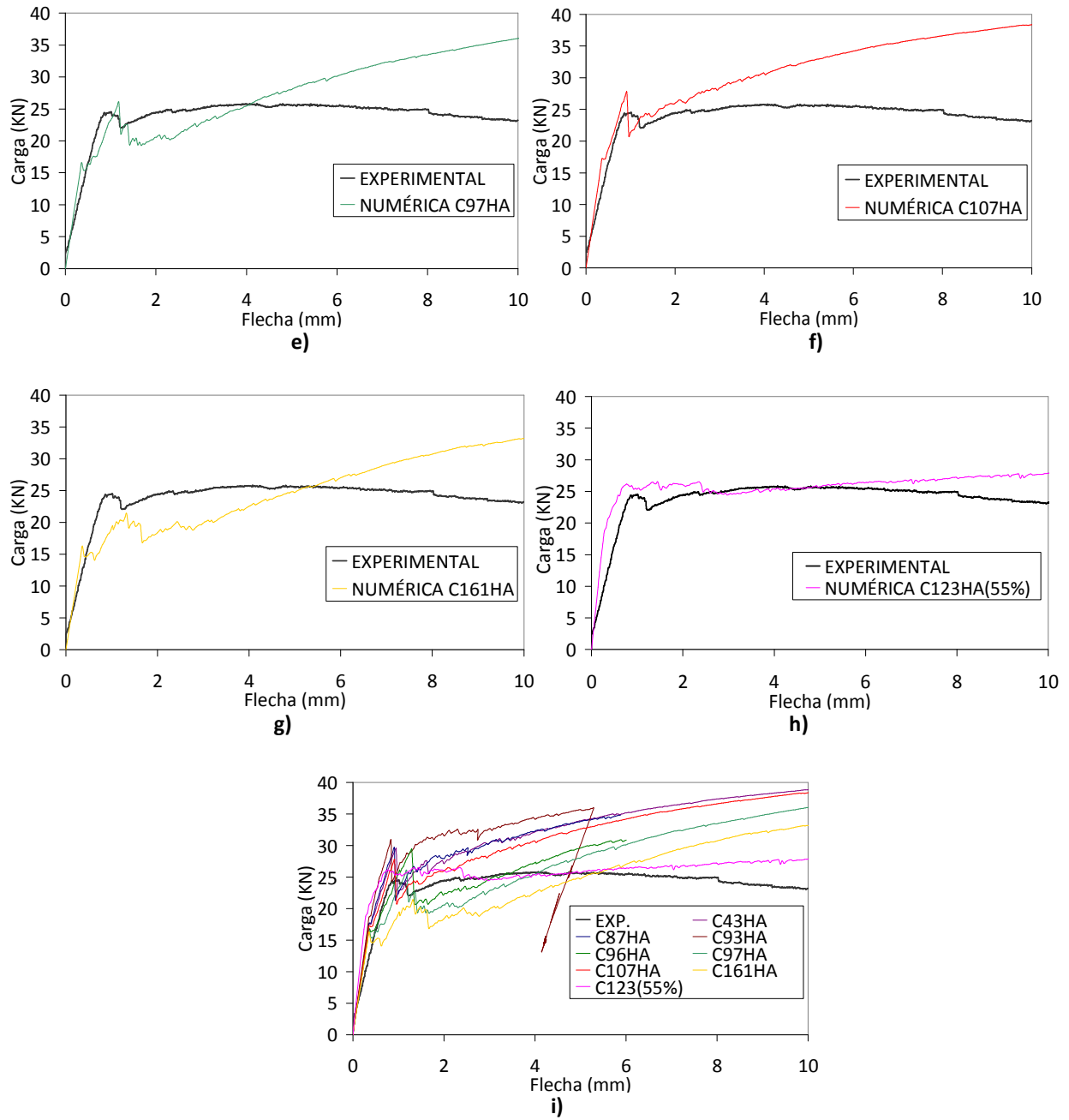




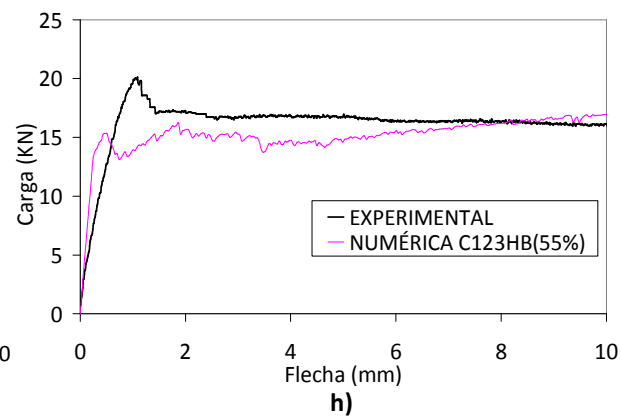
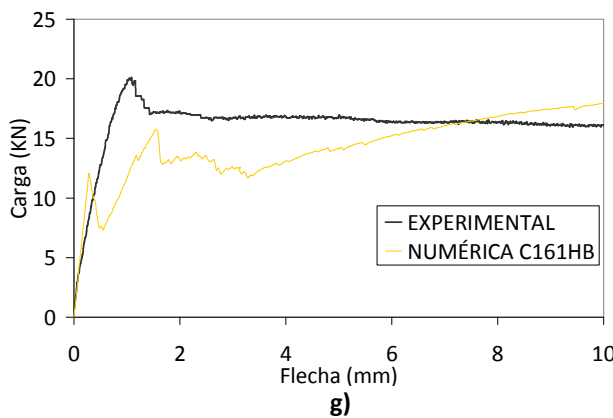
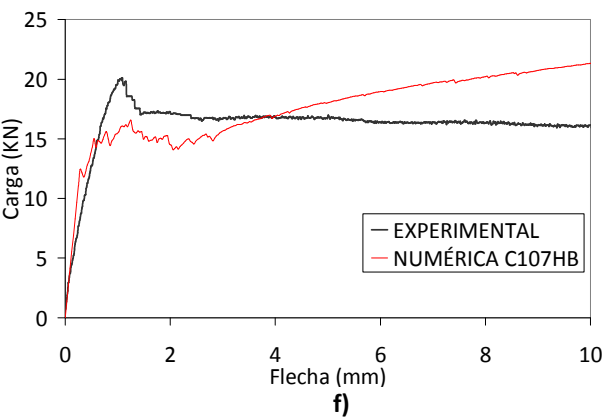
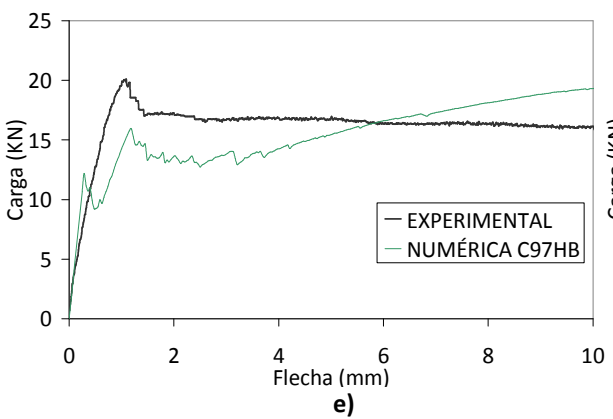
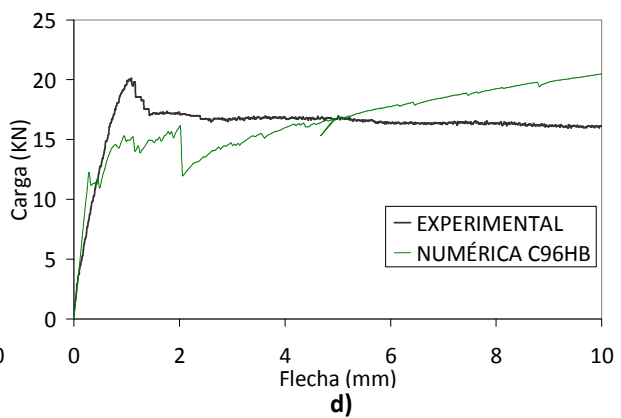
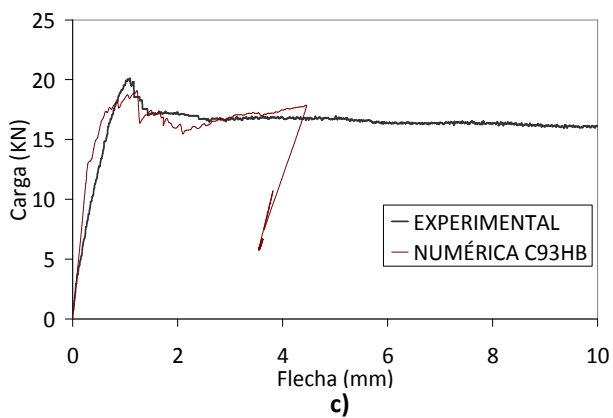
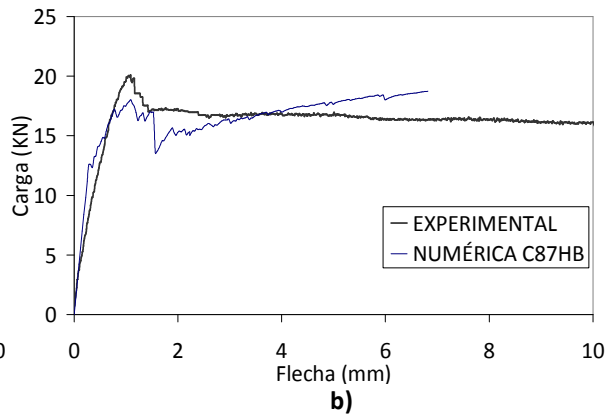
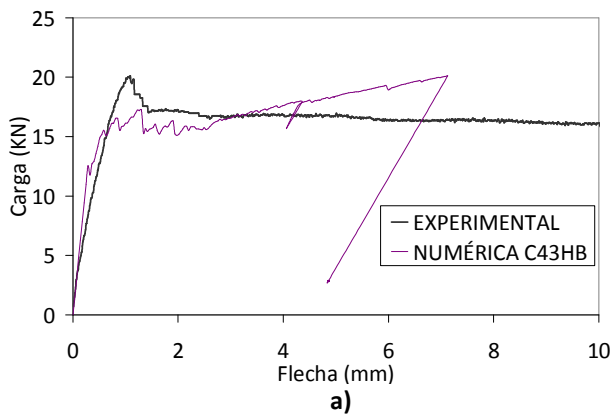
**Figura 5. 15.** Comparación curva carga-flecha experimental media Placa 1 HI con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, g) C161, y h) C123 fr (55%), Placa 1 HI.

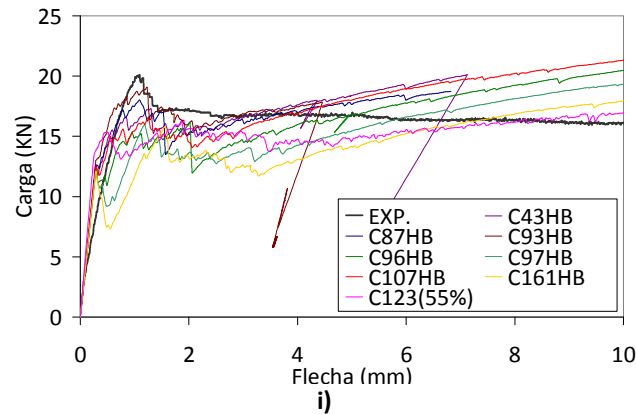






**Figura 5. 16.** Comparación curva carga-flecha experimental media Placa 1 HA con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, g) C161, y h) C123 fr (55%), Placa 1 HA.





**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.

Cuando la Placa 1 es simulada bajo las condiciones del hormigón HI, se observa que las curvas numéricas de las combinaciones elegidas presentan un comportamiento similar hasta alcanzar la carga a primera fisura, una vez allí presentan un descenso brusco en la capacidad de carga, con posterior recuperación. Para las curvas que superan los 4mm de flecha, no es posible simular la pérdida de resistencia del elemento. Sólo la curva correspondiente a la combinación 123, elegida mediante verificación gráfica y cuya resistencia residual se modifica hasta reducirla a un 55%, ofrece un ajuste bastante cercano al comportamiento experimental. Con éste ajuste es posible eliminar la caída brusca posterior a la carga a primera fisura y controlar el ablandamiento del elemento.

Es así como a partir de las combinaciones 123 (con reducción en la resistencia residual a un 55%), se observa que para este elemento se deben utilizar valores bajos de  $f_s$  y  $E_s$ , puesto que ajustan la curva en cuanto a carga a primera fisura y energía disipada para niveles de flecha de hasta 4mm. Por tanto, para su simulación se recomiendan los siguientes valores:  $f_s=30\text{MPa}$  y  $E_s=500000\text{MPa}$ .

En las Tablas 5. 14 y 5. 15 se comparan los resultados experimentales con los numéricos, obtenidos con la combinación 123 (con reducción a un 55% en la resistencia residual), en cuanto a valores de capacidad de disipación de energía, niveles de carga y mapas de fisuración.

**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.

		COMBINACIÓN C123 (55%)							
Energía Acum (J)	HI			HA			HB		
Flecha (mm)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)
PF	14,17	16,86	1,19	13,58	13,89	1,02	13,51	5,49	0,41
1,00	15,13	18,53	1,22	15,75	20,72	1,32	11,98	12,28	1,03
2,00	38,45	42,11	1,10	39,09	46,28	1,18	29,84	27,6	0,92
4,00	83,98	87,31	1,04	89,47	96,8	1,08	63,46	57,24	0,90
6,00	128,64	133,39	1,04	140,59	148,24	1,05	96,81	86,87	0,90
8,00	171,48	182,57	1,06	190,76	201,88	1,06	129,56	118,43	0,91
10,00	212,87	233,02	1,09	238,15	256,18	1,08	161,93	151,69	0,94

G: Capacidad de disipación de energía (tenacidad)

Mediante la combinación 123 (con reducción a un 55% en la resistencia residual) es posible alcanzar valores de energía muy cercanos al experimental a partir de niveles de flecha de 4mm, con diferencias que no superan el 10%. Las discrepancias de energía son algo mayores para flechas iniciales hasta los 2mm. Se observa que para el hormigón HB las diferencias son levemente mayores que para el hormigón HA con valores inferiores a los experimentales.

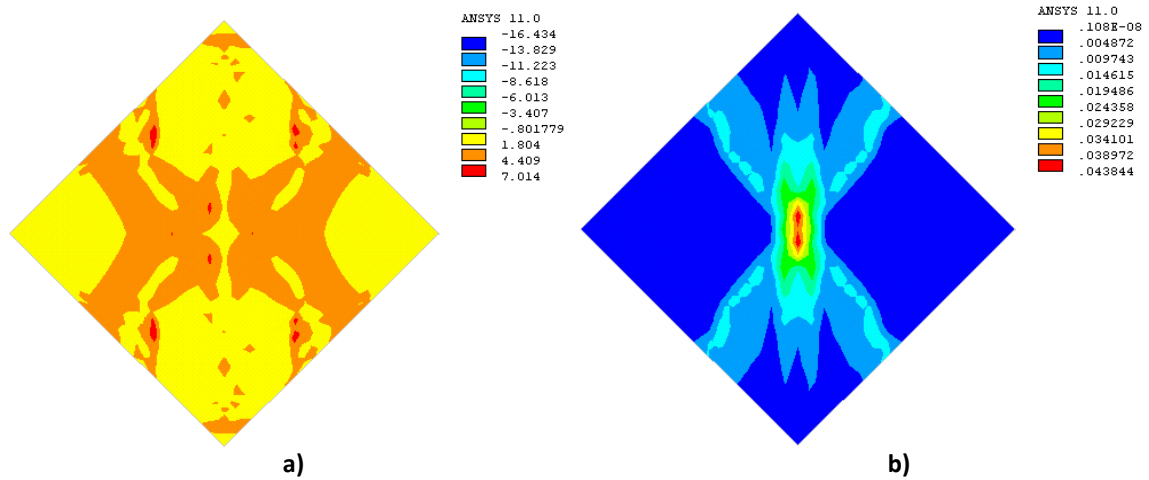
**Tabla 5. 15.** Comparación de la carga entre los valores experimentales y los numéricos, obtenidos con la combinación C 123 con una reducción al 55% de la resistencia residual, Placa 1.

		COMBINACIÓN C123 (55%)							
Carga (KN)	HI			HA			HB		
Flecha (mm)	Exp	Num	Num/Exp	Exp	Num	Num/Exp	Exp	Num	Num/Exp
PF	23,31	22,09	0,95	24,54	26,14	1,07	20,19	15,3	0,76
1,00	22,90	21,85	0,95	24,54	25,52	1,04	19,61	13,93	0,71
2,00	21,74	22,95	1,06	24,41	25,94	1,06	17,26	15,67	0,91
4,00	22,92	22,41	0,98	25,69	25,32	0,99	16,84	14,75	0,88
6,00	22,30	24,03	1,08	25,45	26,44	1,04	16,38	15,57	0,95
8,00	21,23	24,82	1,17	24,95	27,02	1,08	16,31	16,18	0,99
10,00	20,01	25,43	1,27	23,19	27,86	1,20	16,14	16,96	1,05

En cuanto a carga, bajo las condiciones del hormigón HI, se obtienen valores muy ajustados a la curva experimental, pero al no controlar la pérdida de resistencia, a mayores niveles de flecha mayores diferencias. La combinación 123 (con reducción a un 55% en la resistencia residual) bajo las condiciones del hormigón HA alcanza mejores resultados que con el hormigón HI, y se controla levemente la pérdida de

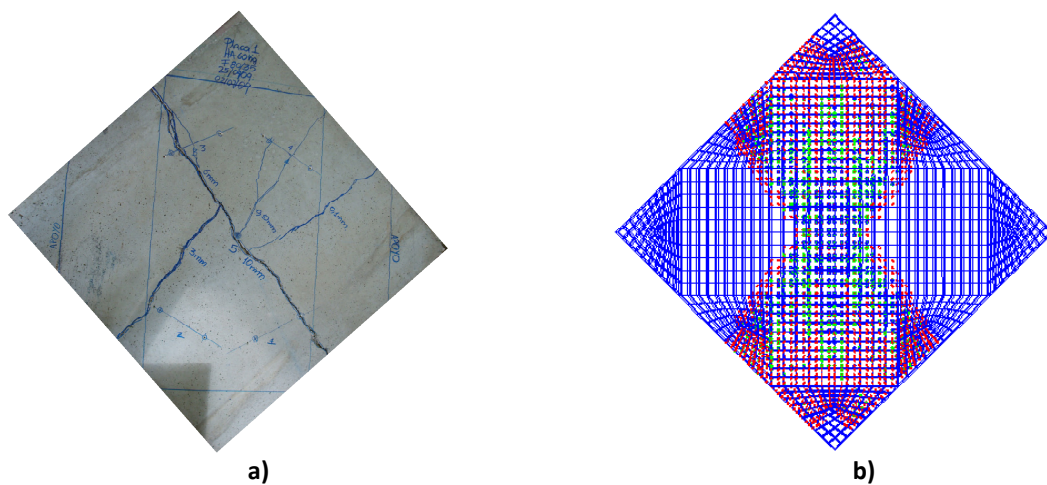
resistencia del elemento. A diferencia de los hormigones HI y HA, para el hormigón HB se obtienen mayores diferencias con respecto a la curva experimental en los niveles de flecha iniciales; a lo largo de toda la curva sus valores numéricos son inferiores a los experimentales.

En las Figuras 5. 18, 5. 19 y 5. 20 se muestran los diagramas de tensión y deformación principal, los mapas de fisuración, diagrama de flecha y posición inicial y final, obtenidos en el último *sub-step* de carga con la combinación numérica 123 (con reducción en la resistencia residual a un 55%) para el elemento Placa 1, hormigón HA.



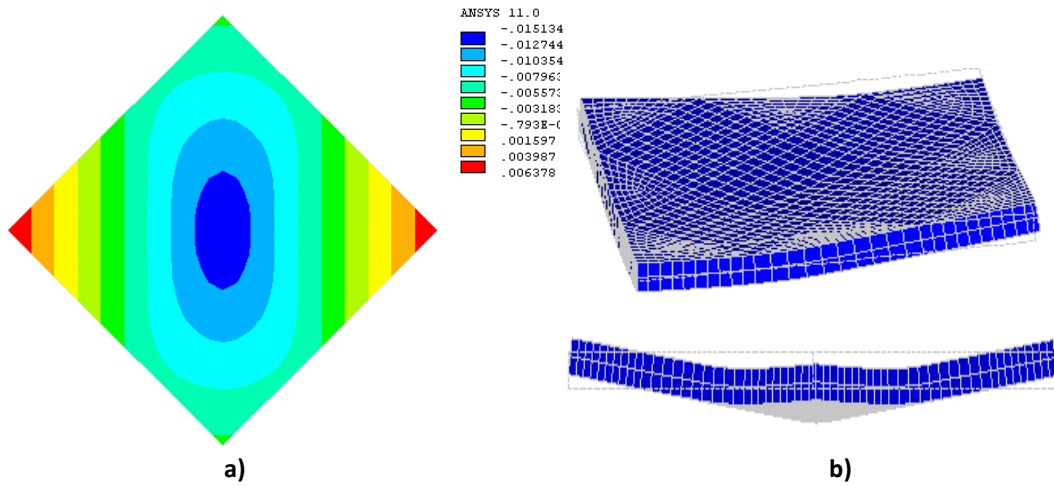
**Figura 5. 18.** Diagrama de a) tensiones principales y b) deformación principal, de la combinación 123 con reducción en la resistencia residual al 55%, Placa 1 HA.

La concentración de tensiones y deformaciones se presentan en forma de equis, produciendo la fisuración en esta zona, coincidiendo con los resultados experimentales (Figura 5. 18). Se evidencia que ha sido posible simular el comportamiento de fisuración del elemento (Figura 5. 19).



**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.

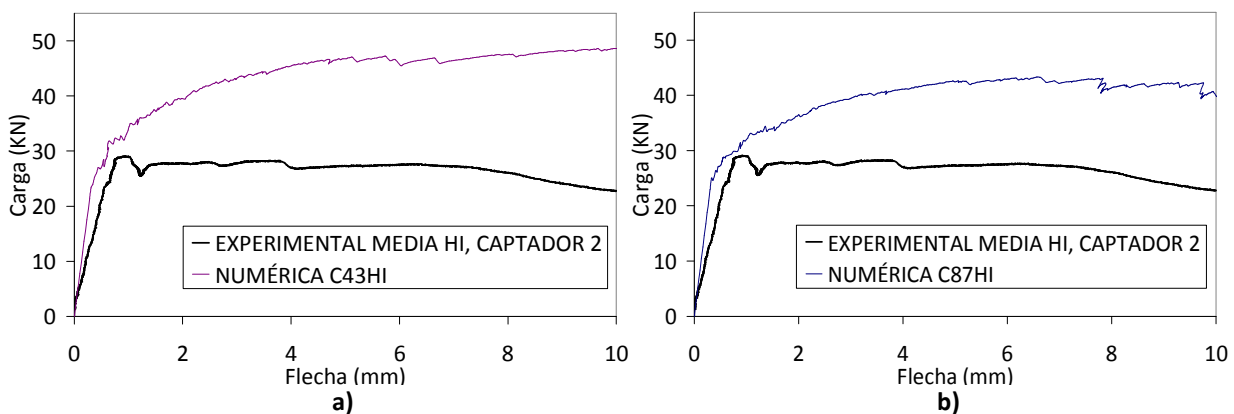
La Figura 5. 20 muestra que los mayores desplazamientos se concentran en el centro del elemento, tal como se esperaba teniendo en cuenta que es el punto de aplicación de la carga.

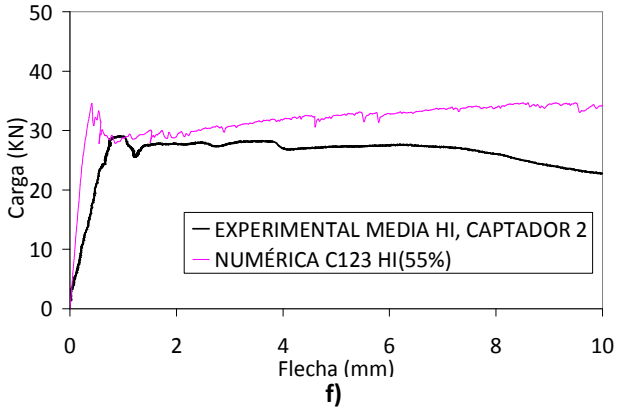
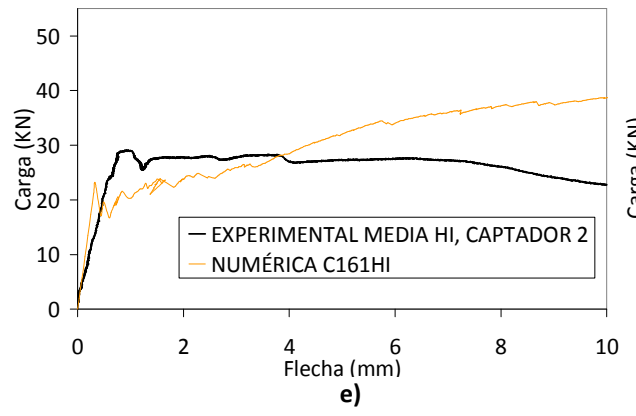
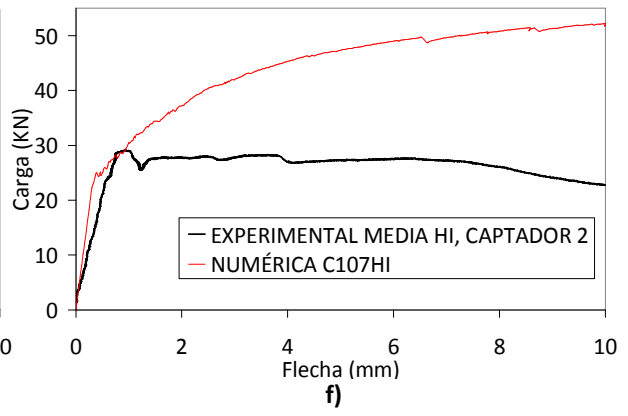
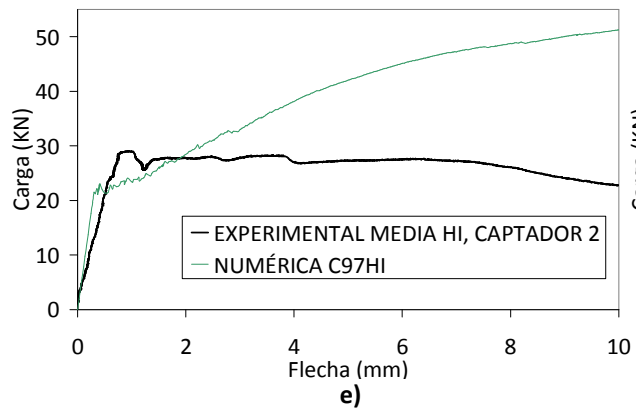
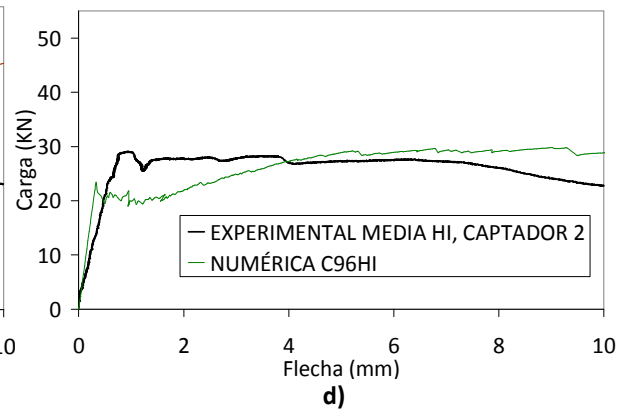
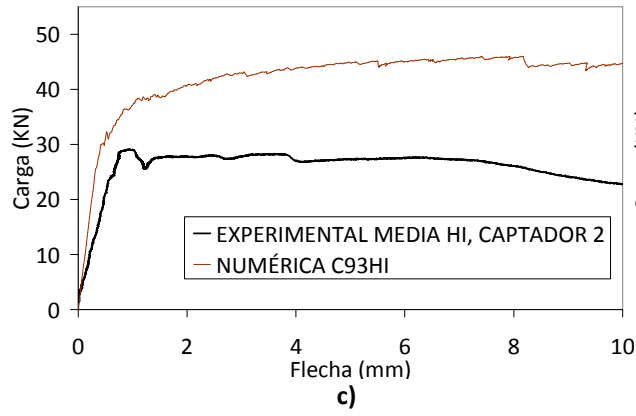


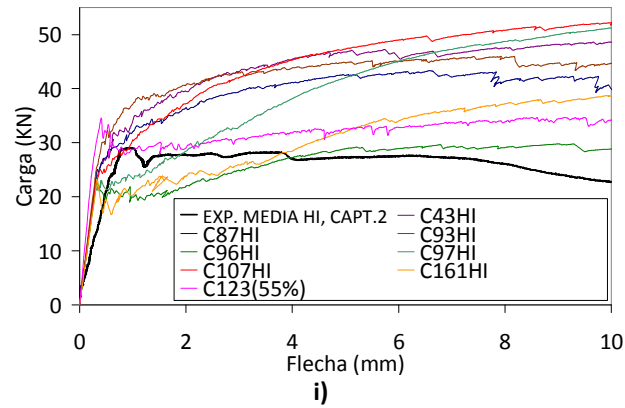
**Figura 5. 20.** a) Diagrama de flecha y b) diagrama de posición inicial y final vista frontal y lateral, combinación 123 con reducción en la resistencia residual al 55%, Placa 1 HA.

### 5.5. CURVAS CARGA-FLECHA PLACA 2.

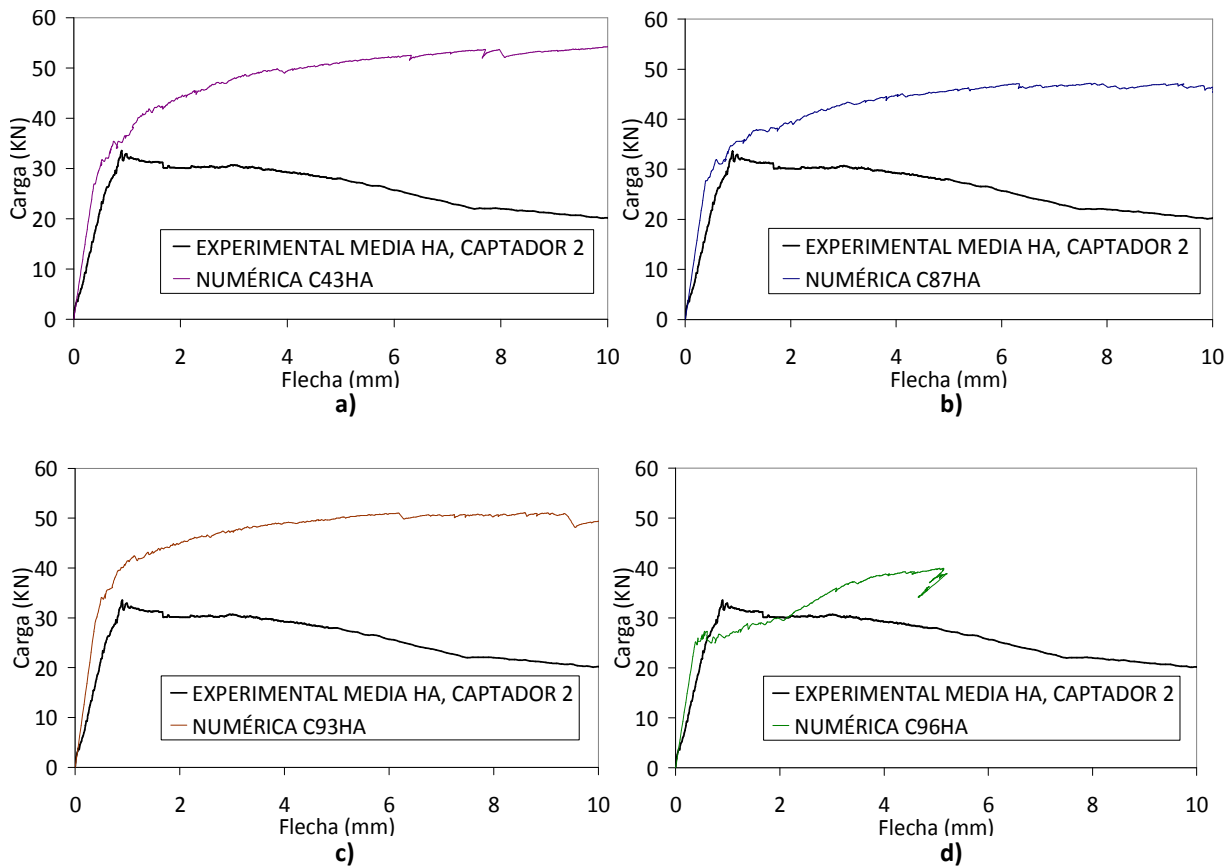
La Figuras 5. 20, 5. 21 y 5. 22 presentan los resultados de las mejores combinaciones numéricas para los hormigones HI, HA, y HB. Tal como se menciona en el anterior apartado, para la Placa 2 se observó que la combinación 123 presenta una curva bastante similar a la experimental, casi paralela pero distante. Teniendo en cuenta que los elementos Placa 1 y Placa 2 no evidencian orientación preferencial de las fibras debido a su geometría, la resistencia residual se reduce a un 55% con el fin de reducir su capacidad de carga. De esta manera, se conserva la forma de la curva numérica 123 y se obtiene un mejor ajuste.



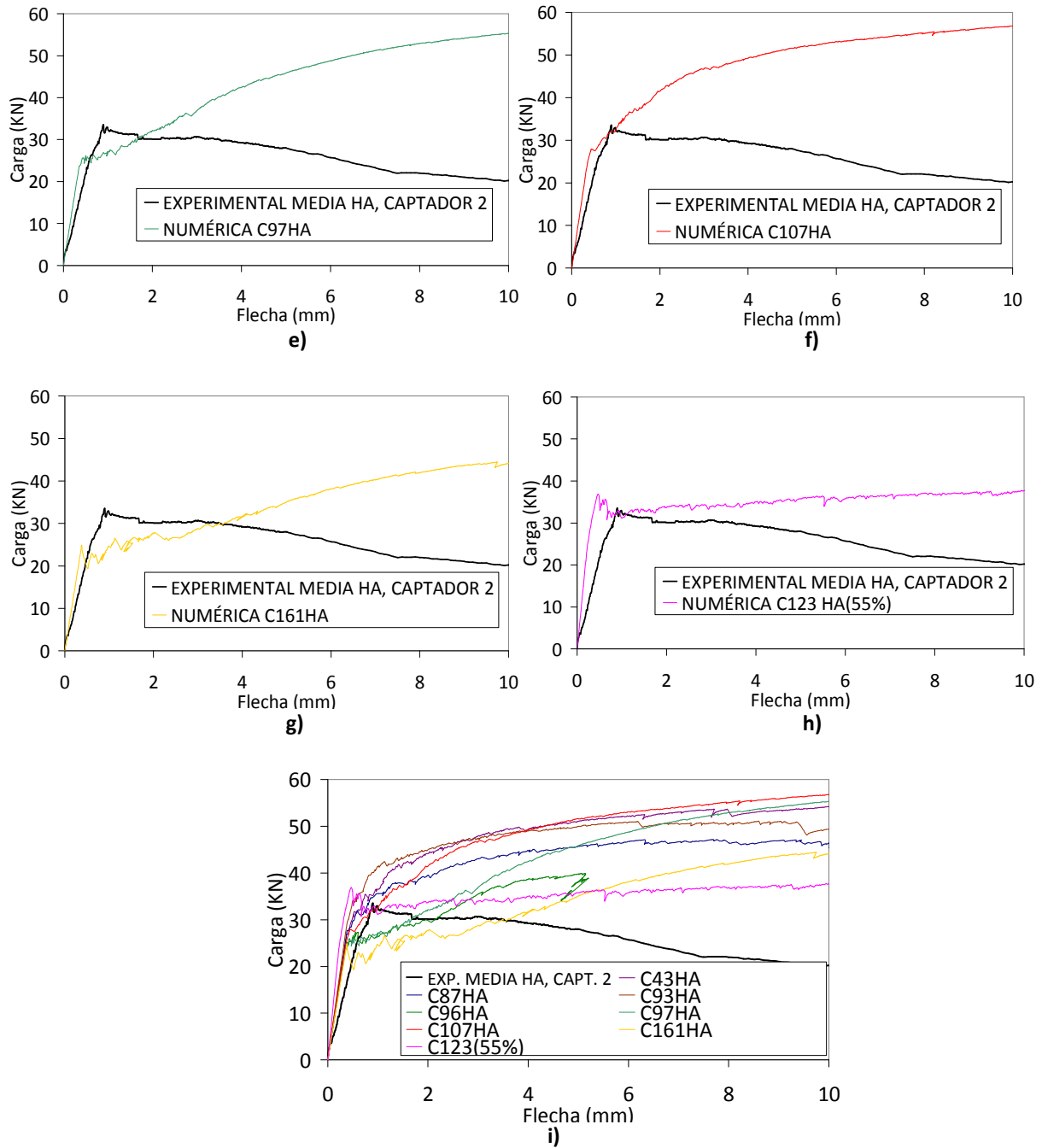




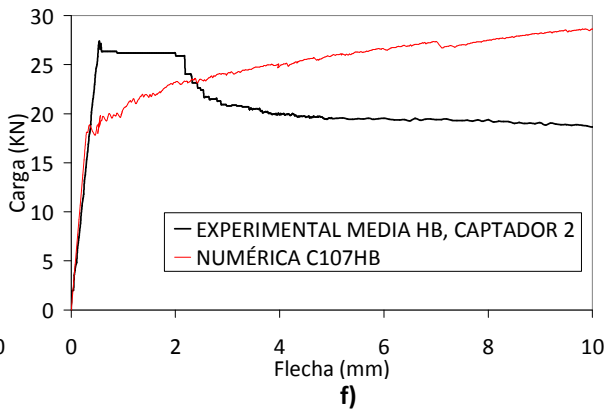
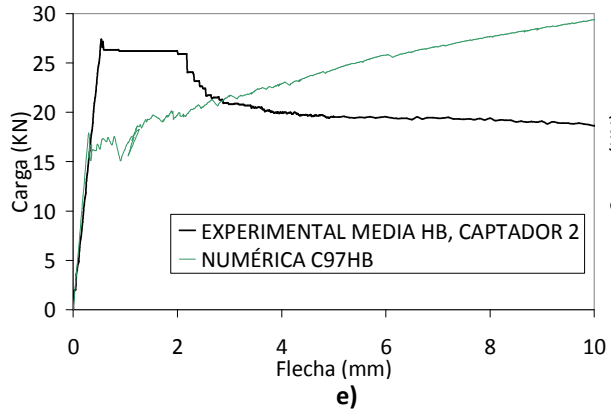
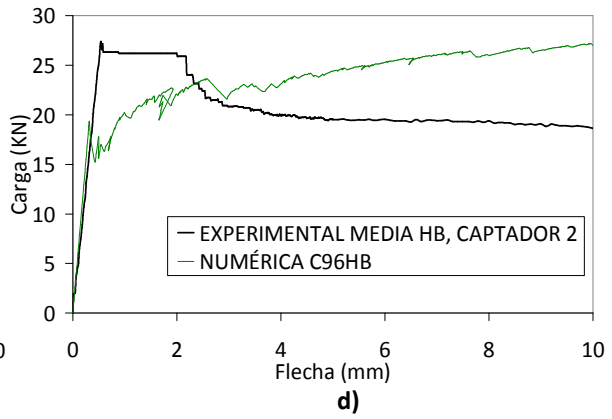
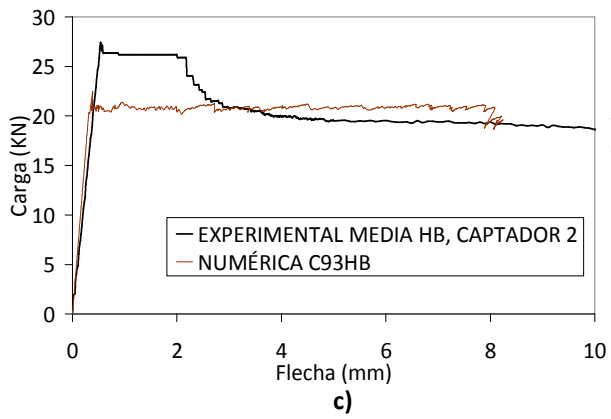
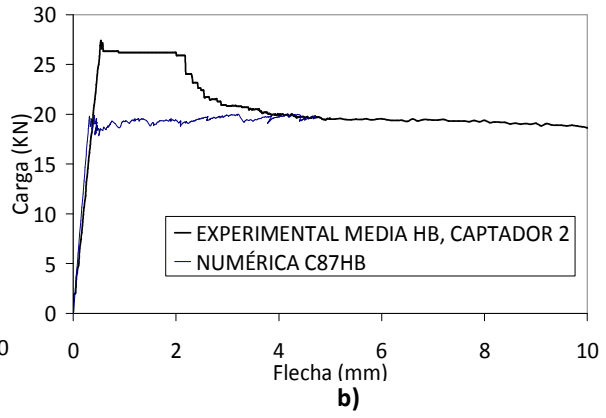
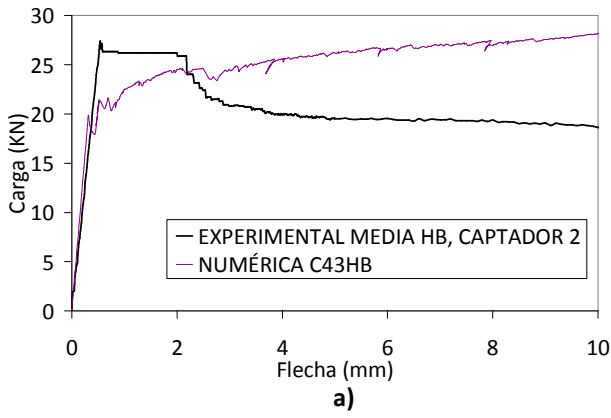
**Figura 5. 21.** Comparación curva carga-flecha experimental media Placa 2 HI con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, g) C161, y h) C123 fr (55%), Placa 2 HI.

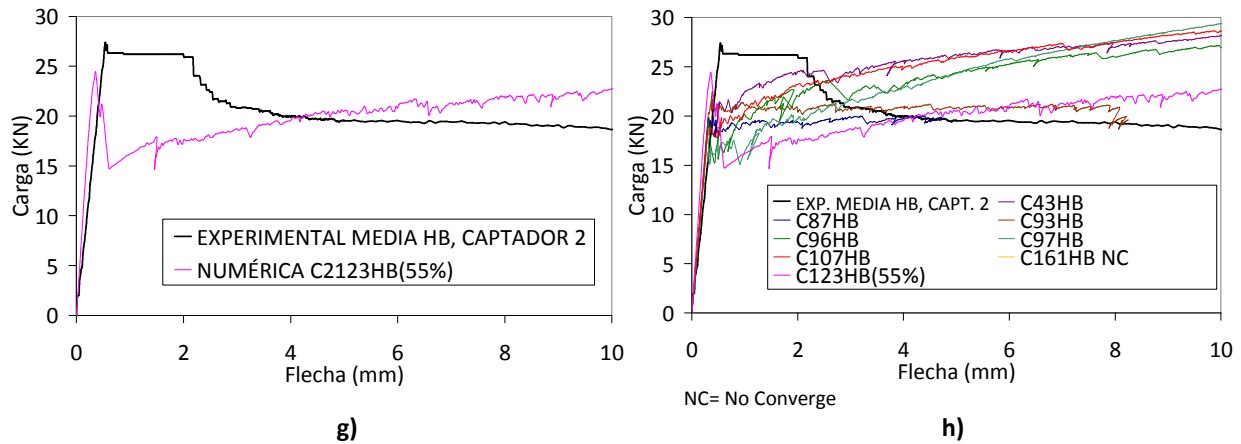






**Figura 5. 22.** Comparación curva carga-flecha experimental media Placa 2 HA con las curvas carga-flecha numéricas correspondientes a las combinaciones a) C43, b) C87, c) C93, d) C96, e) C97, f) C107, g) C161, y h) C123 fr (55%), Placa 2 HA.





**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.

Cuando la Placa 2 es simulada bajo las condiciones del hormigón HI, se observa que las curvas numéricas de las combinaciones 43, 87, 93, 97 y 107 presentan una forma bastante similar a la experimental a lo largo de toda la curva; pero no simulan la pérdida de resistencia del elemento. Las curvas numéricas de las combinaciones 96, 97 y 161 alcanzan una carga a primera fisura inferior a la experimental, y las combinaciones 96 y 161 una vez alcanzan dicha carga presentan un descenso con posterior endurecimiento no representando la pérdida de resistencia del elemento. Sólo la curva correspondiente a la combinación 123, elegida mediante verificación gráfica y cuya resistencia residual se modifica hasta reducirla a un 55%, ofrece un ajuste bastante cercano al comportamiento experimental. Con la modificación de la combinación 123 es posible aproximarse a la carga a primera fisura experimental, representar el posterior descenso en la resistencia y controlar el ablandamiento del elemento hasta un nivel de flecha de 4mm. Son éstas las principales razones por las cuales la combinación 123 (con reducción en la resistencia residual a un 55%) es elegida como la más ajustada.

Es así como a partir de las combinaciones 123 (con reducción en la resistencia residual a un 55%), se observa que para este elemento se deben utilizar valores bajos de  $f_s$  y  $E_s$ , puesto que ajustan la curva en cuanto a carga a primera fisura y energía disipada para niveles de flecha de hasta 4mm. Por tanto, para su simulación se recomiendan los siguientes valores:  $f_s=30\text{MPa}$  y  $E_s=500000\text{MPa}$ .

En las Tablas 5. 19 y 5. 20 se comparan los valores de capacidad de disipación de energía, niveles de carga y mapas de fisuración obtenidos con la combinación 123 con reducción en la resistencia residual.

**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.

Energía Acum (J)	COMBINACIÓN C123 (55%)								
	HI			HA			HB		
	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)	G Exp (J)	G Num (J)	G Num(J)/G Exp(J)
PF	16,61	16,87	1,02	13,45	10,34	0,77	7,48	4,98	0,67
1,00	18,92	26,15	1,38	19,99	28,86	1,44	19,74	16,41	0,83
2,00	46,38	55,77	1,20	51,24	60,95	1,19	46,06	33,16	0,72
4,00	102,09	117,00	1,15	111,34	129,3	1,16	94,37	70,26	0,74
6,00	156,53	181,89	1,16	166,61	200,34	1,20	135,62	111,11	0,82
8,00	210,73	248,97	1,18	213,44	273,24	1,28	176,5	153,55	0,87
10,00	259,18	317,29	1,22	255,55	347,42	1,36	216,52	197,73	0,91

G: Capacidad de disipación de energía (tenacidad)

Con la combinación 123 (con reducción a un 55% en la resistencia residual) es posible alcanzar valores de energía similares al experimental a lo largo de toda la curva, con diferencias de hasta un 38%. Se observa que para el hormigón HA se presenta un mejor ajuste para niveles de flecha entre 2 y 6mm; mientras que, para el hormigón HB se presentan mejores ajustes para niveles de flecha superiores a 6mm.

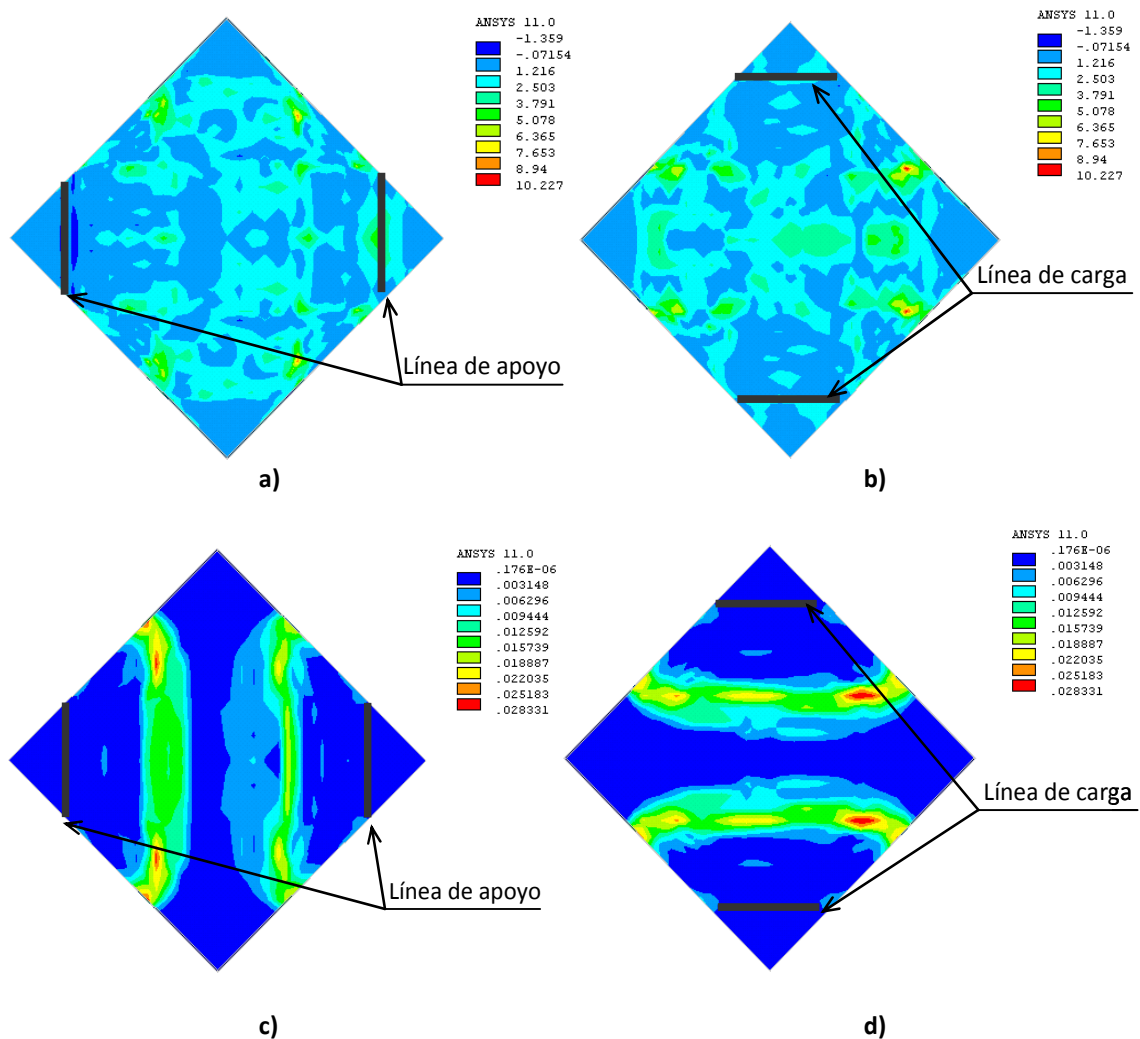
**Tabla 5. 17.** Comparación de la carga entre los valores experimentales y los numéricos, obtenidos con la combinación C 123 con una reducción al 55% de la resistencia residual, Placa 2.

Carga (KN)	COMBINACIÓN C123 (55%)								
	HI			HA			HB		
	Exp	Num	Num/Exp	Exp	Num	Num/Exp	Exp	Num	Num/Exp
PF	29,10	30,92	1,06	32,99	36,9	1,12	27,39	24,34	0,89
1,00	29,01	28,75	0,99	32,30	31,32	0,97	26,2	16,27	0,62
2,00	27,78	29,48	1,06	30,12	33,73	1,12	26,19	17,63	0,67
4,00	26,99	31,97	1,18	29,24	35,03	1,20	21,61	19,61	0,91
6,00	27,45	32,78	1,19	25,68	35,79	1,39	20,60	21,14	1,03
8,00	26,10	33,94	1,30	21,99	36,86	1,68	20,33	21,80	1,07
10,00	22,76	34,34	1,51	20,22	37,69	1,86	19,69	22,74	1,15

En cuanto a carga, bajo las condiciones del hormigón HI y HA, se obtienen valores muy ajustados a la curva experimental para niveles de flecha de hasta 2mm, de allí en adelante a mayor nivel de flecha mayor diferencia con la curva experimental; debido a que no se controla la pérdida de resistencia. Bajo las condiciones del hormigón HB, se obtienen mayores diferencias con respecto a la curva experimental

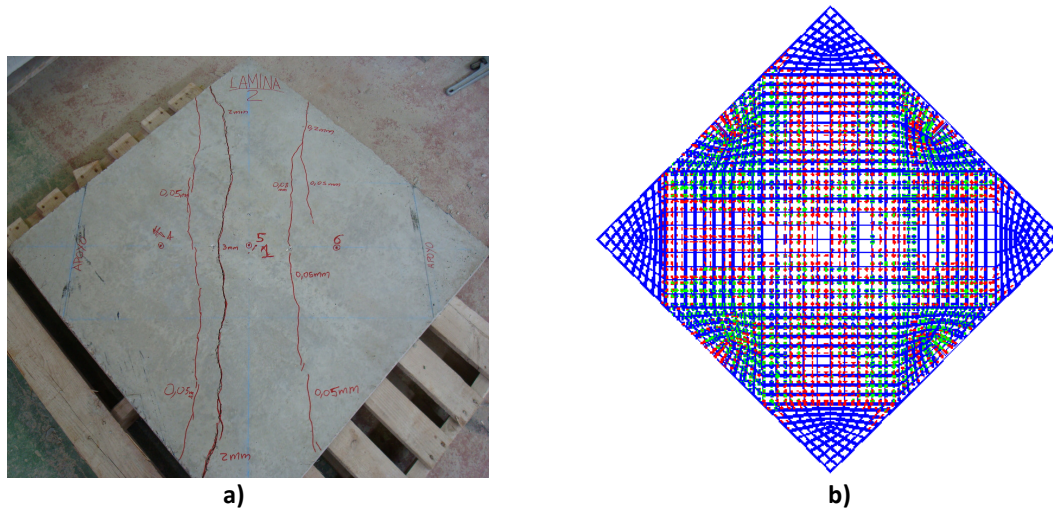
en los niveles de flecha iniciales, pero presenta un mejor control en la pérdida de resistencia del elemento.

Las Figuras 5. 23, 5. 24 y 5. 25 muestran los diagramas de tensión y deformación principal, mapas de fisuración, diagrama de flecha y posición inicial y final, obtenidos en el último *sub-step* de carga con la combinación numérica 123 (con reducción en la resistencia residual a un 55%) para el elemento Placa 2, hormigón HA.



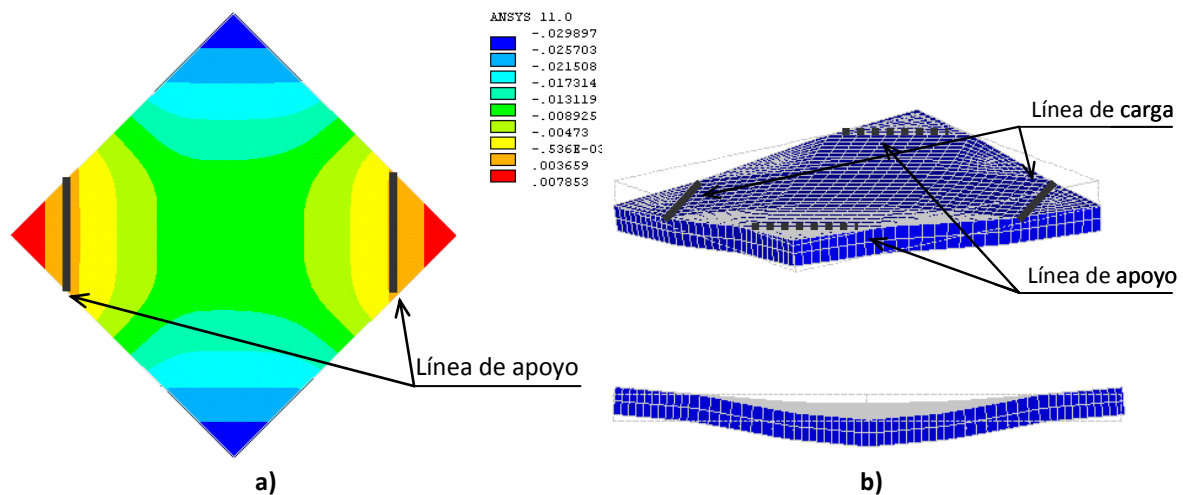
**Figura 5. 24.** Diagrama de a) tensiones inferiores, b) tensiones superiores, c) deformaciones inferiores, y d) deformaciones superiores, de la combinación 123 con reducción en la resistencia residual al 55%, Placa 2 HA.

En la parte inferior se observa concentración de tensiones en la zona central del elemento en forma de líneas paralelas a las líneas de apoyo. Algo similar sucede en la parte superior pero las líneas de concentración de tensiones son paralelas a las líneas de carga (Figura 5. 24).



**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.

El mapa de fisuración obtenido numéricamente ilustra de forma conjunta tanto las fisuras inferiores como las superiores, coincidiendo con el comportamiento experimental (Figura 5. 25).



**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.

Los mayores desplazamientos se presentan en las líneas de aplicación de la carga y alcanzan valores de 29mm; se observa simetría en los valores alcanzados. En el centro del elemento el desplazamiento es de 9mm.

## 5.6. CONCLUSIONES DE LA EXTRAPOLACIÓN A OTRAS CALIDADES DE HORMIGÓN.

Para el elemento EN15651, las extrapolaciones a las calidades de hormigón HA y HB obtenidas con las combinaciones numéricas 107 y 97 han sido bastante ajustadas al valor de energía experimental. Con las combinaciones 107 y 97 las diferencias no superan el 22% y 18% para ambos hormigones, respectivamente.

Por el contrario, en el caso del elemento ASTM1018 la extrapolación realizada con las combinaciones 43 y 93 a los hormigones HA y HB arroja diferencias altas con valores de hasta el 30%. Por lo cual se analiza cómo podría modificarse los parámetros  $E_s$  y  $f_{cb}$  y variar  $f_1$  y  $f_2$  para la combinación numérica 123 y alcanzar resultados mucho más ajustados. Cabe recordar que las probetas de este elemento bajo las condiciones del hormigón HI presentaron valores de  $D_c$  experimentales altos, denotando una gran variación en las respuestas, por tanto carece de sentido obtener resultados numéricos ajustados a la respuesta experimental.

Para la placa 1 se logran buenos valores de extrapolación empleando la combinación 123 reducida en su capacidad residual, cuyas diferencias de energía no superan el 10% con respecto a los resultados experimentales de los hormigones HA y HB.

Para el elemento Placa 2, se alcanza una considerable mejora en la extrapolación a otras calidades de hormigón con la combinación 123 reducida en su capacidad residual; con diferencias que no superan el 20% hasta un nivel de flecha de 4mm para el hormigón HA, y del 15% hasta un nivel de flecha de 10mm para el hormigón HB, logrando un mejor ajuste para el hormigón HB.





# 6

## CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN



## **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>



## **CAPITULO 6.**

# **CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN.**

En la presente tesis doctoral se ha planteado un método para la modelización del HRFA. Para la validación del modelo se llevan a cabo dos estudios: experimental y numérico. En el *estudio experimental* se prueban diferentes elementos elaborados con HRFA; y en el *estudio numérico* se identifican los parámetros influyentes del modelo, se realiza su ajuste y se verifica su adaptación a distintos elementos y hormigones.

A continuación se enuncian las principales conclusiones obtenidas con esta tesis doctoral y se proponen futuras líneas de investigación.

El planteamiento experimental ha servido para evaluar y cuantificar la dispersión de los resultados, y por tanto para plantear el nivel de resolución que debe exigir el modelo numérico, evitando plantear exigencias inútiles.

La realización de ensayos de distintos tipos estructurales ha servido para adaptar el modelo a respuestas distintas, y verificar la adecuación de los métodos de ensayo estándares a los elementos construidos reales.

### **6.1. CONCLUSIONES.**

Se ha planteado un modelo de simulación propio aplicable en un programa comercial de elementos finitos (ANSYS) a partir de los modelos propuestos por Huang (1995), y Padmarajaiah y Ramaswamy (2002). Se ha establecido cómo definir la geometría para cada elemento empleando varios volúmenes que permiten un mallado uniforme y facilitan la aplicación de las cargas y los apoyos. Además, se ha seleccionado el tipo de elemento finito a utilizar de la librería del ANSYS, y las fibras han sido incluidas como armado equivalente distribuido en tres direcciones. El modelo emplea tres parámetros que se obtienen de forma experimental: resistencia a compresión uni-axial del hormigón (fc), resistencia a tracción uni-axial del hormigón (ft), y resistencia residual a flexo-tracción del hormigón con fibras de acero (fr.)

Al comparar los resultados obtenidos empleando el modelo de Huang (1995) y el modelo propuesto en la presente tesis doctoral, se observa que los resultados numéricos

obtenidos con el modelo propuesto se semejan al comportamiento experimental de los elementos analizados; sin embargo, es necesario ajustar los parámetros del modelo para lograr mejores resultados.

#### 6.1.1. CONCLUSIONES ACERCA DE LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL COMPORTAMIENTO DEL HRFA.

Por medio de un diseño de experimentos y análisis de varianza se han identificado los parámetros influyentes para el modelo propuesto. Ha sido posible observar que para cada elemento y para diferentes niveles de flecha unos parámetros son más influyentes que otros, los parámetros fundamentales que afectan la respuesta en todos los elementos son: resistencia bi-axial a compresión del hormigón ( $f_{cb}$ ), resistencia a compresión bi-axial impuesta en un estado de tensión hidrostático ( $f_1$ ), resistencia a compresión uni-axial impuesta en un estado de tensión hidrostático ( $f_2$ ), límite elástico del armado equivalente ( $f_s$ ) y módulo de Young del armado equivalente ( $E_s$ ).

Además, se realiza un ajuste de parámetros ensayando parejas de parámetros. Se confirma la influencia principal de los parámetros límite elástico del armado equivalente ( $f_s$ ) y el módulo de Young del armado equivalente ( $E_s$ ) en la respuesta numérica.

Las diferentes combinaciones de parámetros proporcionan diferentes resultados dependiendo del elemento; así las combinaciones que son buenas para un elemento no necesariamente son buenas para otros.

En ASTM 1018 hay muchas opciones para el armado equivalente ( $f_s$ \_ $E_s$ ) que representan un comportamiento adecuado al experimental, sin cambios significativos en las respuestas numéricas. En general, los mejores resultados se obtienen para combinaciones de valores de  $f_s$  y  $E_s$  bajos (300 y 500000MPa, respectivamente), o para combinaciones con valores de  $f_s$  medios (1515 o 1650MPa) y valores altos de  $E_s$  (1010000 o 2000000MPa). El modelo detecta un comportamiento frágil en este ensayo, tras la primera fisura, que en los resultados experimentales no se produce por efectos de tamaño.

En la prueba EN 14651, los resultados parecen indicar que  $f_s$  no influye, y que las mejores respuestas se obtienen para  $E_s$  altos (1010000 o 2000000MPa).

Los ensayos sobre placas delgadas muestran la necesidad de admitir el efecto de orientación de las fibras, los mejores resultados se obtienen también para valores altos de  $E_s$  (1010000 o 2000000MPa) y valores bajos de  $f_s$  (30 o 300MPa) que sería compatible con los del elemento EN14651.

La etapa de variación de parámetros aislados evidenció que se requería un ajuste de parámetros de forma conjunta. La combinación de los cinco principales parámetros muestra que es posible obtener combinaciones numéricas que se ajustan más al comportamiento experimental de cada elemento estudiado.

La utilización de los valores de  $E_s$  altos (1505000MPa) junto con valores de  $f_s$  entre medios y altos (1515-3000MPa) permite obtener respuestas que se ajustan significativamente bien a todos los ensayos realizados. Sin embargo, la adaptación al comportamiento más dúctil de elementos tipo placa y la simulación adecuada de su respuesta tras la fisura exige una reconsideración de estos parámetros. En estos casos, es más recomendable utilizar valores de  $E_s$  inferiores (incluso de 500000MPa) y de  $f_s$  en la gama menor (30 a 300MPa). Evidentemente, un buen ajuste exige admitir el efecto de orientación y reducir el valor de la resistencia residual ( $f_r$ ) del HRFA.

Se confirma que sólo valores extremos en los parámetros: resistencia a compresión bi-axial impuesta en un estado de tensión hidrostático ( $f_1$ ), resistencia a compresión uni-axial impuesta en un estado de tensión hidrostático ( $f_2$ ) y resistencia bi-axial a compresión del hormigón ( $f_{cb}$ ) influyen un poco en los resultados obtenidos. Es decir,  $f_1=30f_c$ ;  $f_2=20f_c$  y  $f_{cb}=10f_c$ . Se recomienda utilizar valores para  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_{cb}$  en la línea de  $f_1=1f_c-1,9f_c$ ;  $f_2=3,4f_c-15f_c$  y  $f_{cb}=1,2f_c-3,5f_c$ .

#### 6.1.2. CONCLUSIONES SOBRE LA REPRESENTATIVIDAD DE LOS ENSAYOS NORMALIZADOS Y LAS NECESIDADES DEL NIVEL DE AJUSTE.

La comparación de los valores por medio de un criterio de ajuste definido en este trabajo como “la media corregida  $D_c$  numéricos y experimentales” permitió conocer las combinaciones numéricas que se encontraban dentro del rango de variación presentadas por las probetas experimentales.

De esta manera, para el elemento EN14651 seis (6) combinaciones numéricas presentaron un valor de  $D_c$  inferior al experimental, evidenciando que la simulación de este tipo de elemento es sensible ante cualquier modificación en los valores de los parámetros empleados.

Para el elemento ASTM1018, la mayoría de las combinaciones numéricas presentaron un valor de  $D_c$  inferior al  $D_c$  experimental, lo que muestra que cambios en los parámetros empleados no influyen significativamente en la respuesta carga flecha de este tipo de probeta. Las probetas de este elemento presentan mucha variación (valores de  $D_c$  experimentales altos), lo que sugiere que no es tan razonable tratar de ajustarse demasiado a los valores experimentales medios.

Este criterio permitió concluir que el método de ensayo propuesto por la norma EN14651 se adapta mejor que el de la norma ASTM1018 a la respuesta de elementos estructurales como las placas ensayadas.

### 6.1.3. CONCLUSIONES ACERCA DE LA EXTRAPOLACIÓN A OTRAS CALIDADES DE HORMIGÓN.

Al emplear las combinaciones numéricas seleccionadas como las más ajustadas al comportamiento experimental de los elementos bajo las condiciones del hormigón HI, ha sido posible simular de manera bastante acertada el comportamiento de elementos de HRFA con diferentes geometrías bajo otras calidades de hormigón, lo que valida el procedimiento realizado y el rango de valores de los parámetros principales que se proponen.

Para el elemento EN14651, empleando las combinaciones propuestas se han alcanzado valores que no superan diferencias del 22% comparados con los resultados experimentales de las probetas de los hormigones HA y HB.

Similar sucede con las placas 1 y 2, al alcanzar resultados bastante ajustados a los experimentales. Es decir, que es posible conocer qué parámetros son susceptibles a cambios con el fin de ajustar aún más los resultados.

El elemento ASTM1018 no merece mayor esfuerzo en su ajuste puesto que la mayoría de las combinaciones numéricas ya concuerdan con el comportamiento experimental; debido a la variabilidad de las respuestas experimentales.

### 6.2. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN.

A continuación se presentan algunas propuestas para futuras líneas de investigación, de acuerdo con lo desarrollado en esta tesis doctoral.

En aras de mejorar el ajuste y la posterior selección de las mejores combinaciones, se podría ampliar el estudio considerando otros tipos de HRFA bien sea adicionando otros tipos de fibras no contempladas en la presente tesis doctoral. El nivel de fragilidad o ductilidad de las respuestas dependerá del tipo y su dosificación.

El modelo también se podría probar bajo otro tipo de ensayos experimentales, por ejemplo el ensayo de doble punzonamiento de Barcelona; de este modo, se podría analizar la versatilidad del modelo y su capacidad de adaptación a otro tipo de elementos y a otras condiciones de carga.

El modelo precisa estudios adicionales para adaptarse a las respuestas más frágiles y ser capaz de reproducir comportamientos con ablandamiento.

La consideración de la respuesta cuando el tipo de rotura es por cortante queda también por ser verificada.



## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abrishami, H.H., Mitchell, D. (1996), "*Analysis of bond stress distribution in pullout specimens*", Journal of Structural Engineering, Vol. 122 (3), p.p. 255-261.
2. ACHE (2000), "*Manual de tecnología del hormigón reforzado con fibras de acero*", Comisión 2, Grupo de Trabajo 2/2, Hormigones con Fibras.
3. ACI Committee 544.1R-96 (2002), "*State of the art report on fiber reinforced concrete*", American Concrete Institute Manual of Concrete Practice 1996, Part 1.
4. ASTM A 820-01 (1985), "*Standard specification for steel fibers for fiber reinforced concrete*", American Society for Testing Materials.
5. ASTM C 1018 (1997), "*Standard test method for flexural toughness and first crack strength of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading)*"; Annual book of ASTM Standards, American Society for testing and materials, Vol. 04 (2).
6. ASTM C 1550 (2005), "*Standard test method of fiber reinforced concrete (using centrally loaded round panel)*", Annual book of ASTM Standards, American Society for testing and materials.
7. ASTM C 1609 (2007), "*Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete*", Annual book of ASTM Standards, American Society for testing and materials.
8. Balaguru, P.N., & Shah, S.P. (1992), "*Fibre-reinforced cement composites*. New York: Mc Graw Hill, Inc.
9. Barragán, B.E. (2002), "*Failure and toughness of steel fiber reinforced concrete under tension and shear*", PhD. Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona-Spain.
10. Barros, J.A.O., Figueiras, J.A. (2001), "*Model for the analysis of steel fibre reinforced concrete slabs on grade*", Computers & Structures, Vol. 19 (1), p.p. 97-106.
11. Bazant, Z.P., Oh, B.H. (1983), "*Crack band theory for fracture of concrete*", Matériaux et Constructions, Vol. 16 (93), p.p. 155-177.
12. Bekaert (1994), "*DRAMIX: Stahlfasern – die neuzeitliche Betonbewehrung*", Bekaert, Belgien.
13. Blanco A., Pujadas, P., de la Fuente, A., Aguado, A. (2009), "*Análisis comparativo de los modelos constitutivos del hormigón reforzado con fibras*".
14. Blümel, M. (2000), "*Improved procedures for laboratory rock testing*", Proceedings of the EUROCK 2000 Symposium, Aachen, p.p. 573-578.
15. CEB-FIP (1991), *Model Code 1990*. Comité Euro-International Du Béton – Federation Internationale de la Précontrainte, París.
16. CNR-DT 204, (2006), "*Guidelines for the design, construction and production control of fibre reinforced concrete structures*".
17. CNR-DT 204, (2006), "*Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture fibrorinforzato*", Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia.
18. Craig, R. J. (1986), "*Design procedures for fibrous concrete-shear, moment and torsion*", Proceedings, Structural Concrete Design Conference, New Jersey Institute of Technology, Newark, pp. 253-284.
19. Cunha, V.M.C.F. (2009), "*Steel fibre reinforced self-compacting concrete (from micro-mechanics to composite behaviour)*", PhD. Thesis. Universidade do Minho, Portugal.
20. DBV- Merkblatt (1992), "*Bemessungsgrundlagen für stahlfaserbeton im tunnelbau*".
21. DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton, Fassung (2001), "*Design guidelines for the application of SFRC*", Deutsche Beton Vereins.

22. Denner E., Amorim F., Oliveira G. (2002), *“Modelos para el análisis no-lineal de estructuras de concreto armado por el método de elementos finitos”*, XXX Jornadas Suramericanas de Ingeniería Estructural. Universidad de Brasilia, Brasil.
23. DIN 1045-1 (1999), *“Tragwerke aus Beton”*, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Betonkalender, Ernst & Sohn, Berlín.
24. Di Prisco, M., Ferrara, L., Colombo, M., Mauri, M. (2004), *“On the identification of SFRC constitutive law in uniaxial tension”*. In di Prisco, M., Felicetti, R., Plizzari, G.A., editor, Proce. 6th RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete BEFIB 2004-PRO 39, p.p. 827-836.
25. Di Prisco, M., Colombo, M. (2006), *“FRC AND HPFRC Composites: from constitutive behaviour to structural applications, in measuring, monitoring, and modelling concrete properties”*, Proc. of the International Symposium dedicated to Prof. S. P. Shah. Konsta-Gdoutos M.S. (Ed.), Alexandroupolis (Greece), p.p. 59-68.
26. Dixon, J., Mayfield, B. (1971), *“Concrete reinforced with fibrous wire”*, Journal of the Concrete Society, Concrete, Vol. 5, No. 3, pp. 73-76.
27. Domingo, A. (2002), *“Estudio del comportamiento del hormigón con fibras de acero en elementos laminares de pequeño espesor y su comportamiento post-fisuración”*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil.
28. Dozio, D. (2008), *“SFRC Structures: Identification of the uniaxial tension characteristic constitutive law”*. PhD Thesis. Politecnico di Milano. Department of Structural Engineering. Doctoral School in Structural, Earthquake and Geotechnical Engineering. Milano-Italy.
29. Dupont, D., Vandewalle, L. (2002), *“Modelling HRFA with stress-strain approach”*, Proceedings of International Symposium: Role of Concrete in Sustainable Development, Dundee, Scotland, 103-112.
30. EHE (2008), *“Instrucción de hormigón estructural”*. Anejo 14. Recomendaciones para el proyecto y ejecución de estructuras de hormigón con fibras. European Standard EN 14651 (2005).
31. El Niema E.I. (1991), *“Reinforced concrete beams with steel fibers under shear”*, ACI Structural Journal, 88 (2), p.p. 178-183.
32. EN 14651 (2005), *“Test for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)”*. European Standard.
33. Erdélyi, A., (1993), *“The toughness of steel fiber reinforced concrete”*, Periodica Politechnica, Vo. 37 (4), p.p. 329-344.
34. Fernández Cánovas, M., (1982), *“Hormigones reforzados con fibras de acero”*, Informes de la Construcción, 342, p.p. 2-17.
35. Gao, Y.C. (1989), *“Damage modelling of fiber reinforced composites”*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 11 (3), p.p. 147-155.
36. Hannant, D. J. (1978), *“Fibre cements and fibre concretes”*, Jhon Wiley & Sons, Ltd., Chichester, United Kingdom, p. 53.
37. Hillerborg, A., Modéer, M., Peterson, P-E. (1976), *“Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements”*, Cement and Concrete Research. Vol. 6, p.p. 773-782.
38. Hillerborg, A. (1980), *“Analysis of fracture by means of the fictitious crack model, particularly for fibre reinforced concrete”*; The international Journal of Cement Composites, The Construction Press, vol. 2.
39. Hillerborg, A. and Rots, J. (1989), *“Crack concepts and numerical modelling”*, Fracture mechanics and structures, from theory to applications, p.p. 128-146.
40. Hofstetter, G., Mang, H.A., (1995), *“Computational mechanics of reinforced concrete structures”*, ISBN 3528 063904.
41. Hordijk D.A., (1991), *“Local approach to fatigue of concrete”*, Doctoral thesis, Delft University of Technology, Delft.
42. Huang V. Zhen, (1995), Grenzbeanspruchung Gebetteter Stahlfaserbetonplatten, Hannover.
43. Johnston, C. D., (1971), *“Steel fibre reinforced mortar and concrete—A review of mechanical properties”*, Fiber Reinforced Concrete, SP-44, American Concrete Institute, Detroit, 1974, p.p. 127-142.
44. Johnston, C. D. (1974), *“Steel fiber reinforced mortar and concrete, A review of mechanical properties”*. Fiber Reinforced Concrete, SP-44, American Concrete Institute, Detroit, p.p. 195-207.

45. Johnston, C. D., and Gray, R. J. (1978), "*Uniaxial tension testing of steel fibre reinforced cementitious composites*". Proceedings, International Symposium on Testing and Test Methods of Fibre-Cement Composites, RILEM, Sheffield, p.p. 451-461.
46. SCE (The Japan Society of Civil Engineers), (1984), "*Method of tests for steel fiber reinforced concrete*", Concrete Library of JSCE, Part III-2.
47. Kar, N. J., Pal, A. K. (1972), "*Strength of fiber reinforced concrete*", Journal of the Structural Division, Proceedings, ASCE, Vol. 98, No. ST-5, pp. 1053-1068.
48. Kausay, T., (1994), "*Acélhuzal-szálerősítésű betonok tulajdonságai és teherbírása*", BETON, II évfolyam, 6, Szám, p.p. 5-11.
49. Kendall, M. G., Babington B. (1939). "*The Problem of m Rankings*". The Annals of Mathematical Statistics, Vol. 10(3), p.p. 275–287.
50. König, G. & L. Kützing, (1999), "*Modelling the increase of ductility of HPC under compressive forces, a fracture mechanical approach*", Proceedings of the III International RILEM Workshop "High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites" (HPFRCC 3), Mainz, p.p. 251-260.
51. Kooiman, A.G., Van der Veen, C., Djorai M.H. (1998), "*Steel fibre reinforced concrete tunnel segments suitable for application in 2<sup>nd</sup> Heineoord Tunnel*", Proceedings of the XIII<sup>th</sup> Congress on Challenges for concrete in the next millennium, Amsterdam, The Netherlands, p.p. 719-722.G
52. Kooiman, A.G., (2000), "*Modelling steel fibre reinforced concrete for structural design*", PhD. Thesis. Technische Universiteit Delft. Delft-Netherlands.
53. Kovács, I. and Balázs, G. (2004), "*Structural performance of steel fibre reinforced concrete*", Prepared for the 2<sup>nd</sup> International Conference on Fibre Reinforced Concrete –from research to practice-. Budapest University of Technology and Economics. Budapest, Hungary.
54. Krstulovic-Opara, N., Malak, S. (1997), "*Micromechanical tensile behavior of slurry infiltrated continuous-fiber-mat reinforced concrete (SIMCON)*", ACI Material Journal, Vol. 94 (5), p.p. 373-387.
55. Laranjeira, F. (2010), "*Design-oriented constitutive model for steel fiber reinforced concrete*", PhD. Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona-Spain.
56. Li, V.C., Stang, H., Krenchel, H. (1993), "*Micromechanics of crack bridging in fibre-reinforced concrete*", Materials and Structures, 26, p.p. 486-494.
57. Lim, T.Y. (1987), "*Elastic and post-cracking behavior of steel fiber concrete*", Ph.D Thesis, The National University of Singapore, Singapore.
58. Lok, T.S. and Xiao J.R. (1998), "*Tensile Behaviour and Moment-Curvature Relationship of steel Fibre Reinforced Concrete*", Magazine of Concrete of Research. (4) 359-368.
59. Maidl, B.R. (1995) "*Steel fibre reinforced concrete*", Ernst & Sohn, p.p. 292.
60. Mansur, M.A., Ong, K.C. G., and Paramasivam, P. (1986), "*Shear strength of fibrous concrete beams without stirrups*", Journal Structures Engineering, ASCE, 112 (9), p.p. 2066-2079.
61. Naaman, A. & Shah, S.P. (1976), "*Pull-Out Mechanisms in Steel Fibre Reinforced Concrete*", ASCE Journal of the Structural Division, Vol. 121 (8), p.p. 1537-1548.
62. Naaman, A.E. Otter, D., and Najm, H. (1991), "*Elastic modulus of SIFCON in Tension and Compression*", ACI Materials Journal, Nov-Dec., p.p. 603-612.
63. Naaman, A.E., Reinhardt, H-W. (1998), "*High performance fiber reinforced cement composites 2*", Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Int. RILEM Workshop, Ann Arbor, USA, June, EFN Spon, Suffolk.
64. Nammur, Jr. G, Naaman, A. E., (1989), "*Bond stress model for fibre reinforced concrete based on bond stress slip relationship*", ACI Materials journals, Vol. 86 (1), pp 45-56.
65. Narayan Swamy, R., Jones, R., Chiam, T.P. (1993), "*Influence of steel fibers on the shear resistance of lightweight concrete i-beams*", ACI Structural Journal, Vol. 90 (1), p.p. 103-114.
66. Narayanan, R., Kareem, A.S. (1986), "*Torsion in beams reinforced with bars and fibers*", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 112 (1), p.p. 53-66.
67. Núñez, A.M. (2008), "*Análisis numérico-experimental de elementos de hormigón reforzado con fibras de acero*", Diploma de Estudios Avanzados DEA, Universidad Politécnica de Valencia,
68. Padmarajaiah, S.K. and Ramaswamy, A. (2002), "*A finite element assessment of flexural strength of prestressed concrete beams with fiber reinforcement*", Cement & Concrete Composites, 24, p.p. 229-241. Elsevier Science Ltda.
69. Padmarajaiah, S.K. and Ramaswamy, A. (2006), "*A beam and arch action model for computing the shear strength of prestressed and reinforced HSFRC beams*", Journal Article, PeerReviewed.
70. Parviz S., Lee Ch.D., (1990), "*Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete*". ACI Materials journals 87 (4), pp 433-439.

71. Reinhardt, H.W., & Naaman, A.E. (1999), "*High performance fiber reinforced cement composites – HPFRCC 3*", RILEM Proc., PRO 6, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan (France).
72. RILEM TC 162 TDF (2000), "*Test and design methods for steel fibre reinforced concrete*", Bending Test, Materials and Structures, Vol. 33, p.p. 3-5.
73. RILEM TC 162-TDF, (2002), "*Test and design methods for steel fibre reinforced concrete*", Bending Test, Final Recommendation, Materials and Structures, Vol. 35, p.p. 579-582.
74. RILEM TC 162-TDF, (2003), "*Test and design methods for steel fibre reinforced concrete*",  $\sigma$ - $\epsilon$  Design method, Final Recommendation, Materials and Structures, Vol. 36, p.p. 560-567.
75. Roelfstra, P.E., Wittmann, F.H. (1986), "*Numerical method to link strain softening with failure of concrete*", Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete. Edited by F.H. Wittmann. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. The Netherlands.
76. Romualdi, J. P., Mandel, J. A. (1964), "*Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed closely spaced short lengths of wire reinforcement*", ACI Journal, Proceedings, Vol. 61 (6).
77. Sanat, K., Niyogi, G.I., Dwarakanathan (1985), "*Fiber reinforcement beams under moment and shear*", journal of structural engineering, Vol. 111 (3), p.p. 516-527.
78. Serna, P. (1984), "*Étude de la contribution des fibres métalliques a l'amélioration du comportement du béton au cisaillement*", PhD. Thesis. L'École Nationale des Ponts et Chaussées. France.
79. Shah, S. P., Rangan, R. V. (1971), "*Fiber reinforced concrete properties*" ACI JOURNAL, Proceedings, Vol. 68 (2), p.p. 126-135.
80. Stang, H., Li, Z., & Shah, S.P., (1990), "*Pullout problem: stress versus fracture mechanical approach*", Journal of Eng. Mech., Vol. 116, p.p. 2136-2150.
81. Strack, M. (2008), "*Modelling of crack opening in steel fibre reinforced concrete under tension and bending*", Seventh International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications. Institute for Reinforced and Prestressed Concrete Structures, Ruhr-University Bochum, Germany.
82. Thomas J., Ramaswamy A. (2006), "*Finite element analysis of shear critical pre-stressed SFRC beams*", Computers and Concrete, Vol. 3, p.p. 65-77.
83. Thomeé, B., Schikora, K., Bletzinger, K.-U. (2006), "*Material modelling of steel fiber reinforced concrete*", Computers and Concrete, Vol. 3 (4), p.p. 197-212.
84. UNE 83500 (1989), "*Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. caracterización y definiciones*".
85. UNE EN 1352 (1997), "*Determinación del módulo de elasticidad estática bajo compresión del hormigón curado en autoclave o de áridos ligeros con estructura abierta*".
86. UNE 83507 (2004), "*Hormigones con fibras. Rotura por compresión*".
87. UNE 83509 (2004), "*Hormigones con Fibras. Rotura por flexo-tracción*".
88. Van Mier, J.G.M., (1997), "*Fracture processes of concrete*", CRC Press, Boca Raton, Florida, p.p. 241-242.
89. Williamson, G. R. (1974), "*The effect of steel fibers on the compressive strength of concrete*", SP-44: Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Detroit, p.p. 195-207.
90. William K.J., Warnke E.P. (1975), "*Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete*", Proc. IABSE, 19, p.p. 1-30.
91. Wolinski, Hordijk, Reinhardt & Cornelissen. (1987), "*Influence of aggregate size on fracture mechanics parameters of concrete*", International Journal of Cementitious Composites & Lightweight Concrete, 9, p.p., 95-103.
92. Zhu, E.C., Guan, Z.W., Shen, S.Z. (2002), "*Non-linear finite-element analysis of thin shell SFRC structures*", Magazine of Concrete Research, Vol. 54 (4), p.p. 291-298.

# **ANEJO A**

## **CURVAS EXPERIMENTALES CARGA-FLECHA DE LAS PROBETAS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL**





## **ANEJO A**

# **CURVAS EXPERIMENTALES CARGA-FLECHA DE LAS PROBETAS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL**

Las Figuras A. 1 a A. 5 muestran las curvas carga-flecha de las probetas realizadas con los hormigones HI, HA y HB, correspondientes a los ensayos EN14651, ASTM 1018, ASTM1550 y a las placas 1 y 2, respectivamente.

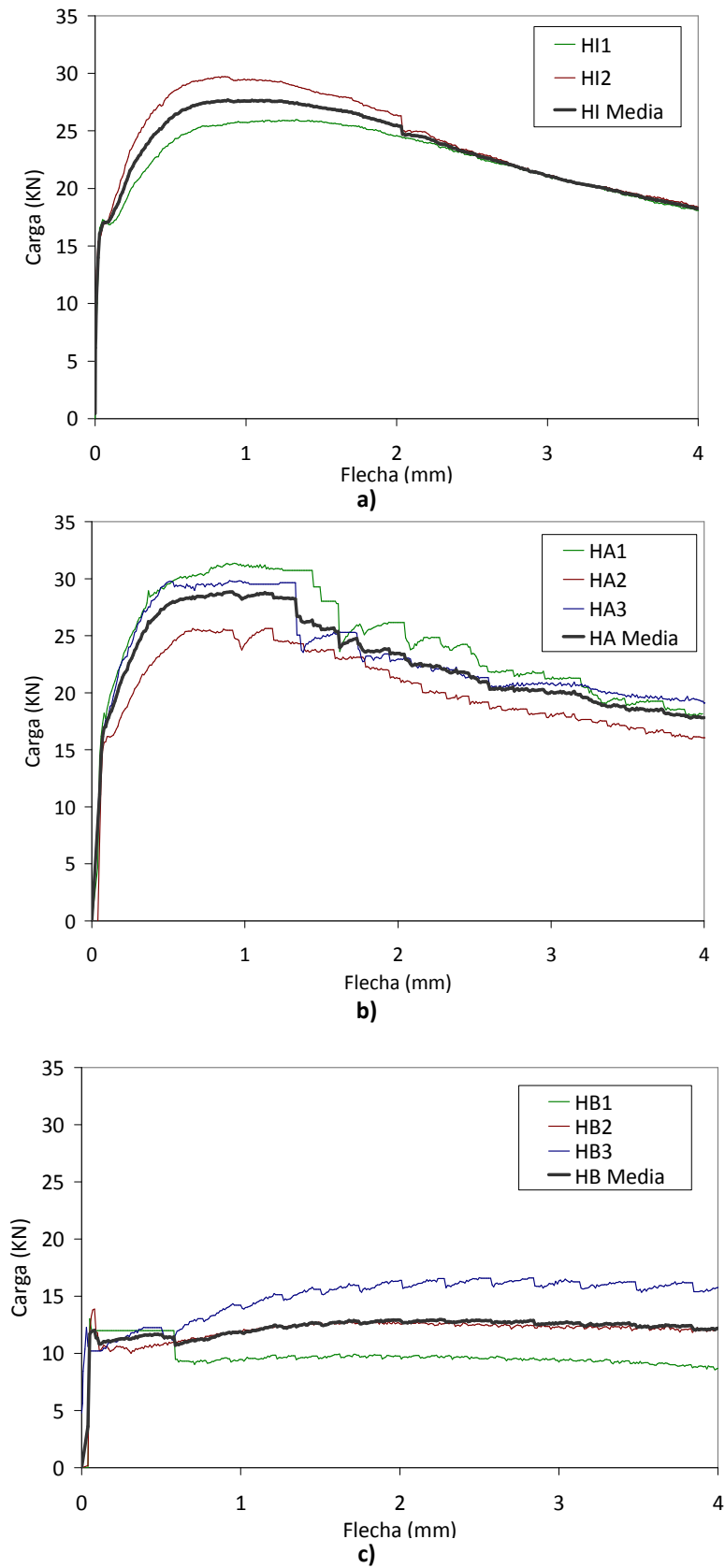


Figura A. 1. Curvas carga-flecha de las probetas de los hormigones: a) HI, b) HA y c) HB, EN14651.

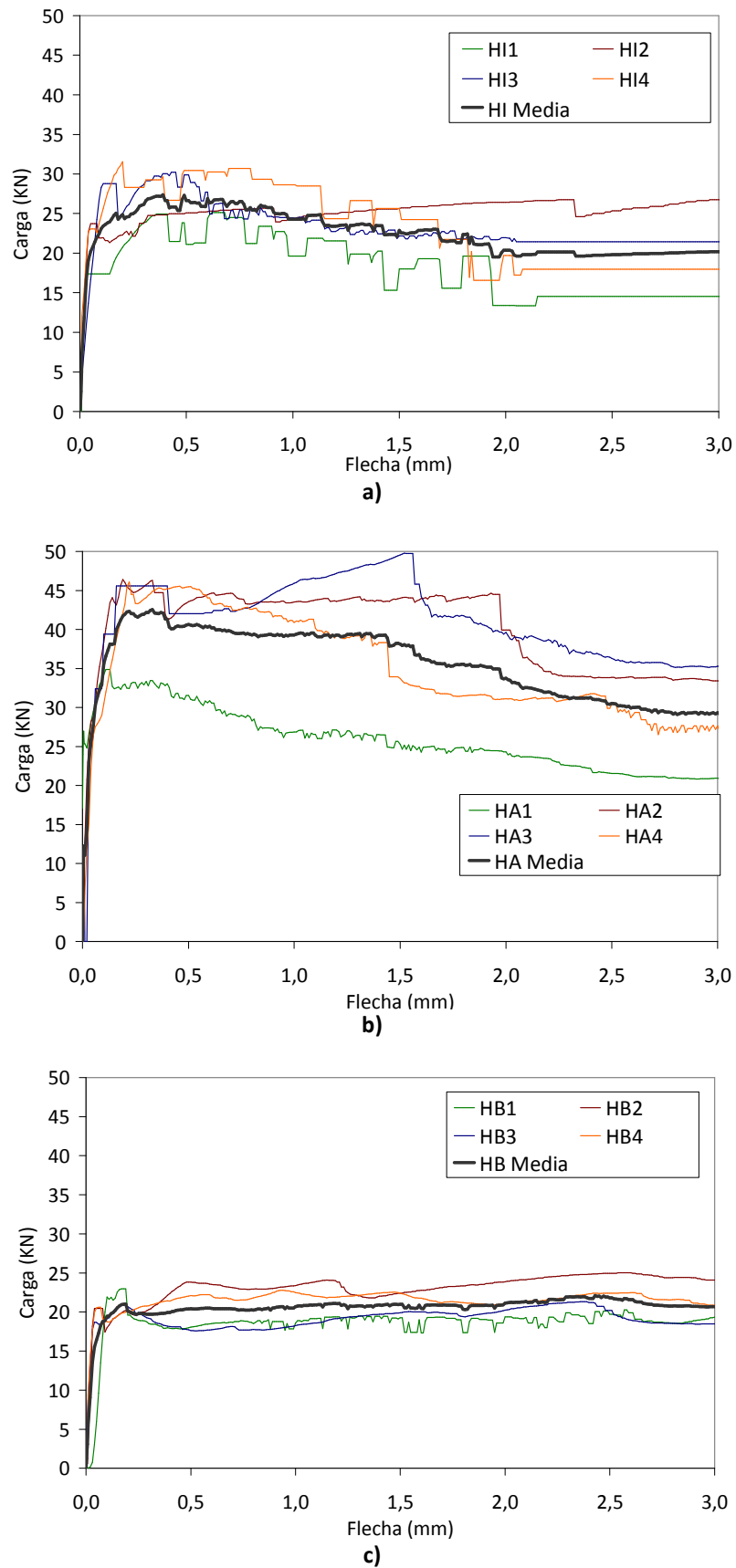
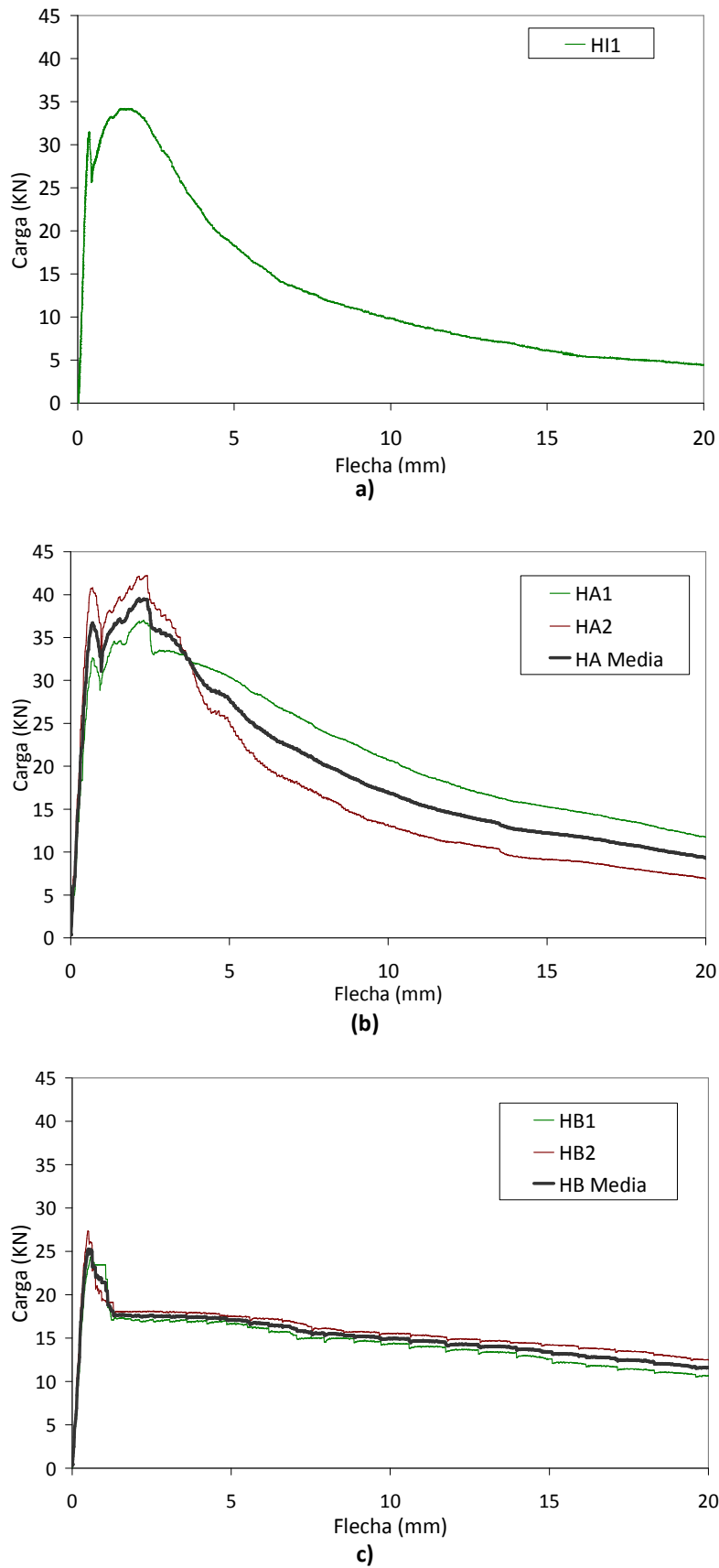


Figura A. 2. Curvas carga-flecha de las probetas de los hormigones: a) HI, b) HA y c) HB, ASTM1018.



**Figura A. 3.** Curvas carga-flecha de las probetas de los hormigones: a) HI, b) HA y c) HB, ASTM1550.

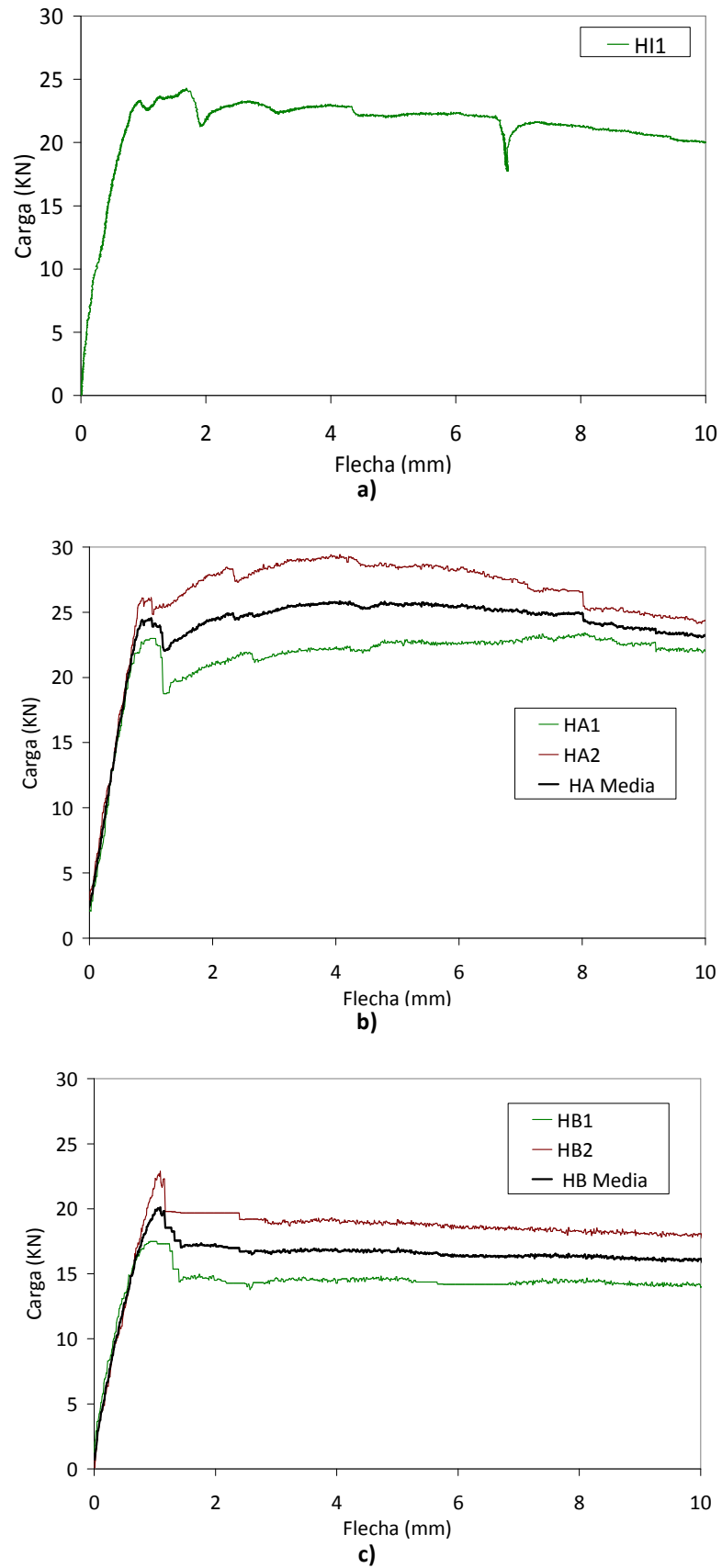
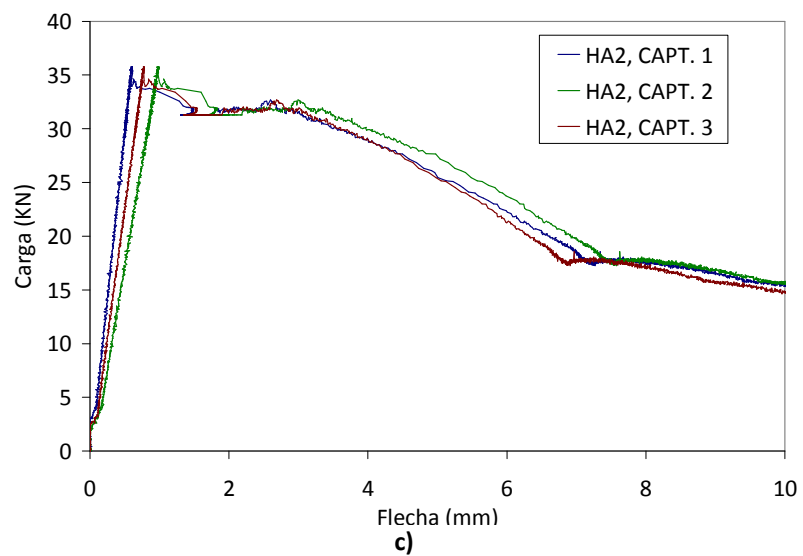
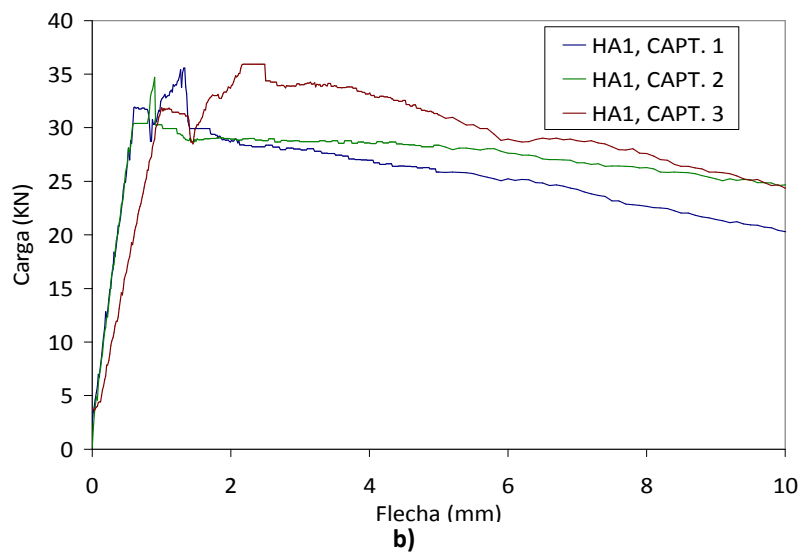
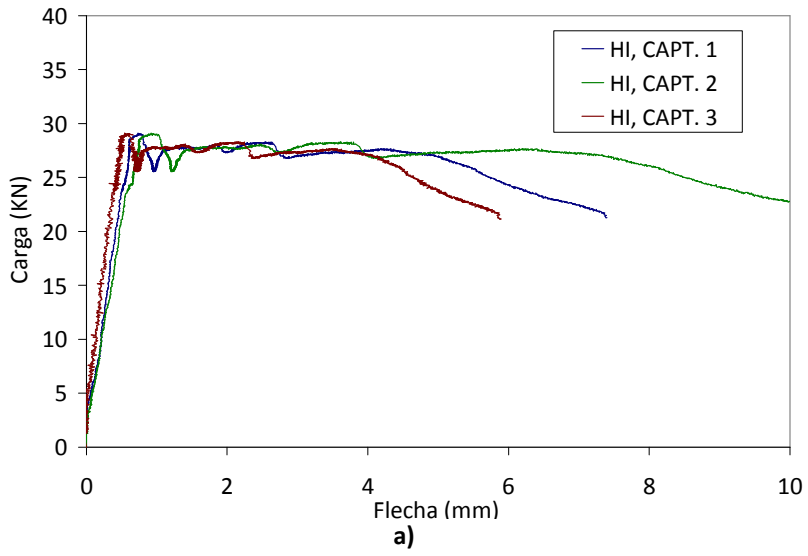
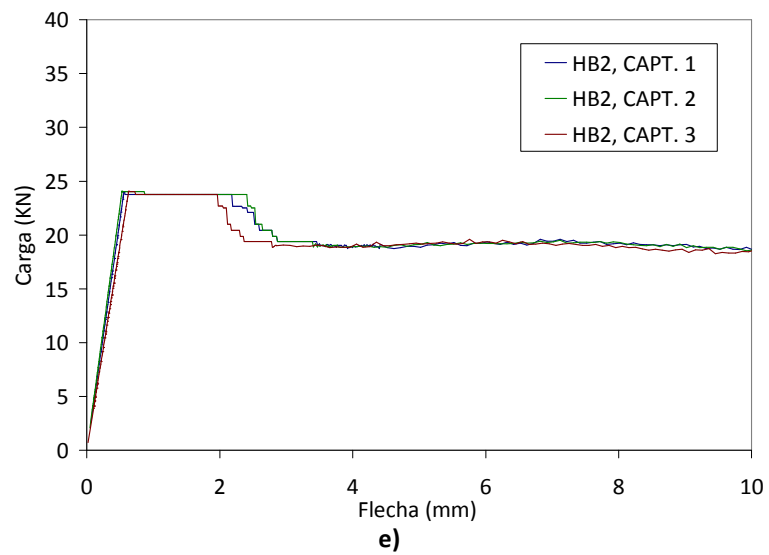
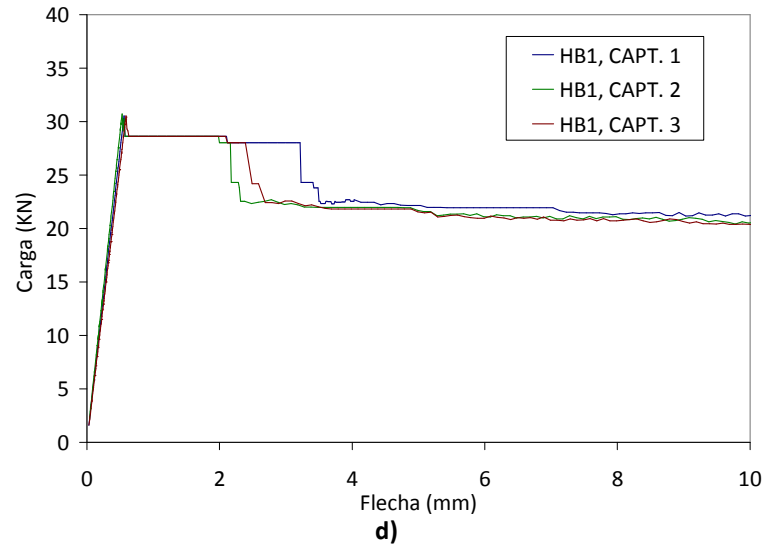


Figura A. 4. Curvas carga-flecha de las probetas de los hormigones: a) HI, b) HA y c) HB, Placa 1.





**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.





# **ANEJO B**

## **DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL COMPORTAMIENTO DEL HRFA**



## **ANEJO B**

# **DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL COMPORTAMIENTO DEL HRFA**

### **ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) CON STATGRAPHICS**

Se realizó un análisis estadístico para los cuatro elementos: EN14651, ASTM 1018, ASTM1550 y Placa 1. De las curvas carga-flecha obtenidas con las 16 pruebas propuestas en el análisis estadístico se obtienen los valores de energía y carga a primera fisura (PF) y cuando la flecha es 0,5mm, 1,0mm, 1,5mm, 2mm, 2,5mm, y 3,0mm. Para la Placa 1 los valores de flecha son 1, 2, 4, 6 y 8mm.

Las Tabla B. 1. , B. 2, B.3 y B.4 contienen la información necesaria para realizar el análisis estadístico. El propósito del análisis estadístico es determinar la influencia de los siguientes parámetros: Módulo de elasticidad del acero ( $E_s$ ), límite elástico del acero ( $f_s$ ), resistencia del hormigón a compresión biaxial superpuesta a estado de tensión hidrostático ( $f_1$ ), resistencia del hormigón a compresión uniaxial superpuesta a estado de tensión hidrostático ( $f_2$ ), resistencia a compresión biaxial ( $f_{cb}$ ) y coeficiente de transferencia de tensiones para fisuras abiertas ( $\beta_t$ ).

Como resultado gráfico para deducir las conclusiones acerca de qué parámetros son influyentes, se presentan los gráficos de intervalos LSD (*Least Significant Difference*). En ellos, se representa un segmento para cada nivel del parámetro seleccionado. Cuando los segmentos se solapan entre sí, la influencia del factor no es estadísticamente influyente mientras que si los segmentos no se solapan de forma clara representan una influencia estadísticamente significativa del parámetro.

**Tabla B. 1.** Valores de energía y carga obtenidos con las 16 pruebas realizadas, EN14651.

EN 14651																		
Prueba	Es	fs	fcb	betat	f1	f2	Carga PF	Energía PF	Carga 0,5mm	Energía 0,5mm	Carga 1,0mm	Energía 1,0mm	Carga 1,5mm	Energía 1,5mm	Carga 2,0mm	Energía 2,0mm	Carga 2,5mm	Energía 2,5mm
1	20000	30	43,71	0,1	43,71	43,71	22,498	3,809	24,726	9,515	-	-	-	-	-	-	-	-
2	20000	30	43,71	0,1	874,2	655,65	22,56	3,811	24,82	9,534	-	-	-	-	-	-	-	-
3	20000	30	131,13	0,9	43,71	43,71	19,245	1,688	23,543	8,831	18,483	20,659	17,122	30,774	16,59	47,768	17,732	65,132
4	20000	30	131,13	0,9	874,2	655,65	19,245	1,69	23,421	8,791	21,066	20,483	-	-	-	-	-	-
5	20000	3000	43,71	0,9	43,71	655,65	5,878	0,051	7,329	2,094	9,409	6,697	10,956	11,795	-	-	-	-
6	20000	3000	43,71	0,9	874,2	43,71	5,878	0,051	7,625	2,115	11,959	7,077	11,772	12,63	-	-	-	-
7	20000	3000	131,13	0,1	43,71	655,65	No converge											
8	20000	3000	131,13	0,1	874,2	43,71	5,878	0,051	6,55	1,778	11,785	6,476	9,563	11,64	10,903	21,588	-	-
9	2000000	3000	43,71	0,1	43,71	43,71	25,399	8,222	25,239	10,482	-	-	-	-	-	-	-	-
10	2000000	3000	43,71	0,1	874,2	655,65	No converge											
11	2000000	3000	131,13	0,9	43,71	43,71	23,508	3,86	24,358	10,419	24,142	22,724	25,145	35,104	22,33	56,824	10,772	79,018
12	2000000	3000	131,13	0,9	874,2	655,65	23,492	3,575	24,475	10,133	22,262	22,899	-	-	-	-	-	-
13	2000000	30	43,71	0,9	43,71	655,65	32,036	7,948	34,456	14,789	-	-	-	-	-	-	-	-
14	2000000	30	43,71	0,9	874,2	43,71	No converge											
15	2000000	30	131,13	0,1	43,71	655,65	No converge											
16	2000000	30	131,13	0,1	874,2	43,71	No converge											

## EN14651

## Energía

## Parámetro Es

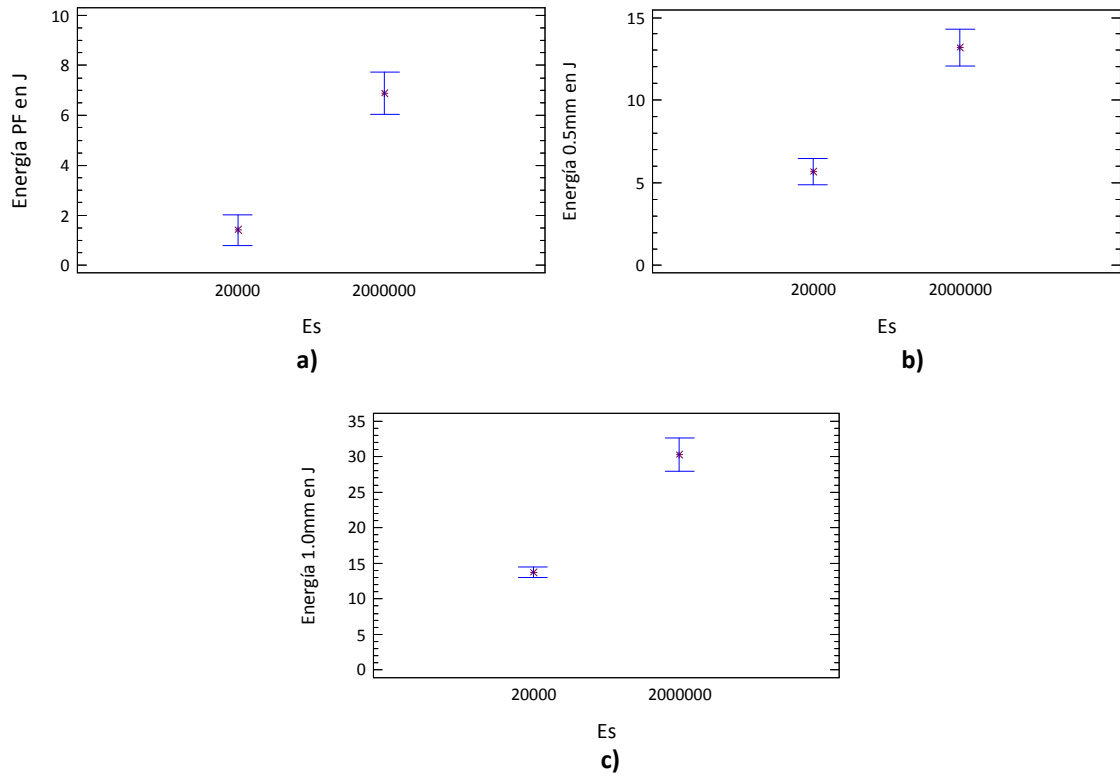
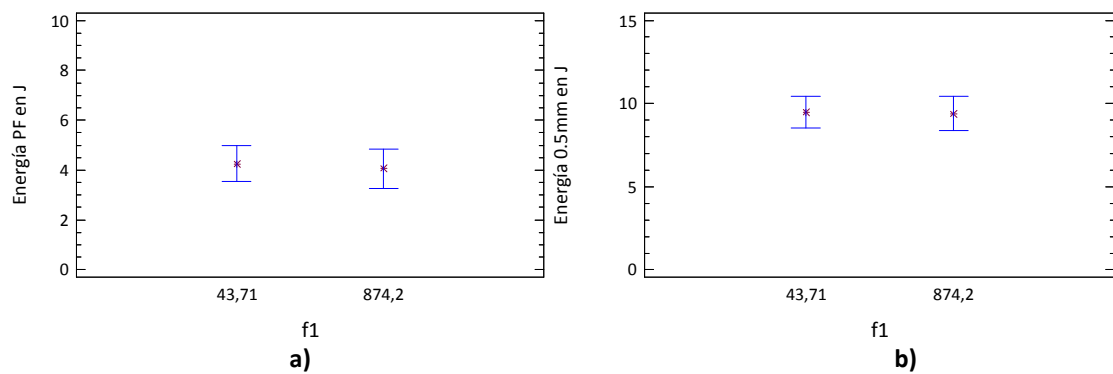
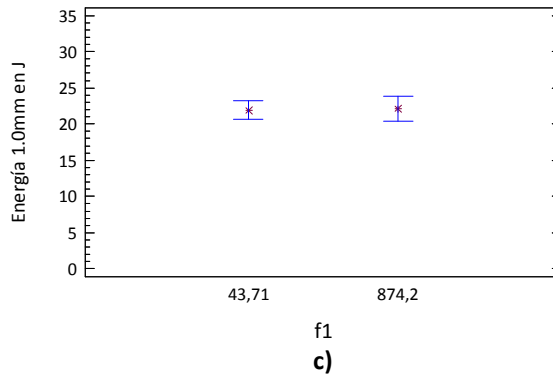


Figura B. 1. Valores de energía a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro Es, EN14651.

## Energía

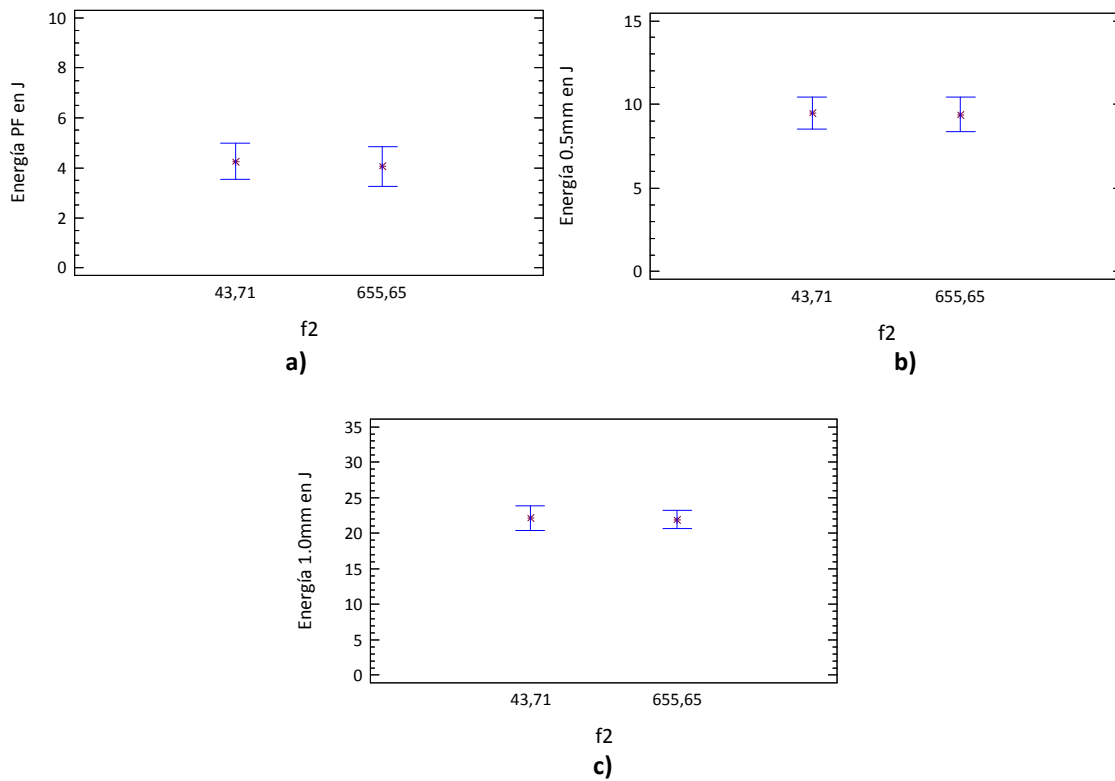
## Parámetro f1





**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.

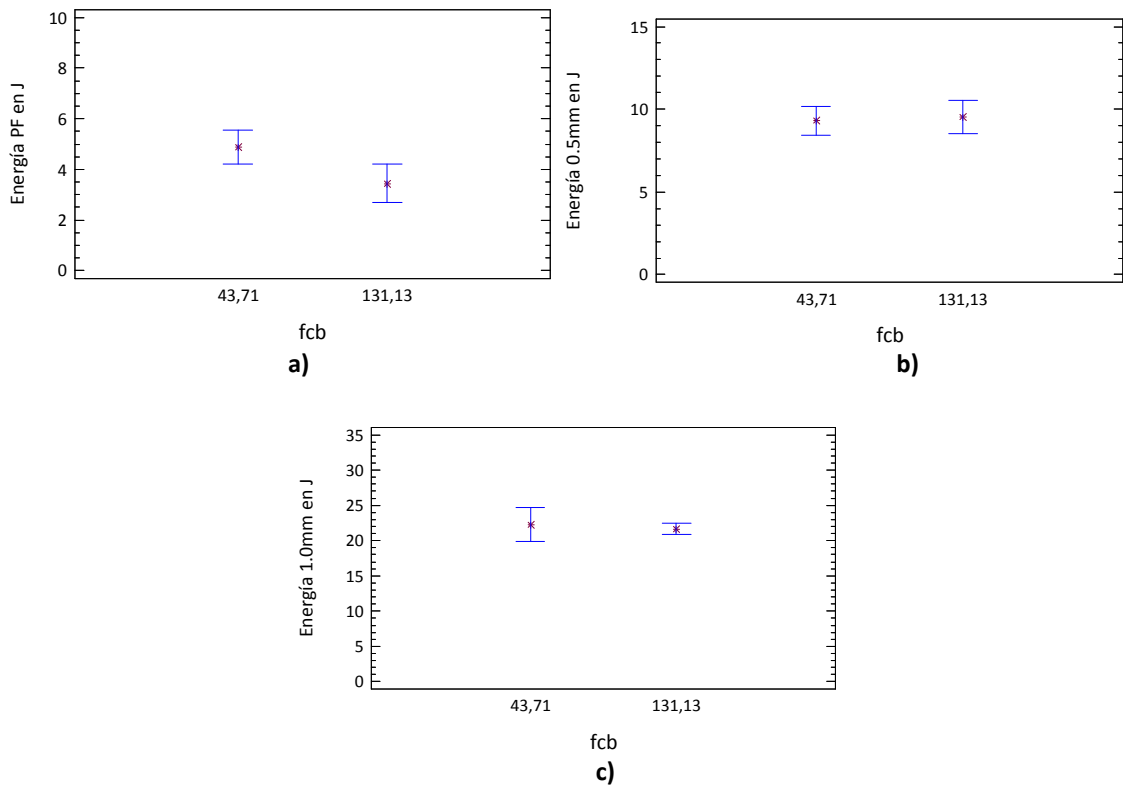
*Energía*  
Parámetro f2



**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.

### Energía

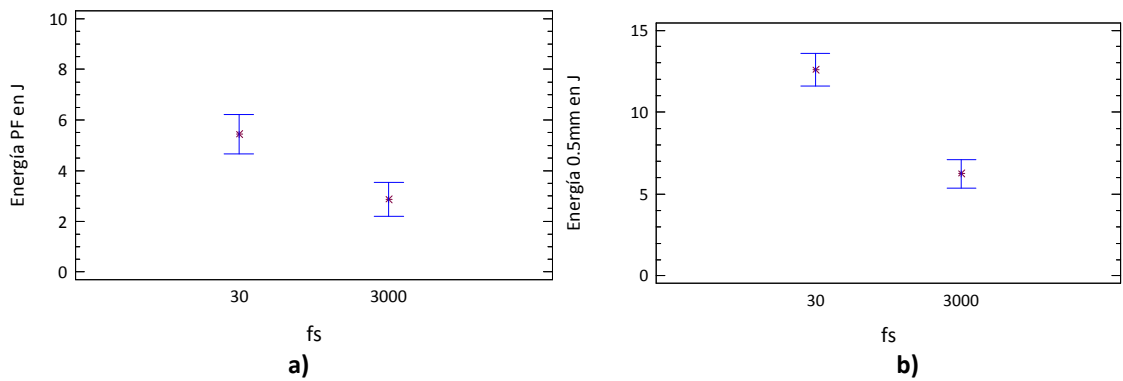
Parámetro fcb

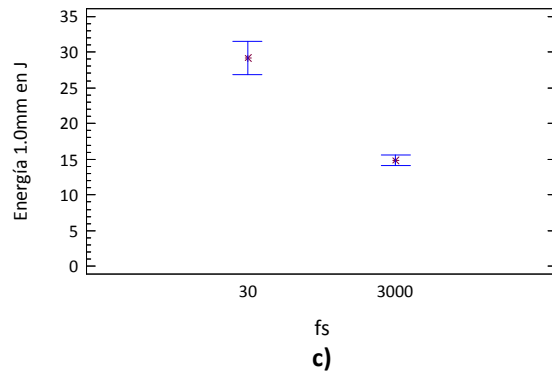


**Figura B. 4.** Valores de energía a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro fcb, EN14651.

### Energía

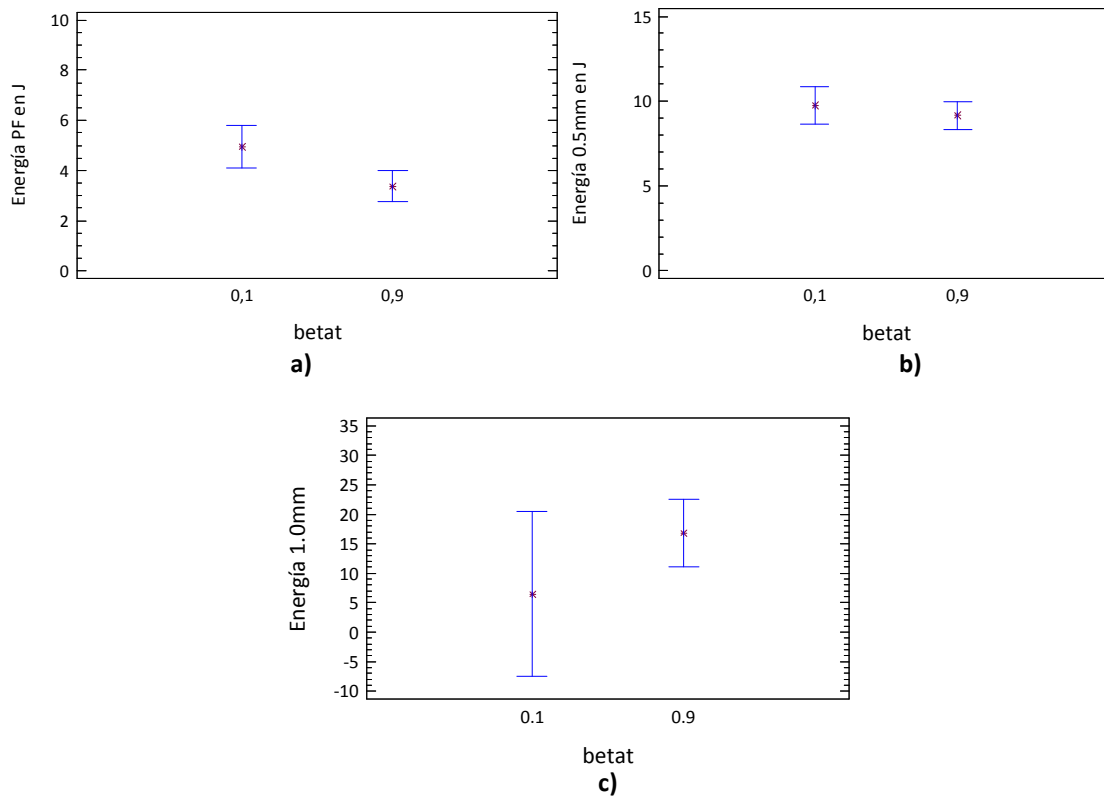
Parámetro fs





**Figura B. 5.** Valores de energía a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro fs, EN14651.

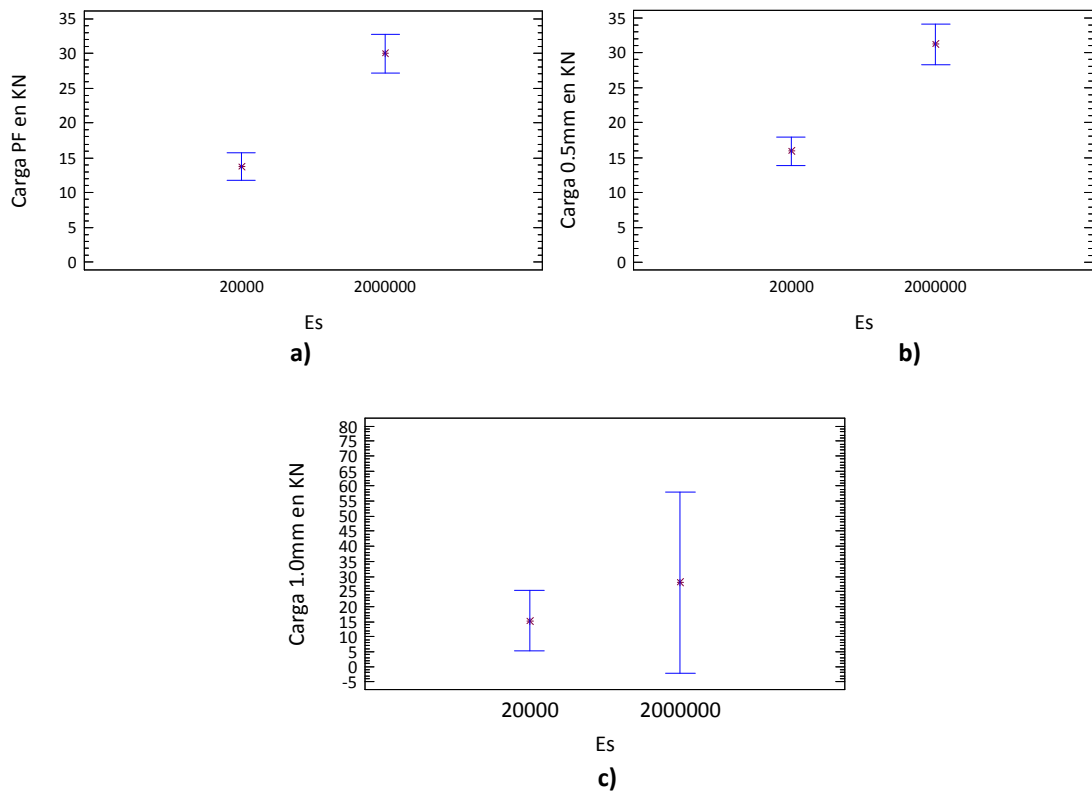
*Energía*  
Parámetro  $\beta_t$



**Figura B. 6.** Valores de energía a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro Bt, EN14651.

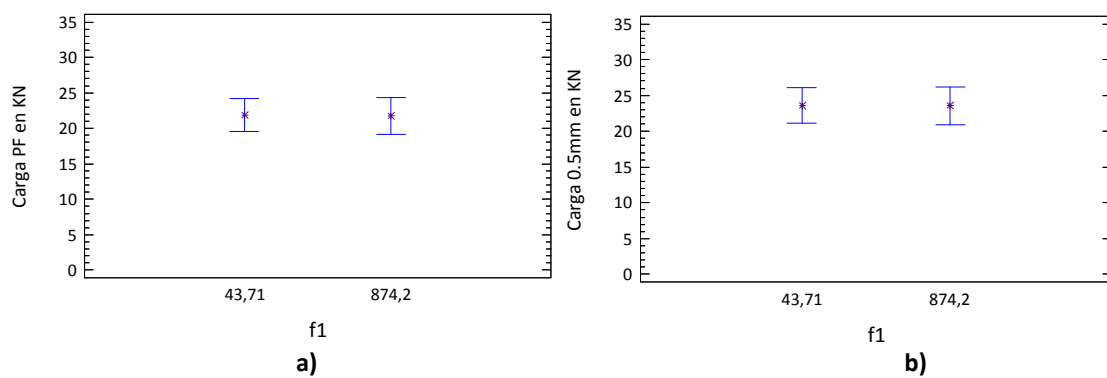


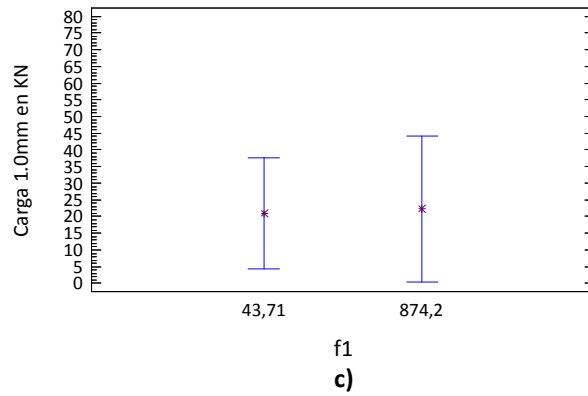
**Carga**  
Parámetro Es



**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.

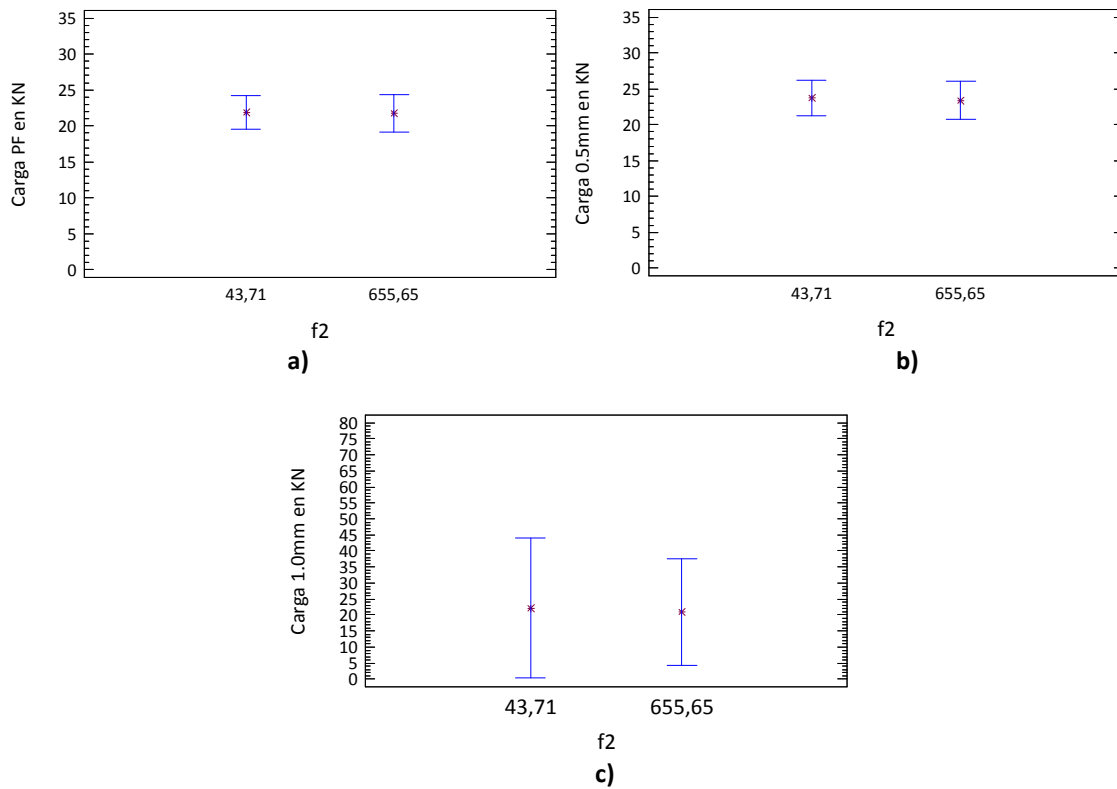
**Carga**  
Parámetro f1





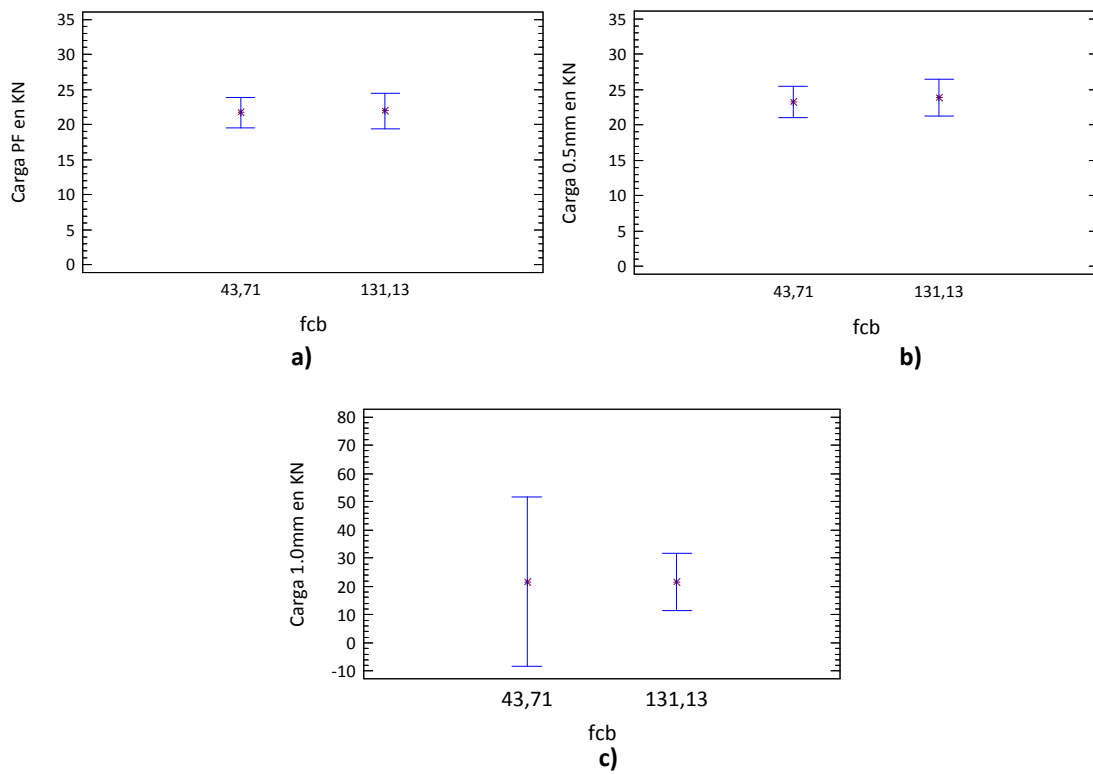
**Figura B. 8.** Valores de carga a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro f1, EN14651.

**Carga**  
**Parámetro f2**



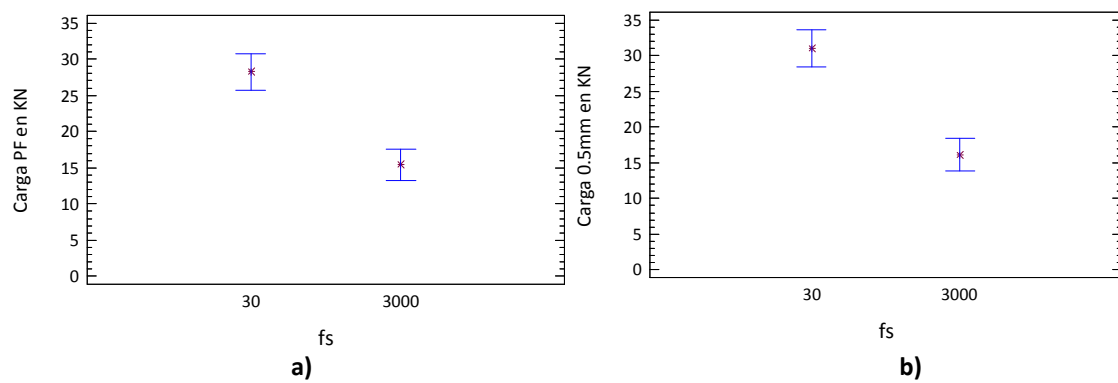
**Figura B. 9.** Valores de carga a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro f2, EN14651.

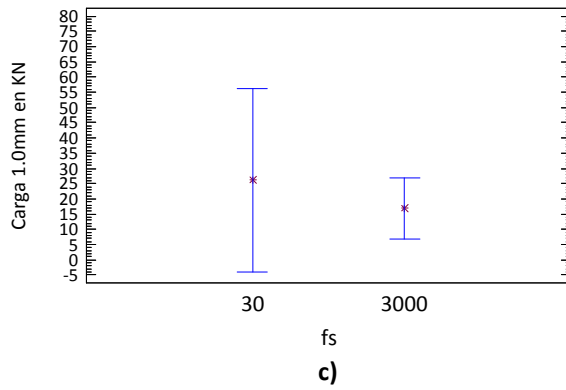
*Carga*  
Parámetro fcb



**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.

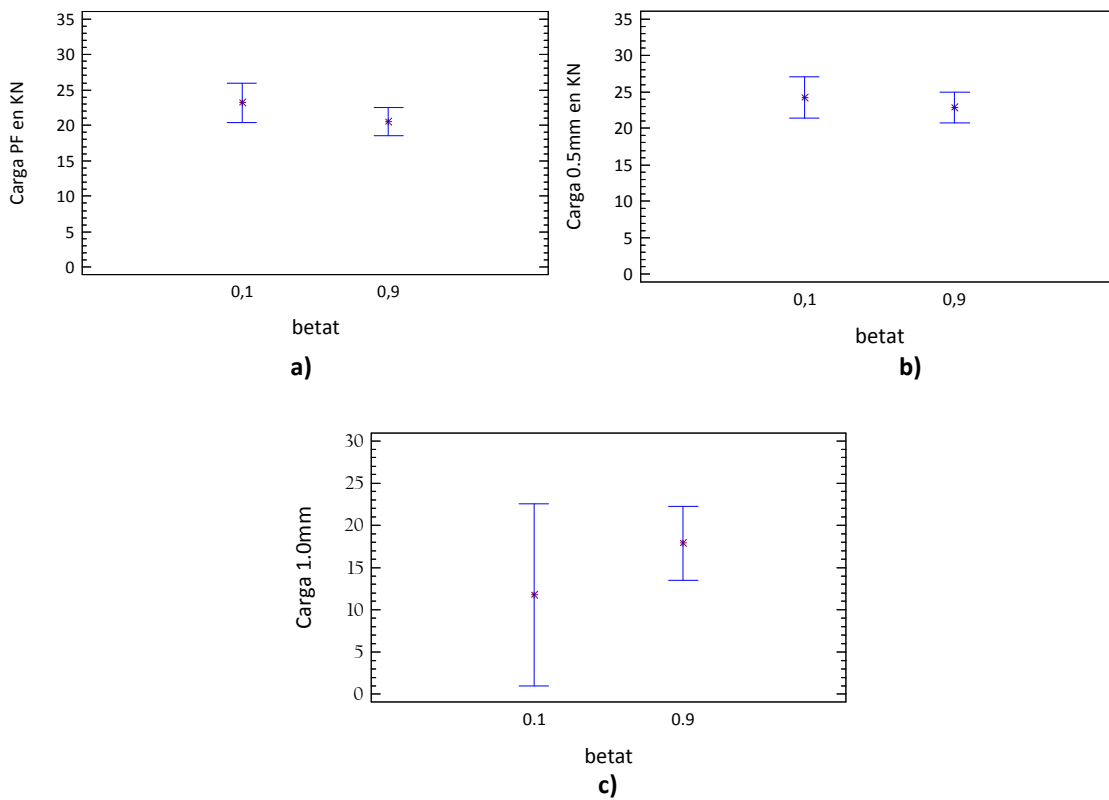
*Carga*  
Parámetro fs





**Figura B. 11.** Valores de carga a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro  $f_s$ , EN14651.

Carga  
Parámetro  $\beta_t$



**Figura B. 12.** Valores de carga a: a) PF, y niveles de flechas de b) 0,5mm y c) 1,0mm, para el parámetro  $B_t$ , EN14651.

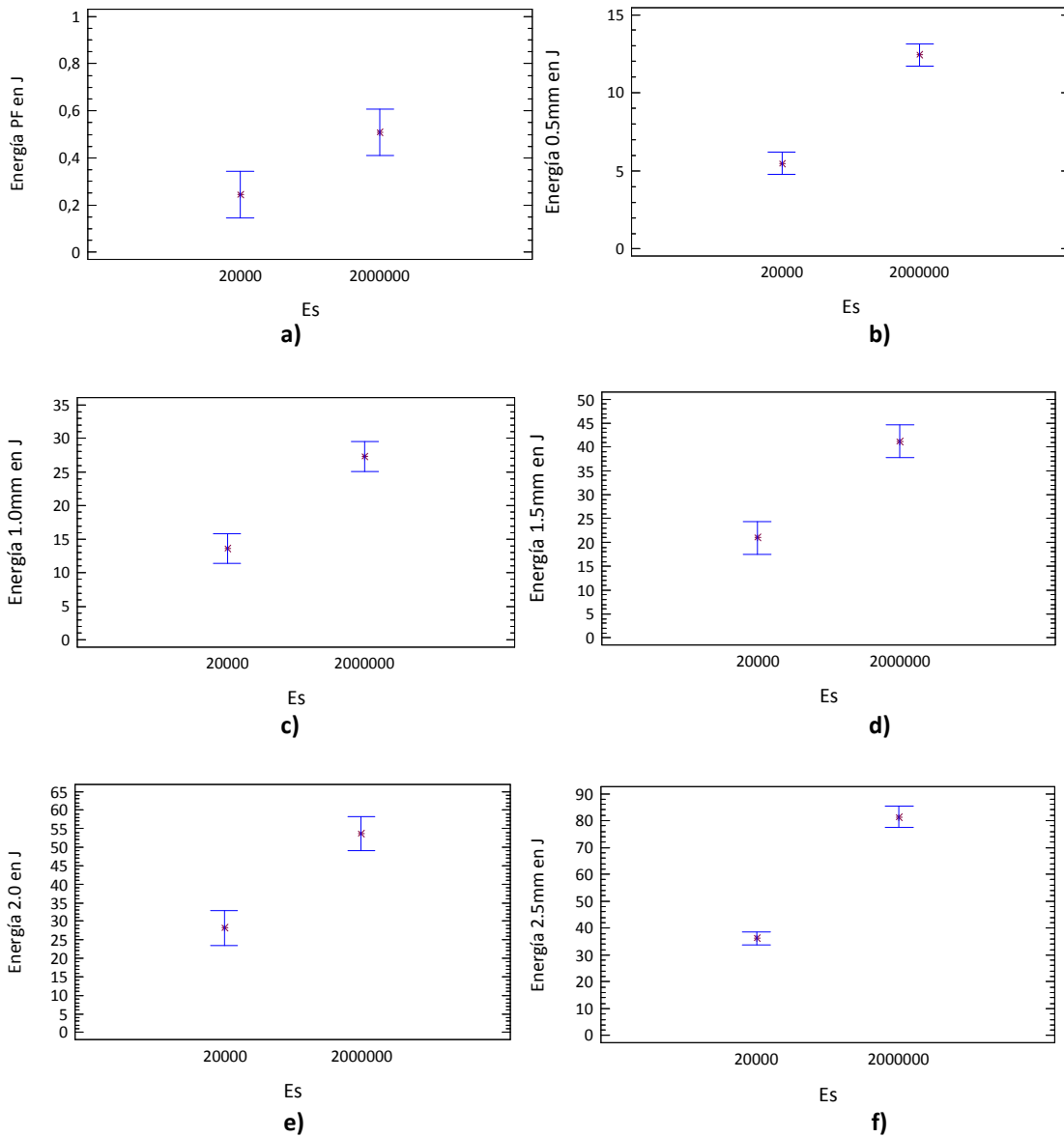
**Tabla B. 2.** Valores de energía y carga obtenidos con las 16 pruebas realizadas, ASTM1018.

ASTM1018																		
Prueba	Es	fs	fcB	betat	f1	f2	Carga PF	Energía PF	Carga 0,5mm	Energía 0,5mm	Carga 1,0mm	Energía 1,0mm	Carga 1,5mm	Energía 1,5mm	Carga 2,0mm	Energía 2,0mm	Carga 2,5mm	Energía 2,5mm
1	20000	30	43,71	0,1	43,71	43,71	12,43	0,25	24,63	9,18	22,06	21,7	18,14	32,37	22,5	42,45	-	-
2	20000	30	43,71	0,1	874,2	655,65	11,9	0,22	28,55	9,63	26,44	21,98	18,56	35,51	16,36	41,63	19,92	50,92
3	20000	30	131,13	0,9	43,71	43,71	12,43	0,25	25	9,14	28,74	22,7	21,96	31,18	27,87	48,27	28,74	60,56
4	20000	30	131,13	0,9	874,2	655,65	12,43	0,25	24,45	9,08	27,98	22,56	19,19	34,28	19,06	43,41	17,59	53,78
5	20000	3000	43,71	0,9	43,71	655,65	14,42	0,24	5,28	1,95	7,5	5,77	7,13	9,22	4,14	11,11	5,22	13,44
6	20000	3000	43,71	0,9	874,2	43,71	14,65	0,25	4,59	1,64	6,97	4,64	8,05	8,56	9,04	13	9,83	14,54
7	20000	3000	131,13	0,1	43,71	655,65	14,84	0,26	4,59	1,65	6,95	4,67	8,37	8,58	10,05	12,99	9,74	17,7
8	20000	3000	131,13	0,1	874,2	43,71	14,65	0,25	4,61	1,64	7,32	4,64	8,28	8,36	8,74	12,53	9,62	17,08
9	2000000	3000	43,71	0,1	43,71	43,71	16,01	0,28	20,97	10,72	28,26	24,1	23,37	38,06	25,67	50,58	26,39	63,62
10	2000000	3000	43,71	0,1	874,2	655,65	15,33	0,26	26,53	10,51	28,7	24,36	24,67	37,56	12,28	49,92	20,8	58,93
11	2000000	3000	131,13	0,9	43,71	43,71	15,09	0,25	26,27	10,47	30,08	24,77	24,09	38,08	30,08	52,95	33,14	68,75
12	2000000	3000	131,13	0,9	874,2	655,65	15,09	0,25	26,73	10,41	29,94	24,62	15,55	36,98	12,63	43,81	21,95	52,63
13	2000000	30	43,71	0,9	43,71	655,65	26,4	0,8	33,3	14,82	21,67	30,74	24,54	42,95	21,17	53,03	-	-
14	2000000	30	43,71	0,9	874,2	43,71	25,93	0,7	30,8	14,46	29,47	29,77	31,3	44,9	24,96	58,32	-	-
15	2000000	30	131,13	0,1	43,71	655,65	26,32	0,7	30,75	13,85	32,63	29,95	34,29	46,69	33,42	63,45	-	-
16	2000000	30	131,13	0,1	874,2	43,71	25,66	0,84	30,64	14,16	27,66	29,73	28,96	43,95	25,66	57,46	-	-

**ASTM 1018**

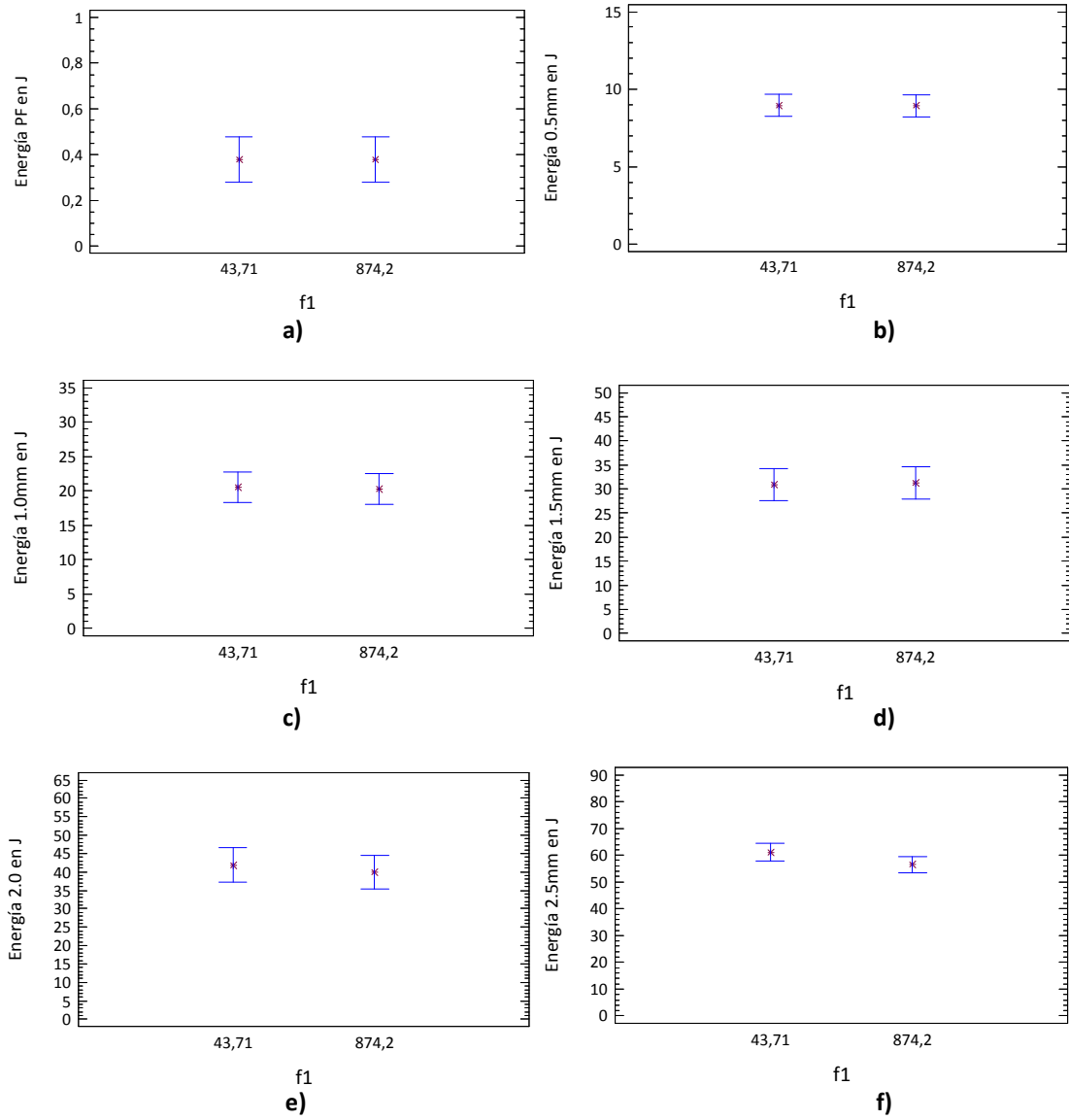
*Energía*

Parámetro Es



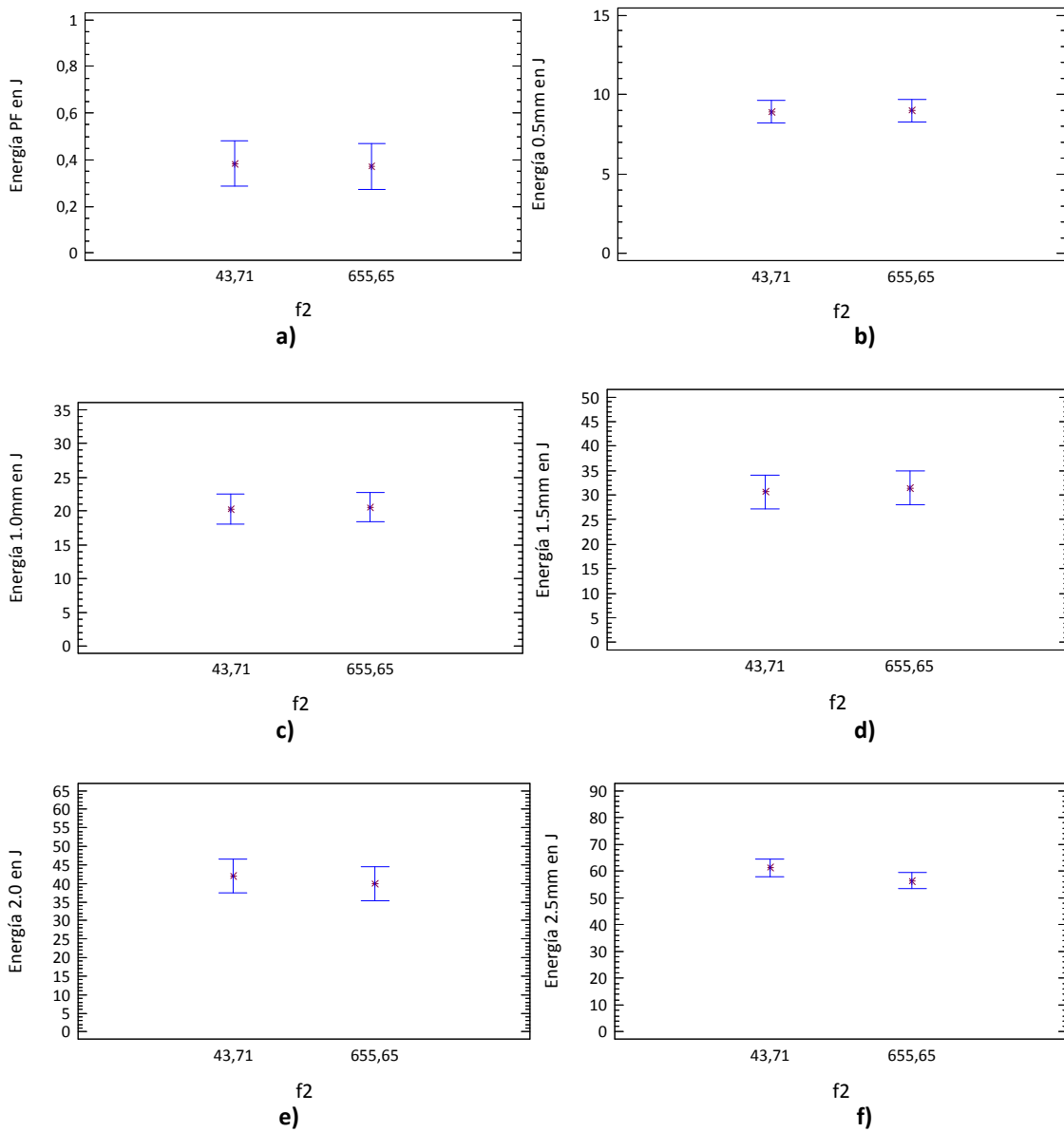
**Figura B. 13.** Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro Es, ASTM1018.

*Energía*  
Parámetro f1



**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.

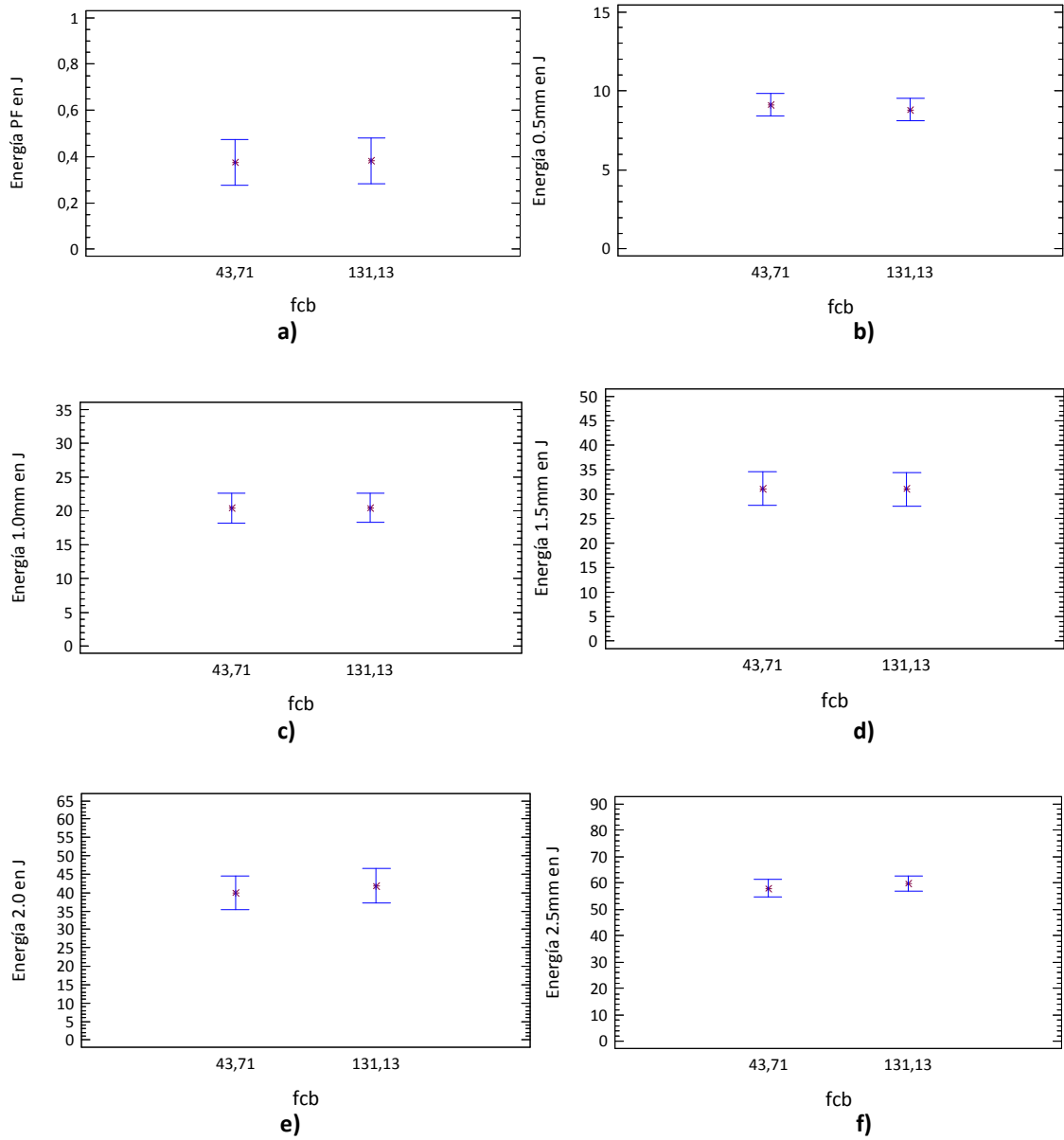
**Energía**  
**Parámetro f2**



**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.

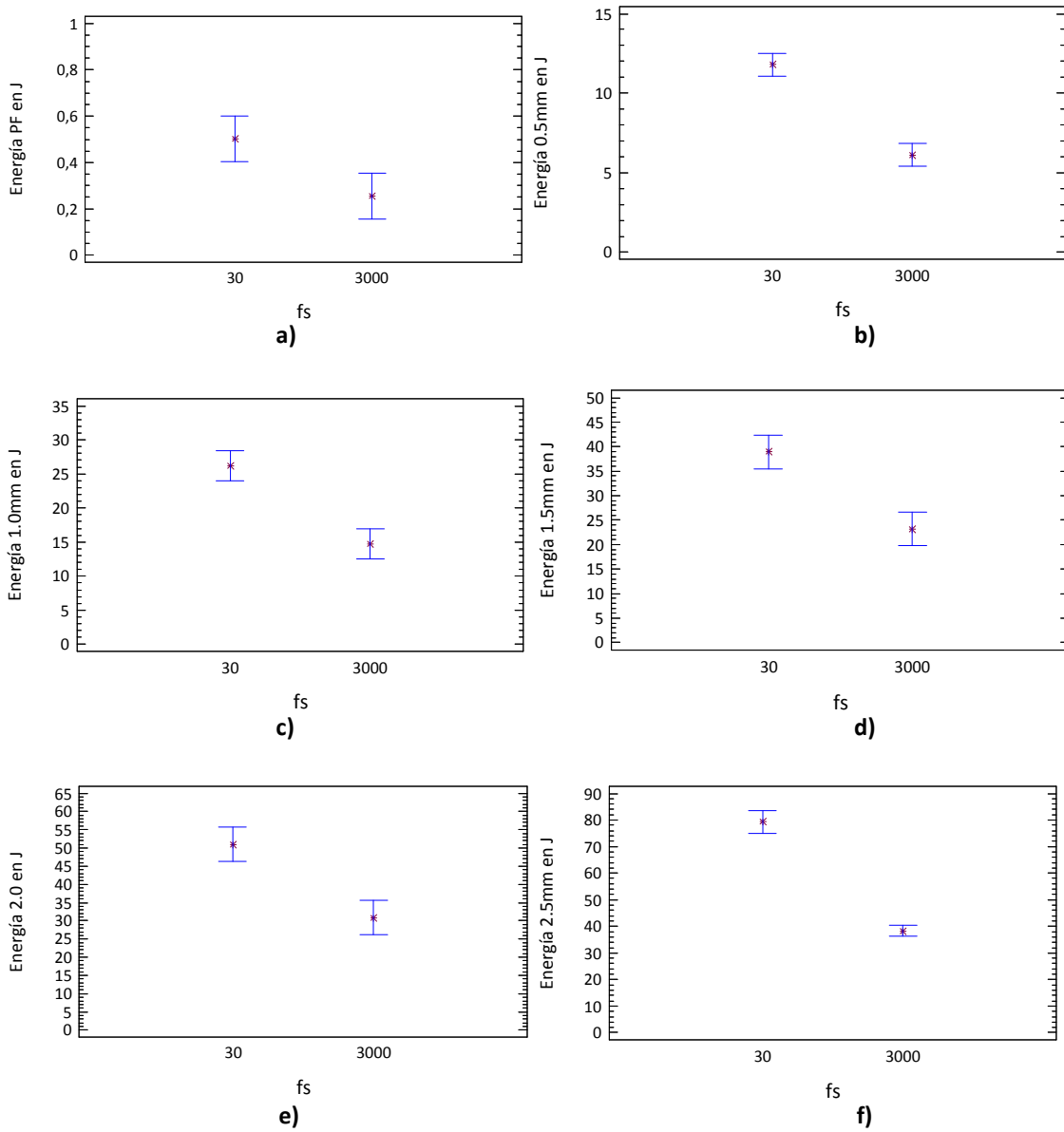


*Energía*  
Parámetro fcb



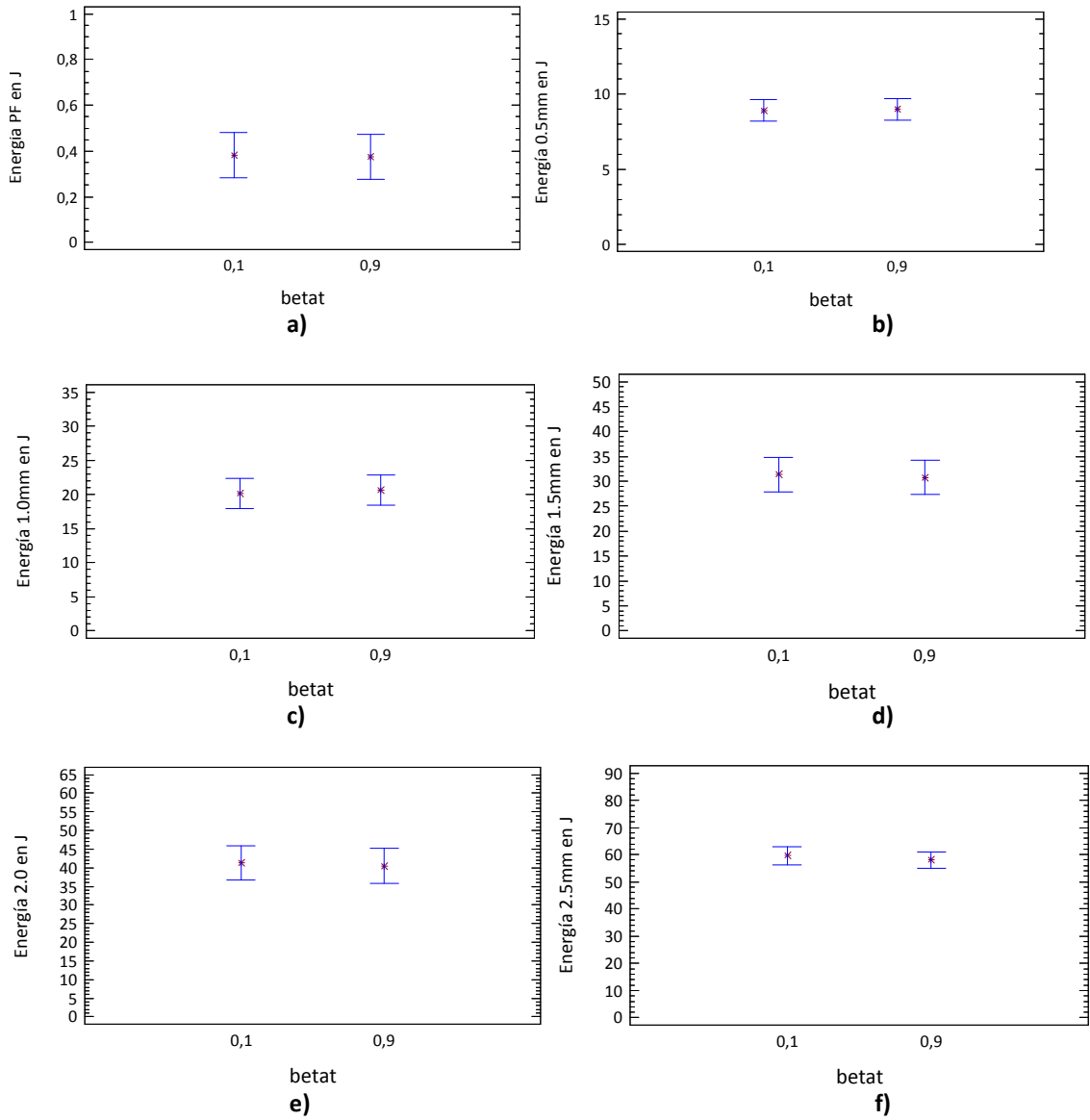
**Figura B. 16.** Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro fcb, ASTM1018.

**Energía**  
**Parámetro fs**



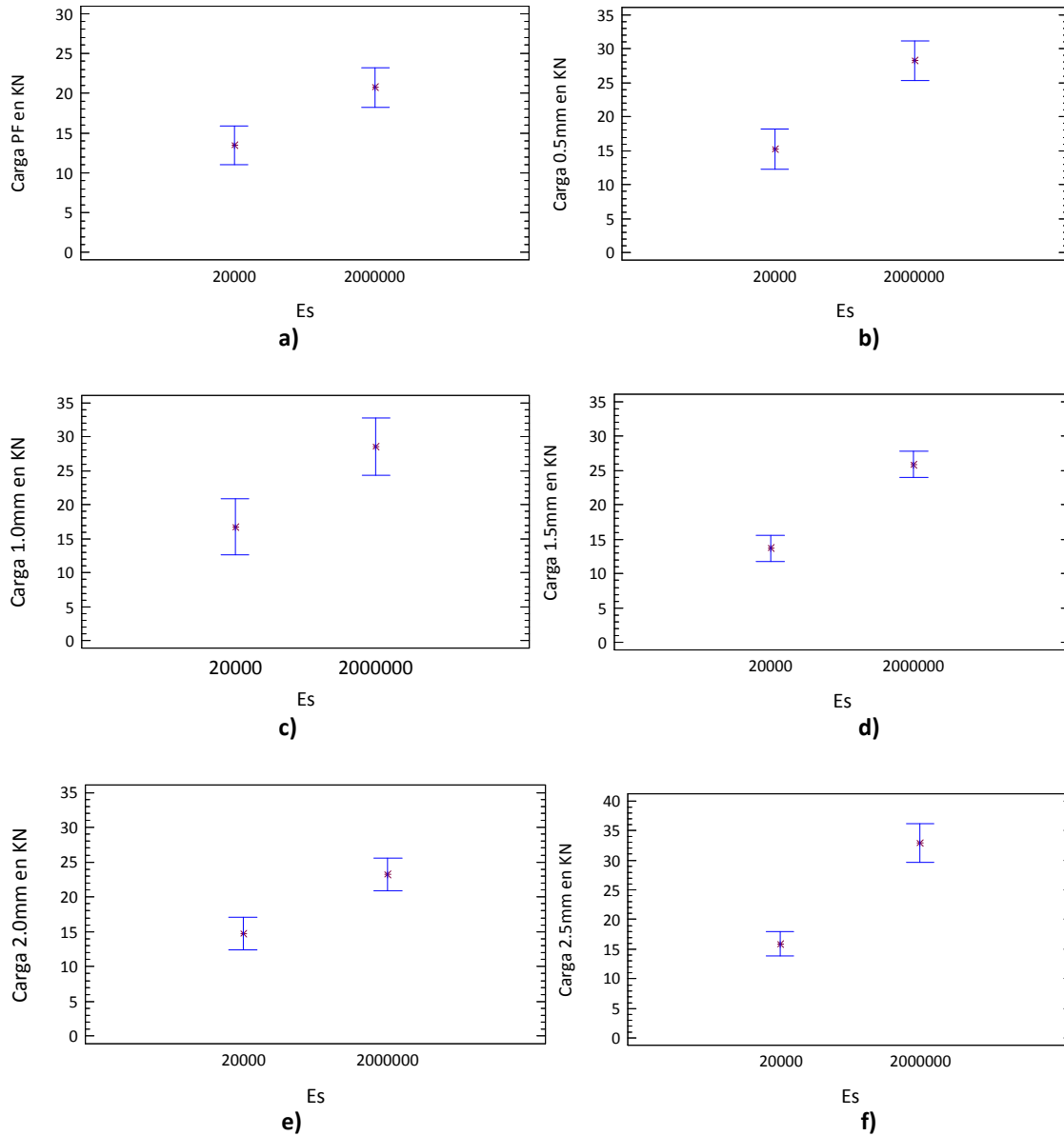
**Figura B. 17.** Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro fs, ASTM1018.

*Energía*  
Parámetro  $\beta_t$



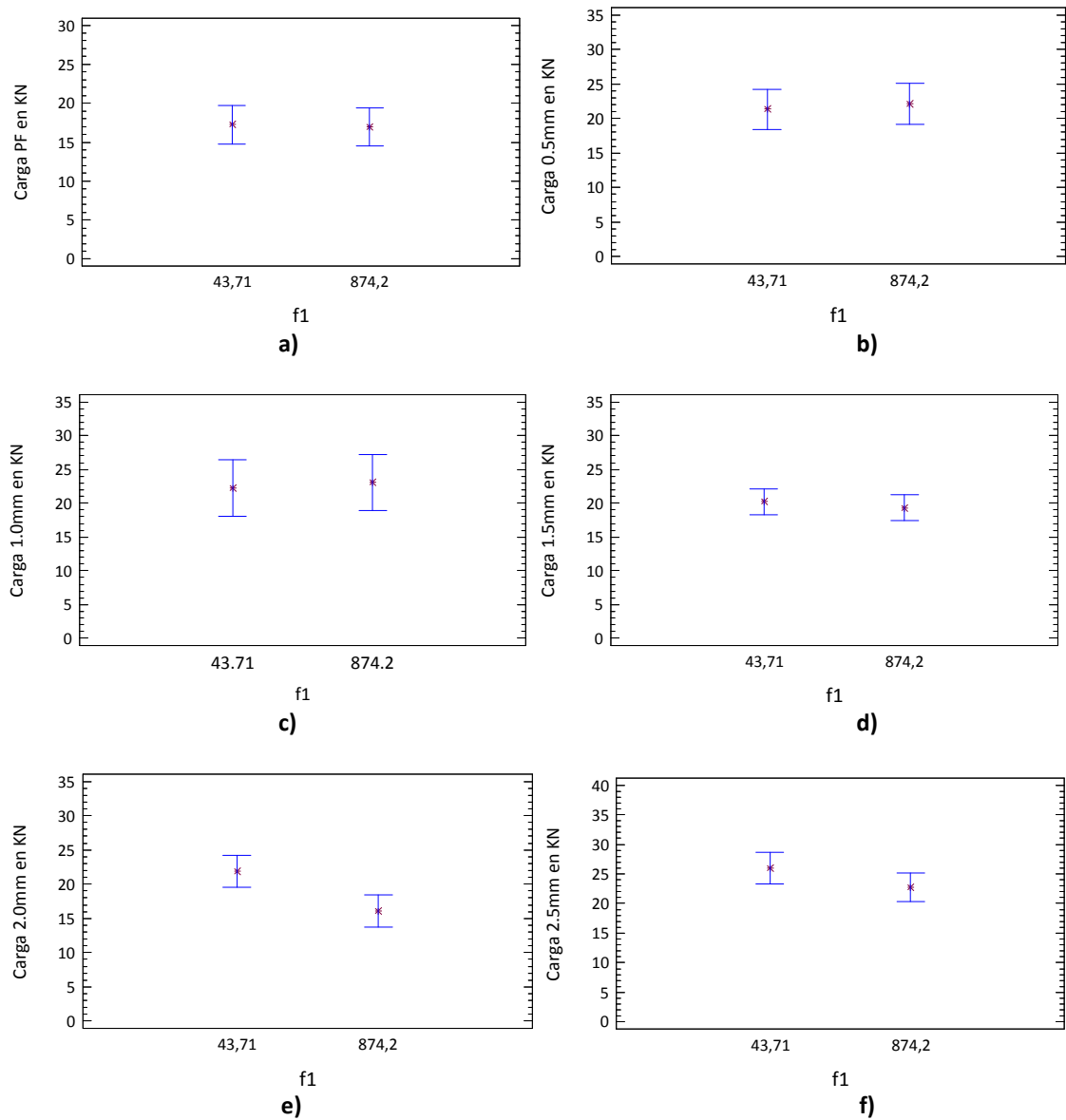
**Figura B. 18.** Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro  $B_t$ , ASTM1018.

**Carga**  
**Parámetro Es**



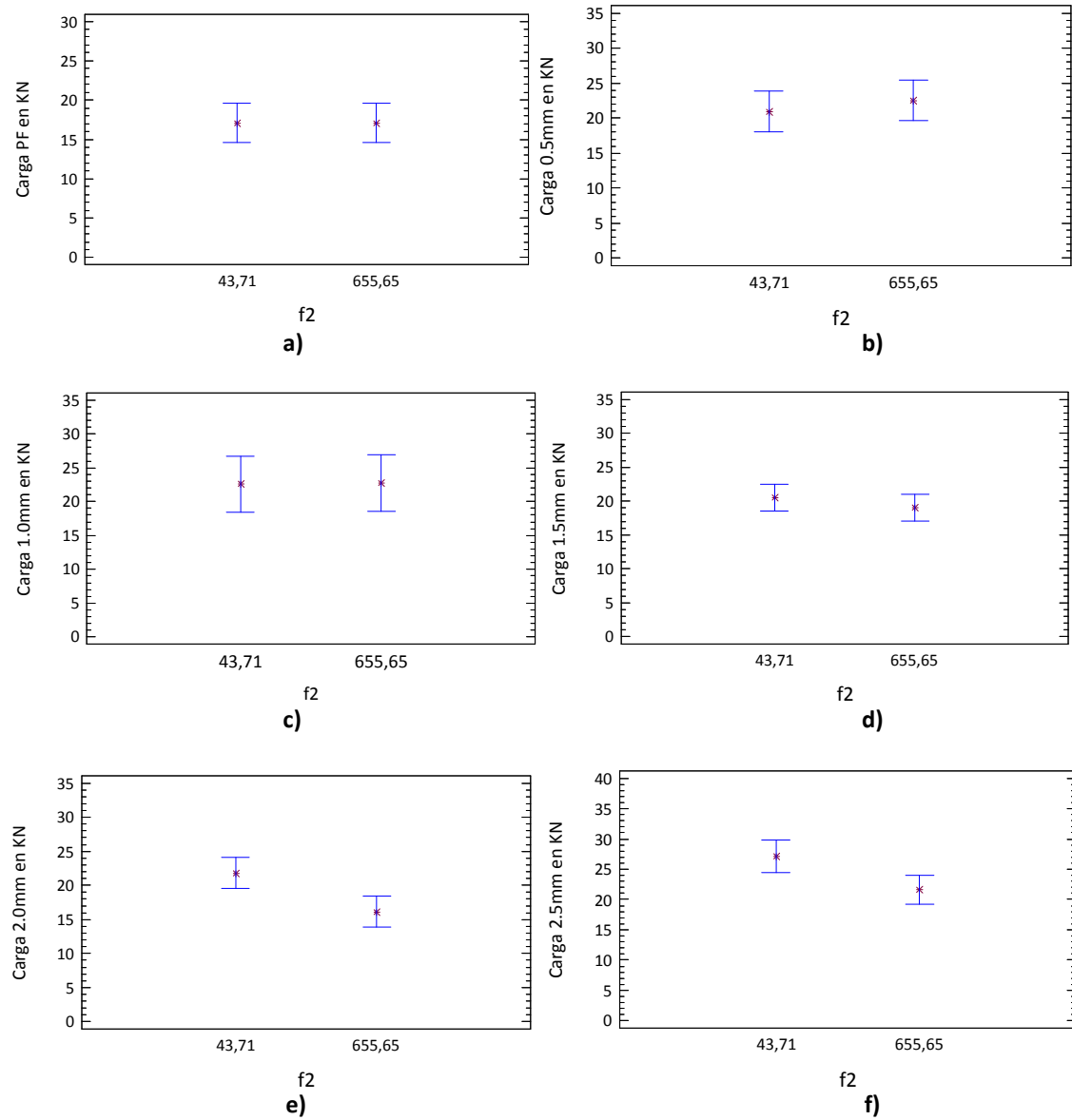
**Figura B. 19.** Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro Es, ASTM1018.

*Carga*  
Parámetro f1



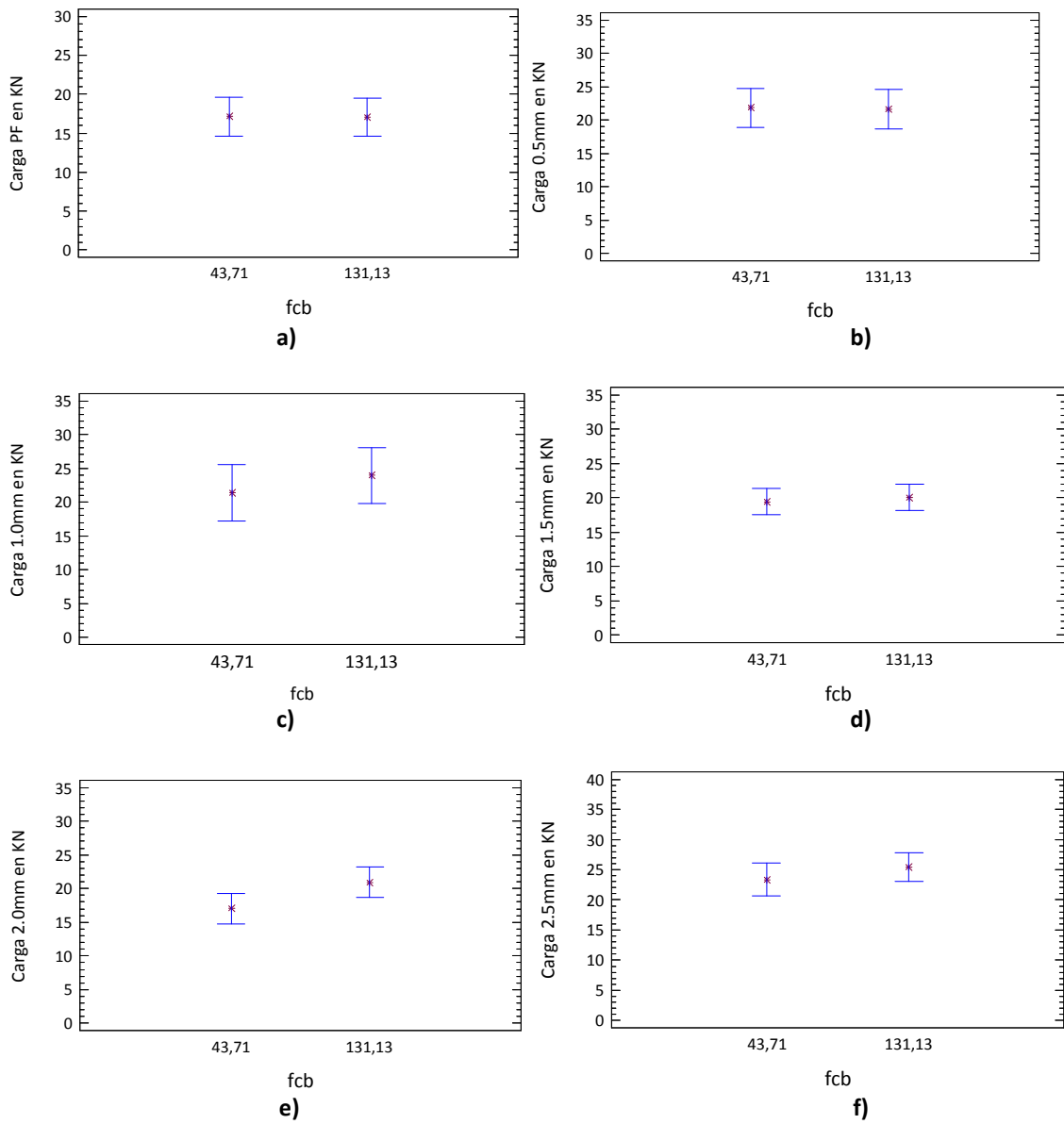
**Figura B. 20.** Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro f1, ASTM1018.

**Carga**  
**Parámetro f2**



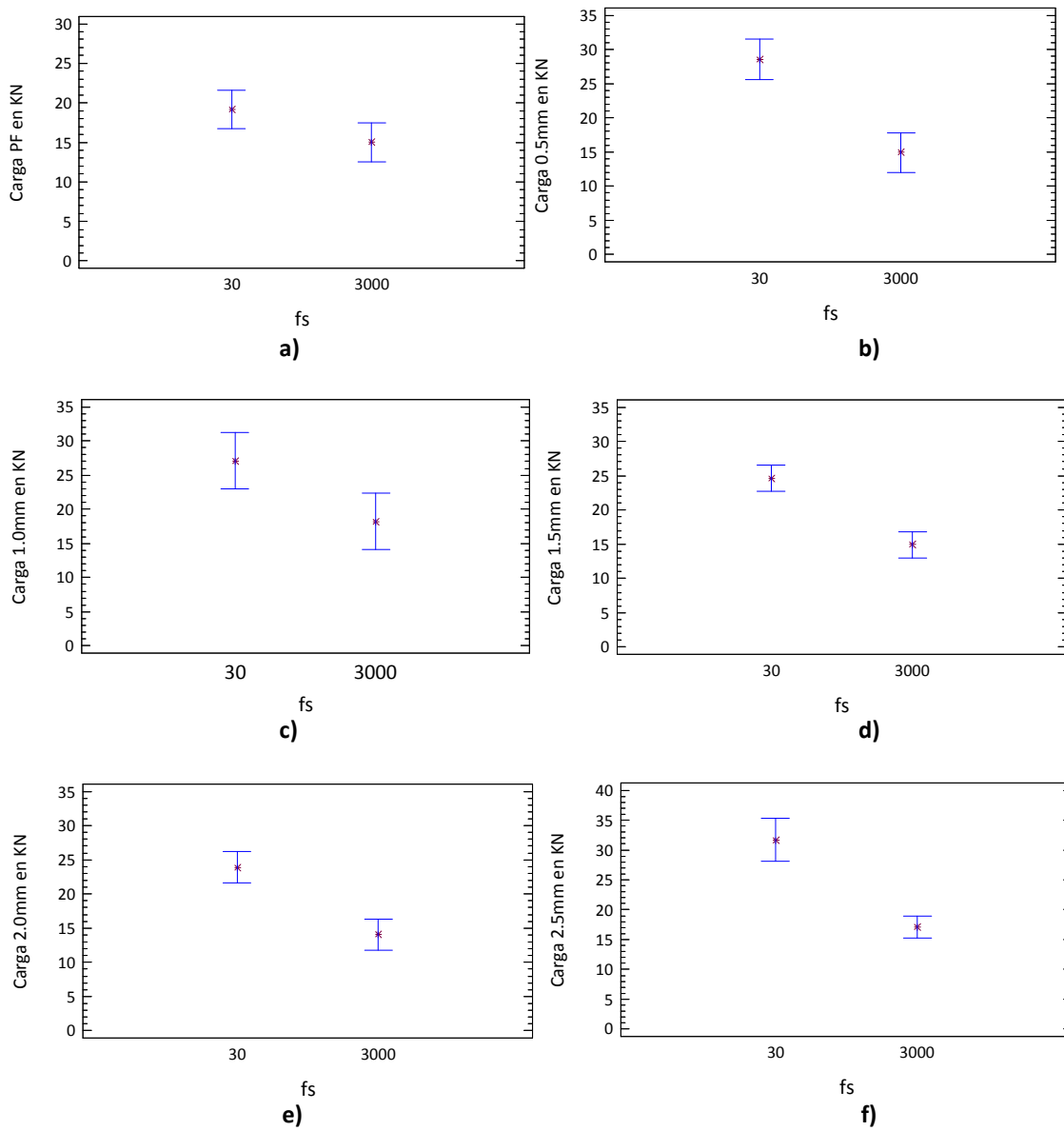
**Figura B. 21.** Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm,c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro f2, ASTM1018.

*Carga*  
Parámetro fcb



**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.

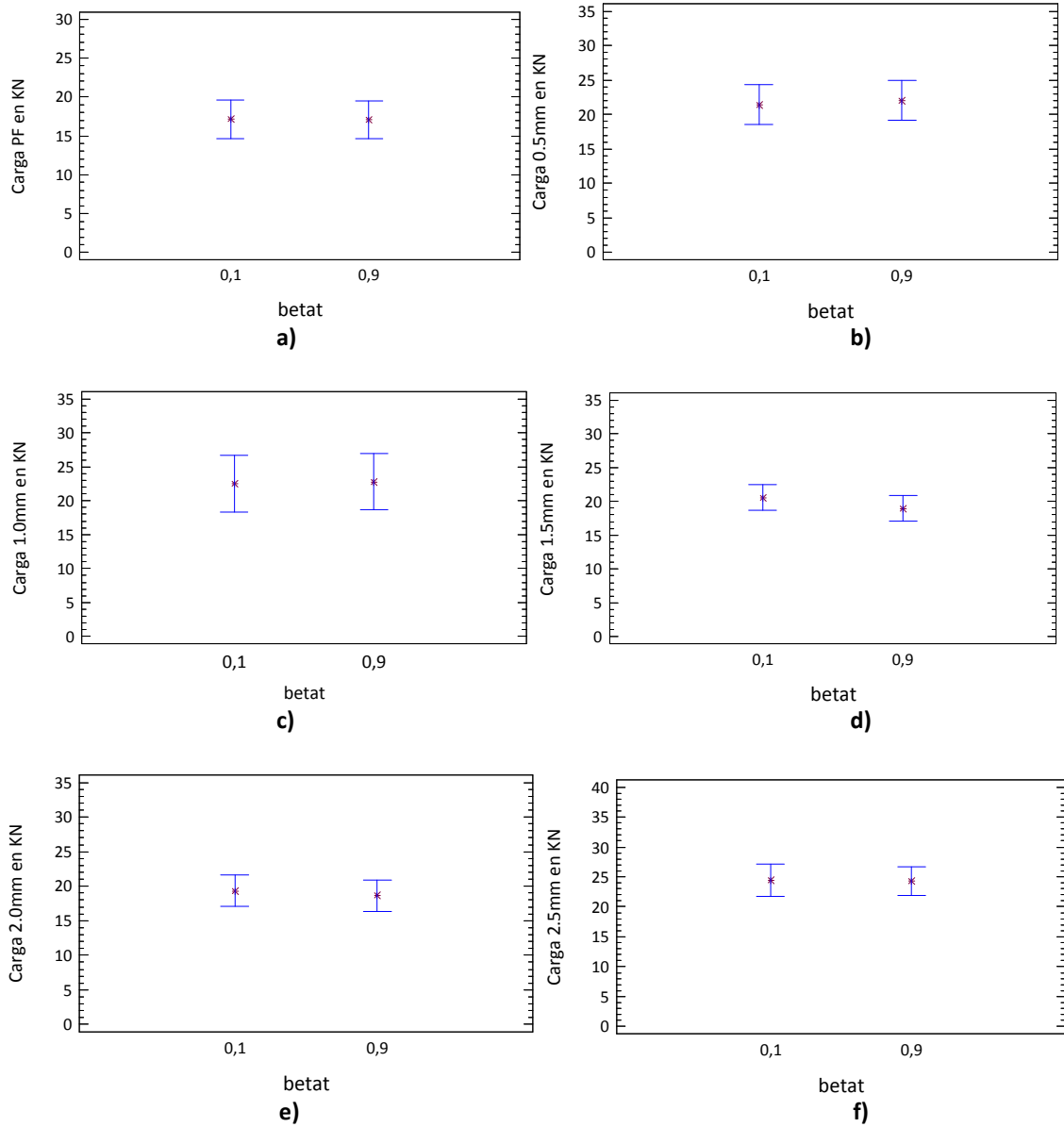
**Carga**  
**Parámetro fs**



**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  $f_s$ , ASTM1018.



Carga  
Parámetro  $\beta_t$

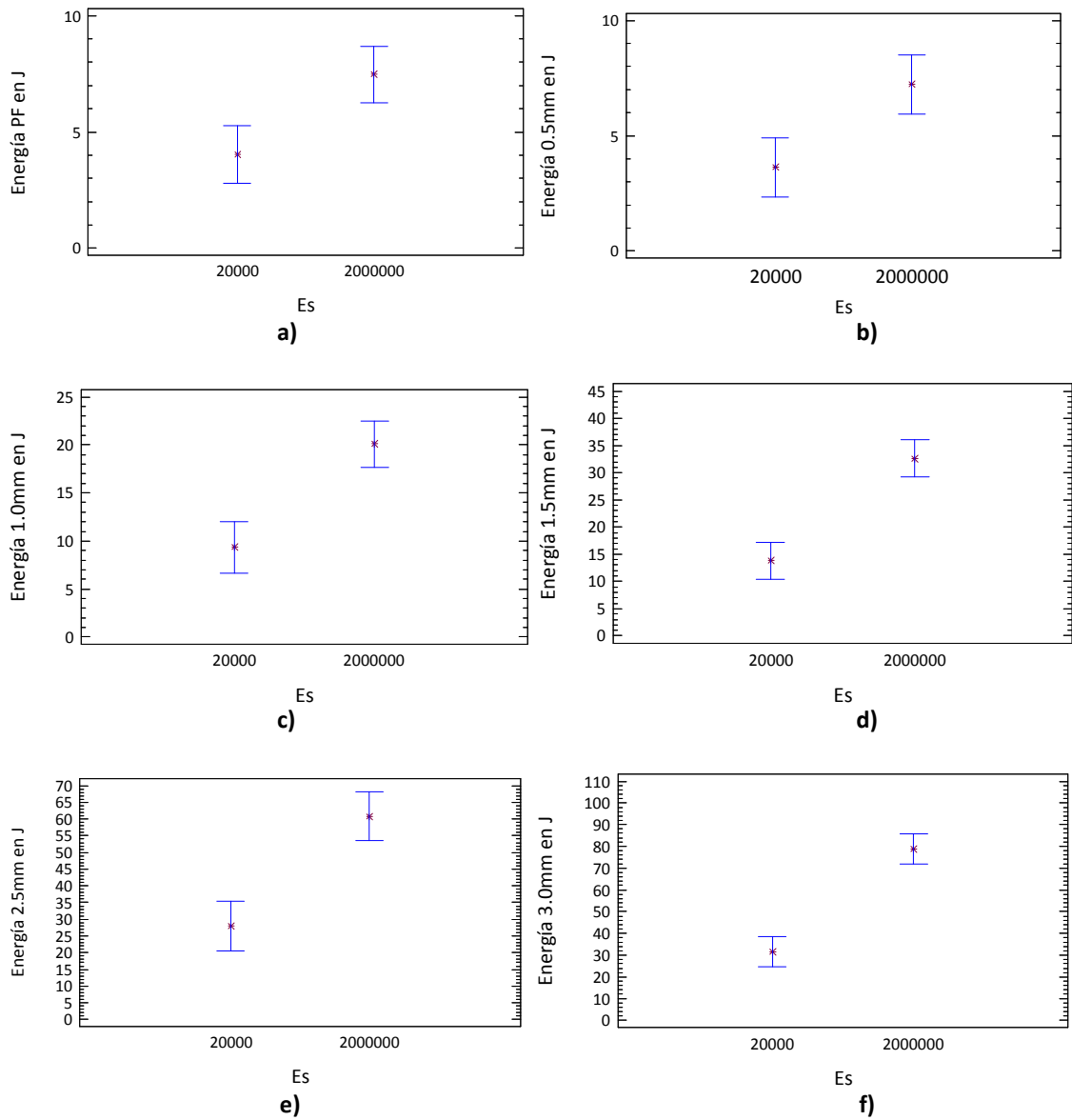


**Figura B. 24.** Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,0mm, y f) 2,5mm, para el parámetro  $B_t$ , ASTM1018.

**Tabla B. 3.** Valores de Energía y Carga obtenidos con las 16 pruebas realizadas, ASTM1550.

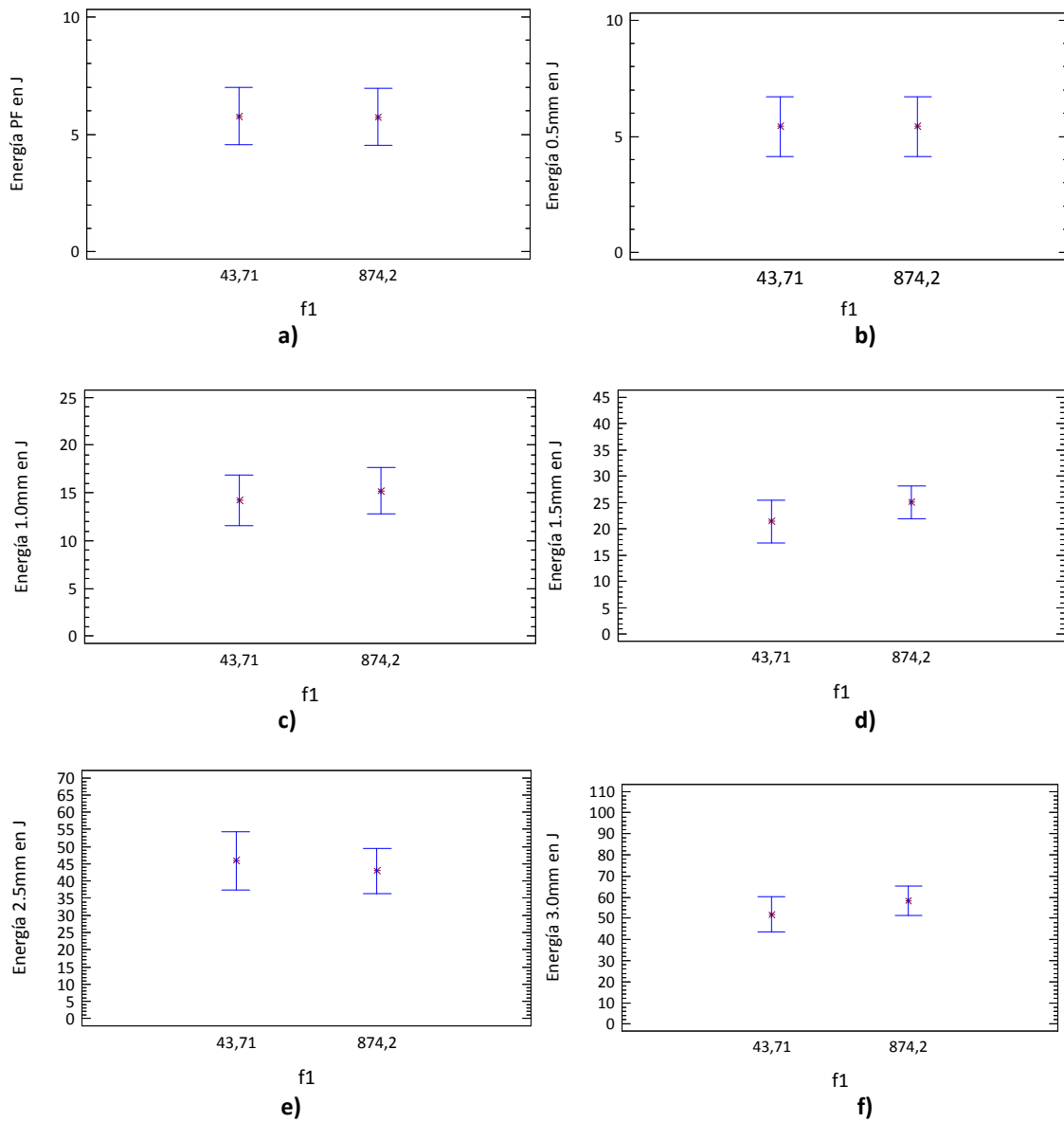
ASTM 1550																		
prueba	Es	fs	fcB	betat	f1	f2	Carga PF	Energía PF	Carga 0,5mm	Energía 0,5mm	Carga 1,0mm	Energía 10mm	Carga 1.5mm	Energía 1.5mm	Carga 2,5mm	Energía 2,5m	Carga 3,0mm	Energía 3,0mm
1	20000	30	43,71	0,1	43,71	43,71	13,323	3,493	12,53	3,135	14,583	10,038	15,895	17,573	18,065	35,858	18,889	44,209
2	20000	30	43,71	0,1	874,2	655,65	13,323	3,272	12,53	3,132	14,637	10,025	15,995	17,546	18,083	34,818	18,947	44,173
3	20000	30	131,13	0,9	43,71	43,71	13,323	3,493	12,53	3,132	14,896	10,072	16,925	18,021	18,52	35,905	19,718	45,527
4	20000	30	131,13	0,9	874,2	655,65	13,323	3,493	12,53	3,132	14,957	10,091	16,736	17,932	18,877	35,769	19,988	45,423
5	20000	3000	43,71	0,9	43,71	655,65	17,4906	4,621	16,551	4,138	-	-	-	-	-	-	-	-
6	20000	3000	43,71	0,9	874,2	43,71	17,491	4,621	16,551	4,138	5,54	9,612	7,469	12,9	9,602	21,298	10,761	26,388
7	20000	3000	131,13	0,1	43,71	655,65	17,491	4,621	16,551	4,138	5,334	10,985	3,269	12,574	4,714	16,614	5,047	19,06
8	20000	3000	131,13	0,1	874,2	43,71	17,491	4,621	16,551	4,138	5,079	10,344	6,322	13,218	8,587	20,714	9,914	25,333
9	2000000	3000	43,71	0,1	43,71	43,71	18,269	4,824	17,296	4,324	17,556	13,964	19,5	22,941	21,483	43,849	22,635	54,987
10	2000000	3000	43,71	0,1	874,2	655,65	18,269	4,824	17,296	4,324	17,535	13,96	19,542	22,979	21,632	43,885	22,708	55,052
11	2000000	3000	131,13	0,9	43,71	43,71	18,269	4,824	17,296	4,324	16,883	13,762	20,38	23,201	23,33	45,246	24,106	57,018
12	2000000	3000	131,13	0,9	874,2	655,65	18,269	4,824	17,296	4,324	17,178	13,671	20,729	23,184	23,136	45,224	23,988	56,993
13	2000000	30	43,71	0,9	43,71	655,65	29,865	10,179	29,865	10,179	36,841	24,429	-	-	-	-	-	-
14	2000000	30	43,71	0,9	874,2	43,71	29,883	10,121	29,883	10,121	37,12	27,012	40,212	46,437	42,506	87,679	43,16	104,359
15	2000000	30	131,13	0,1	43,71	655,65	29,929	10,093	29,929	10,093	36,947	26,938	40,241	43,306	41,201	86,905	41,907	107,722
16	2000000	30	131,13	0,1	874,2	43,71	29,735	10,089	29,735	10,089	36,899	26,912	29,533	46,126	3,605	54,18	-	-

## ASTM 1550

*Energía*  
Parámetro Es

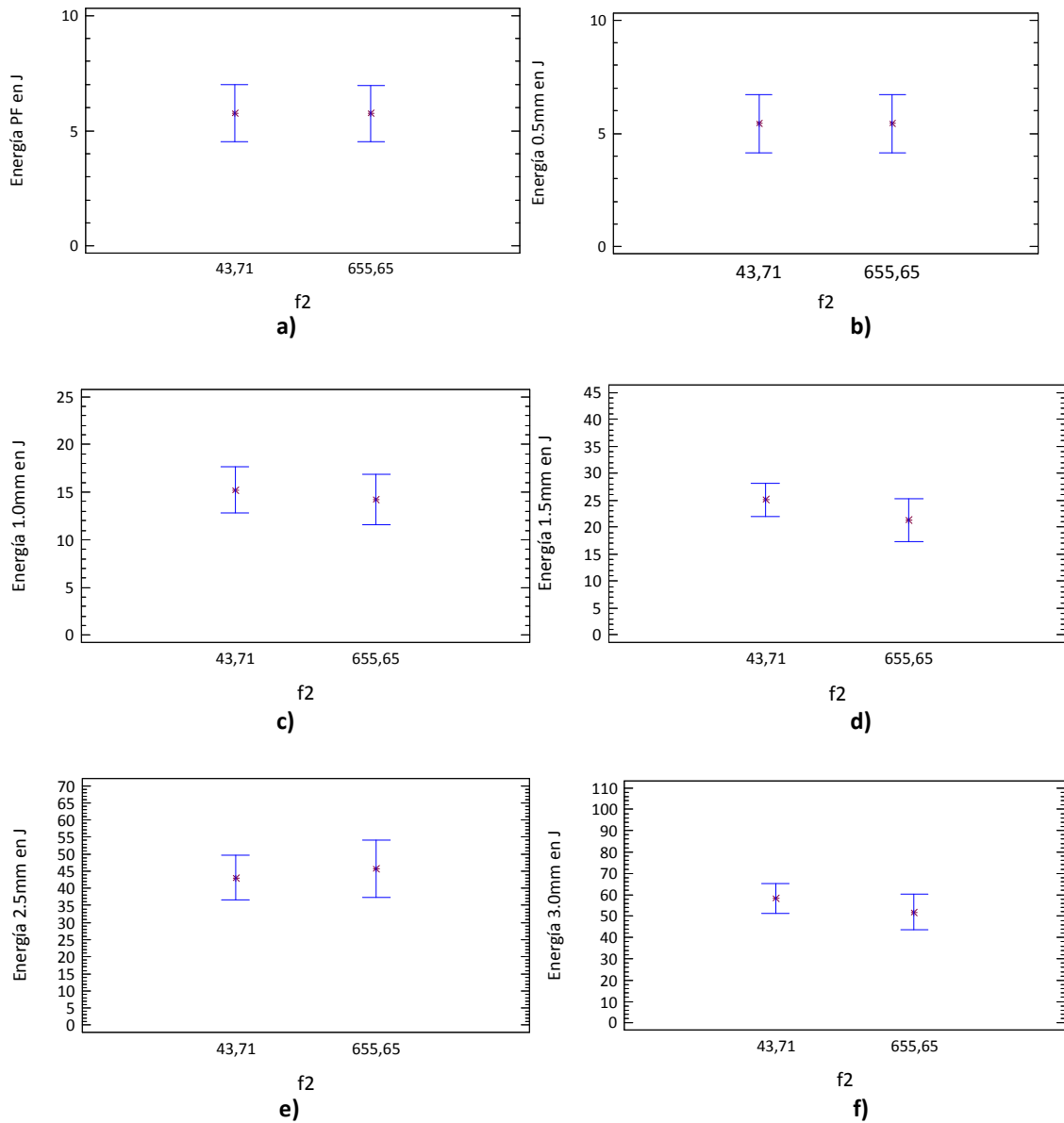
**Figura B. 25.** Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro  $E_s$ , ASTM1550.

**Energía**  
**Parámetro f1**



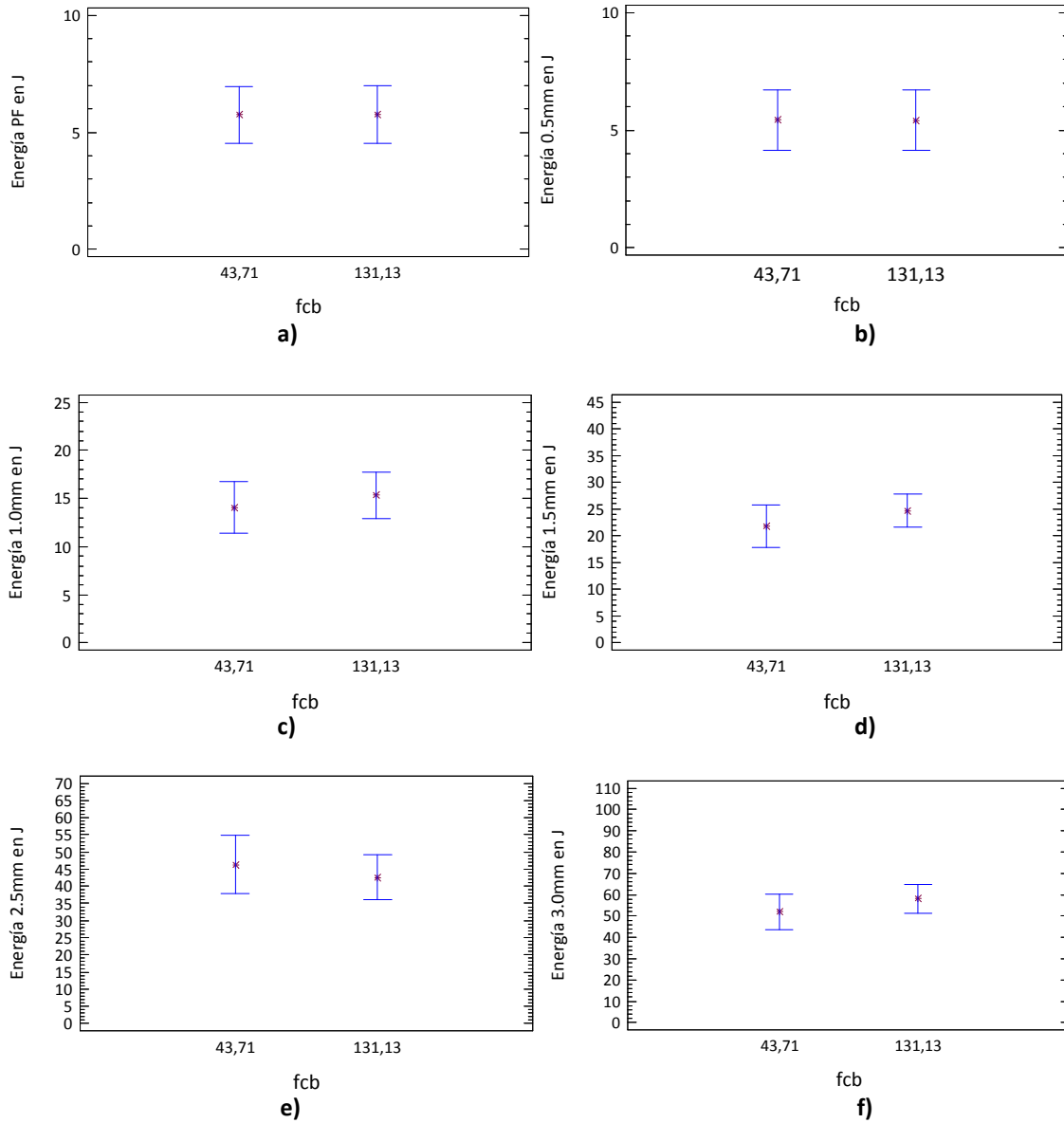
**Figura B. 26.** Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro f1, ASTM1550.

*Energía*  
Parámetro f2



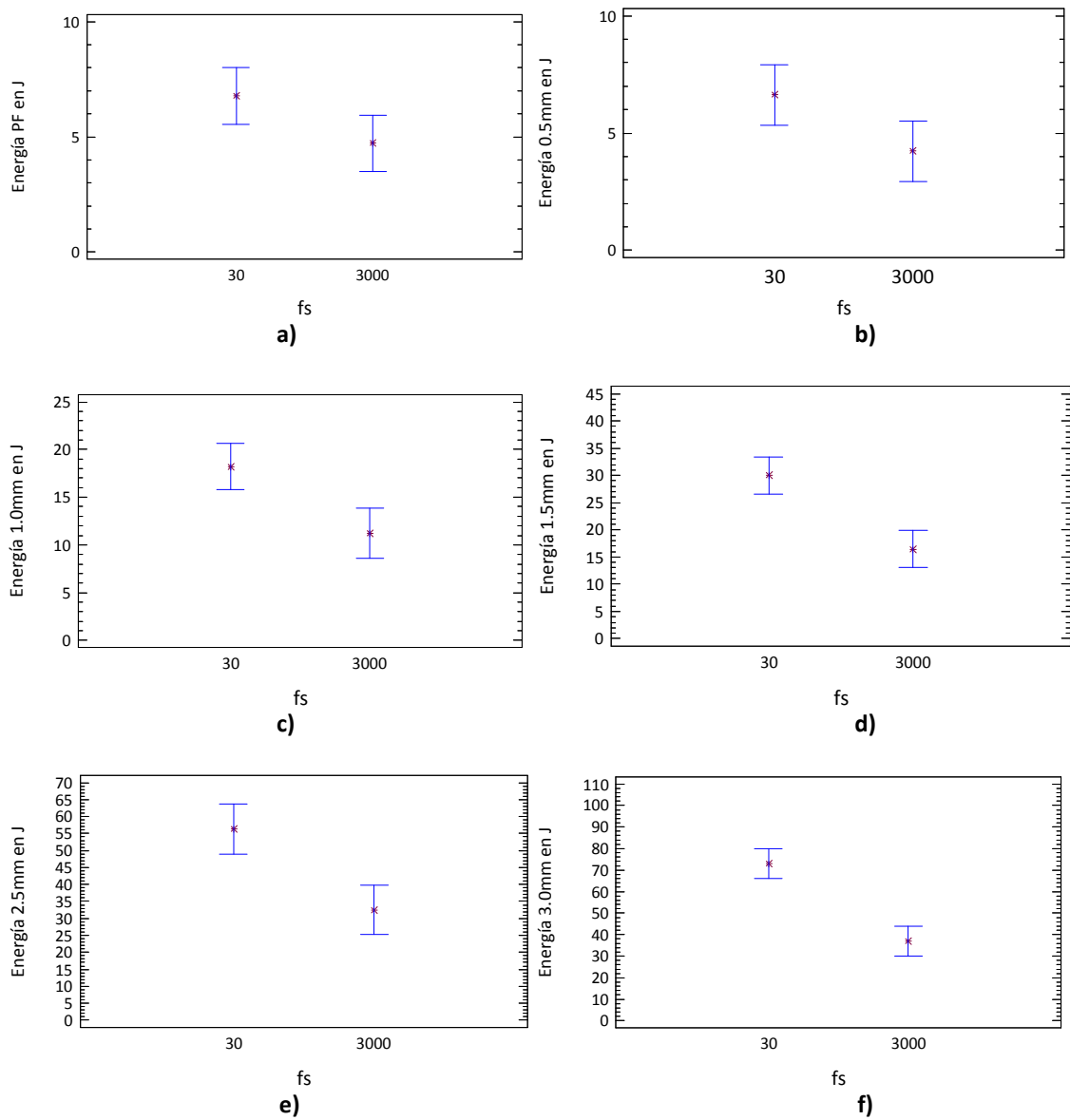
**Figura B. 27.** Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro f2, ASTM1550.

**Energía**  
**Parámetro fcb**



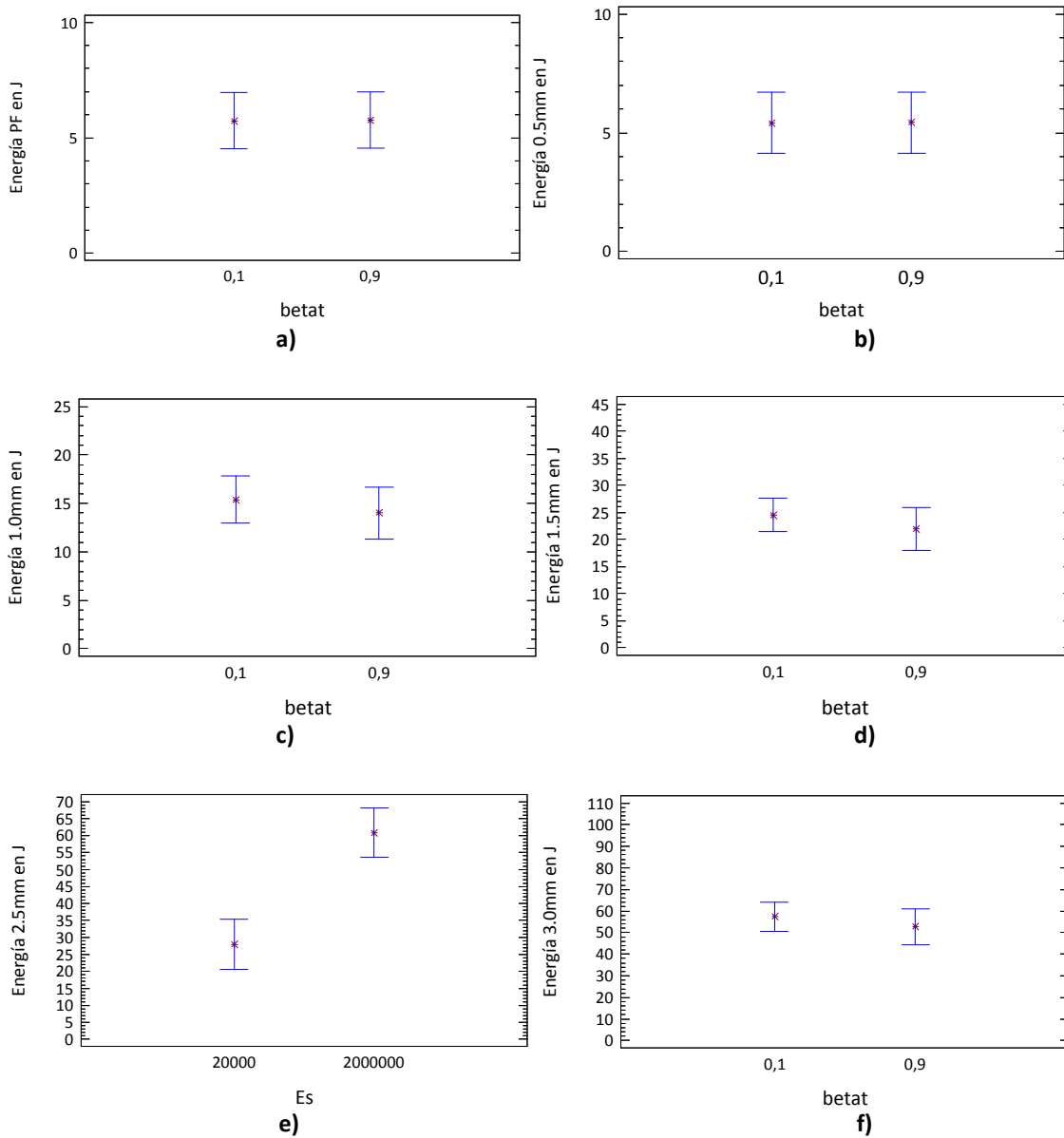
**Figura B. 28.** Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro fcb, ASTM1550.

*Energía*  
Parámetro fs



**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 fs, ASTM1550.

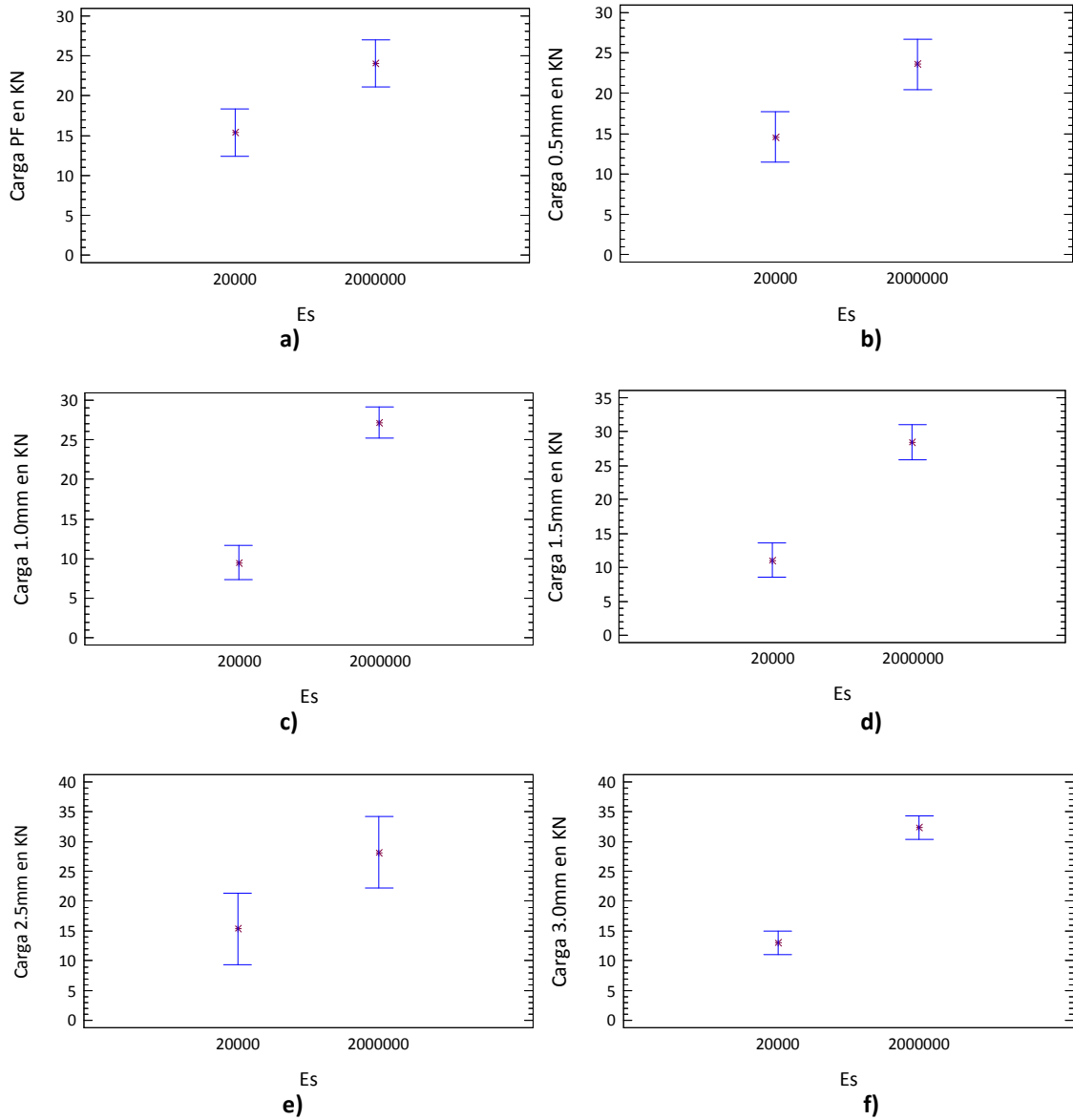
**Energía**  
**Parámetro  $\beta_t$**



**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  $\beta_t$ , ASTM1550.

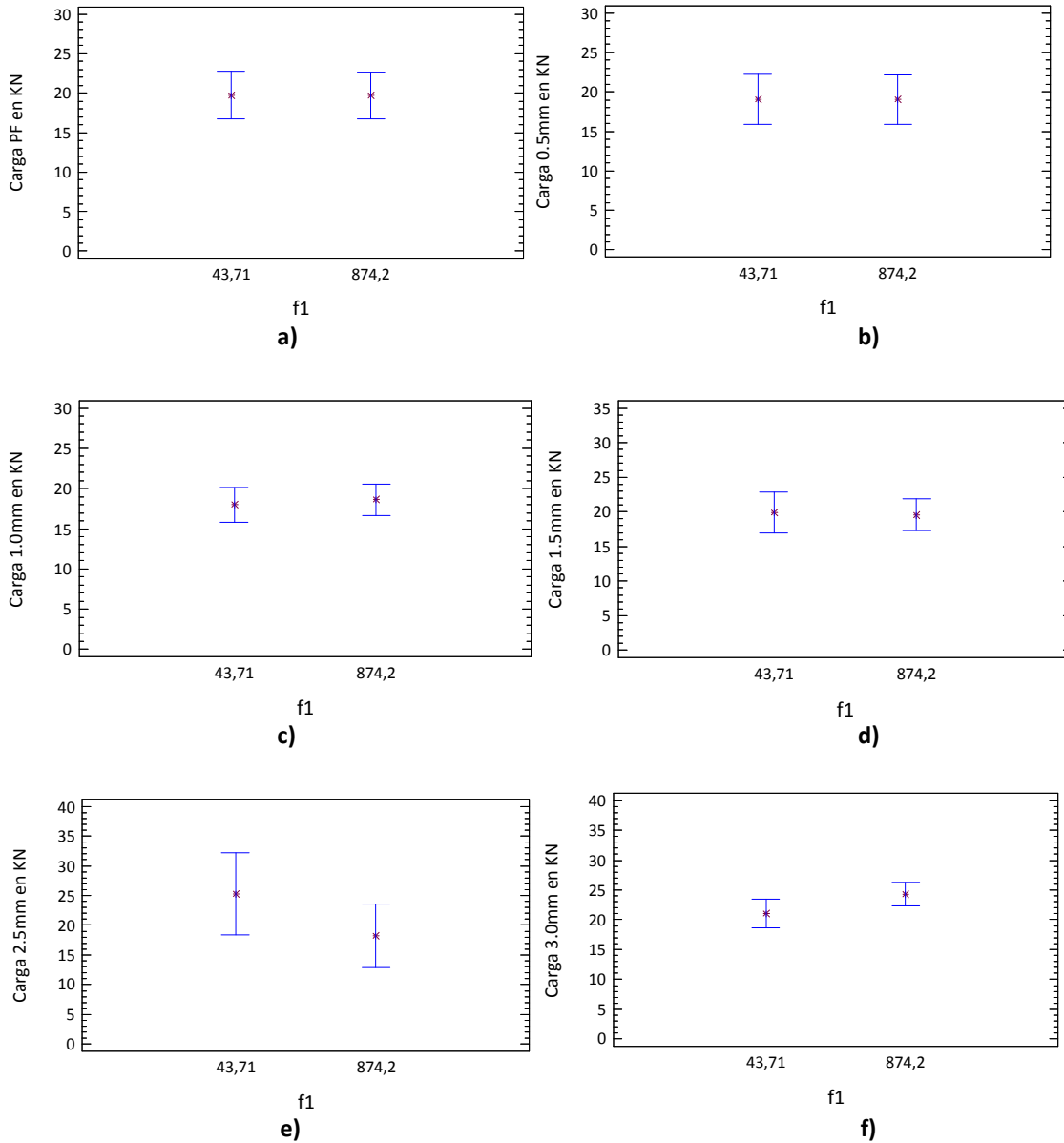


*Carga*  
Parámetro Es



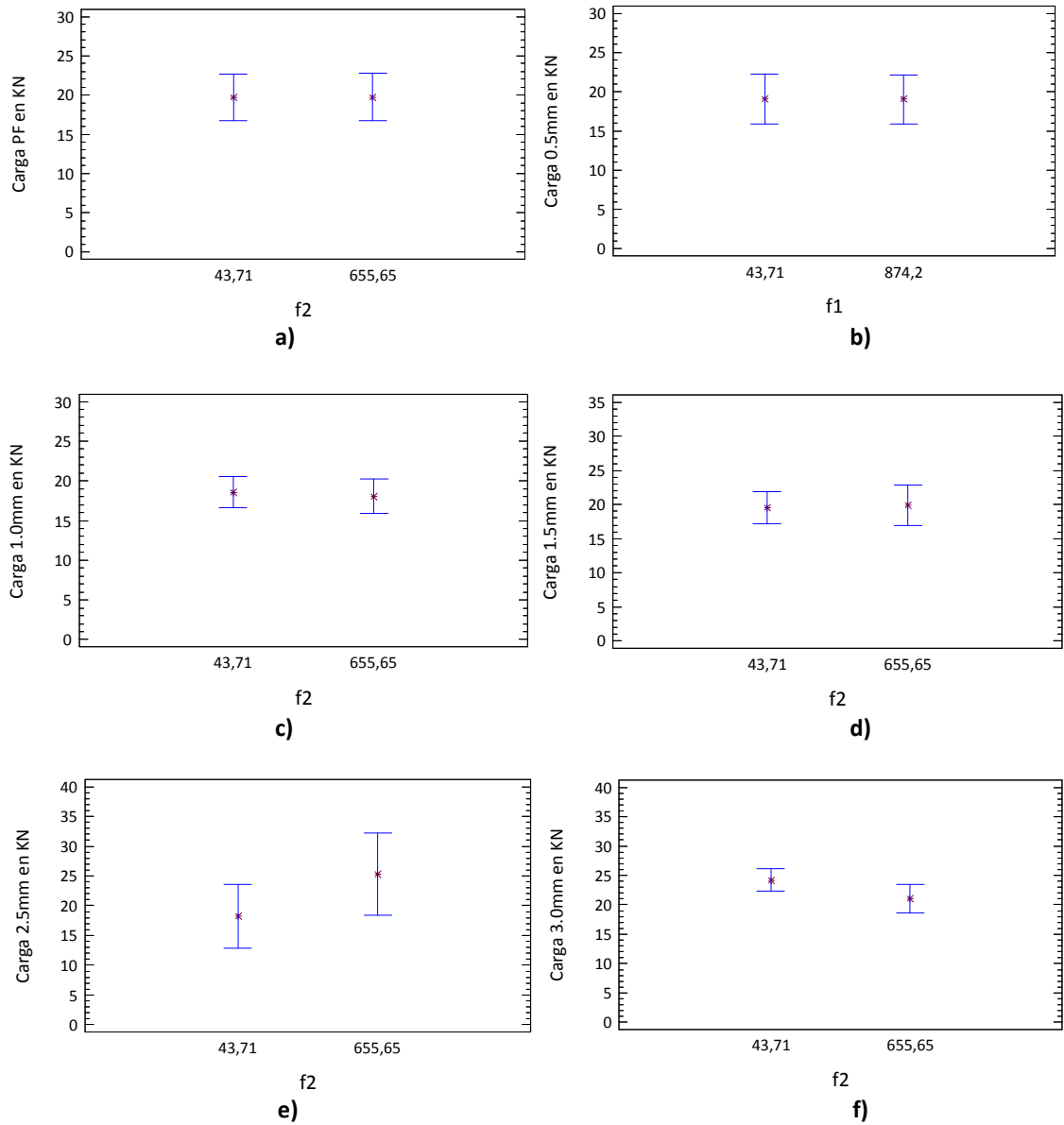
**Figura B. 31.** Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro Es, ASTM1550.

**Carga**  
**Parámetro f1**



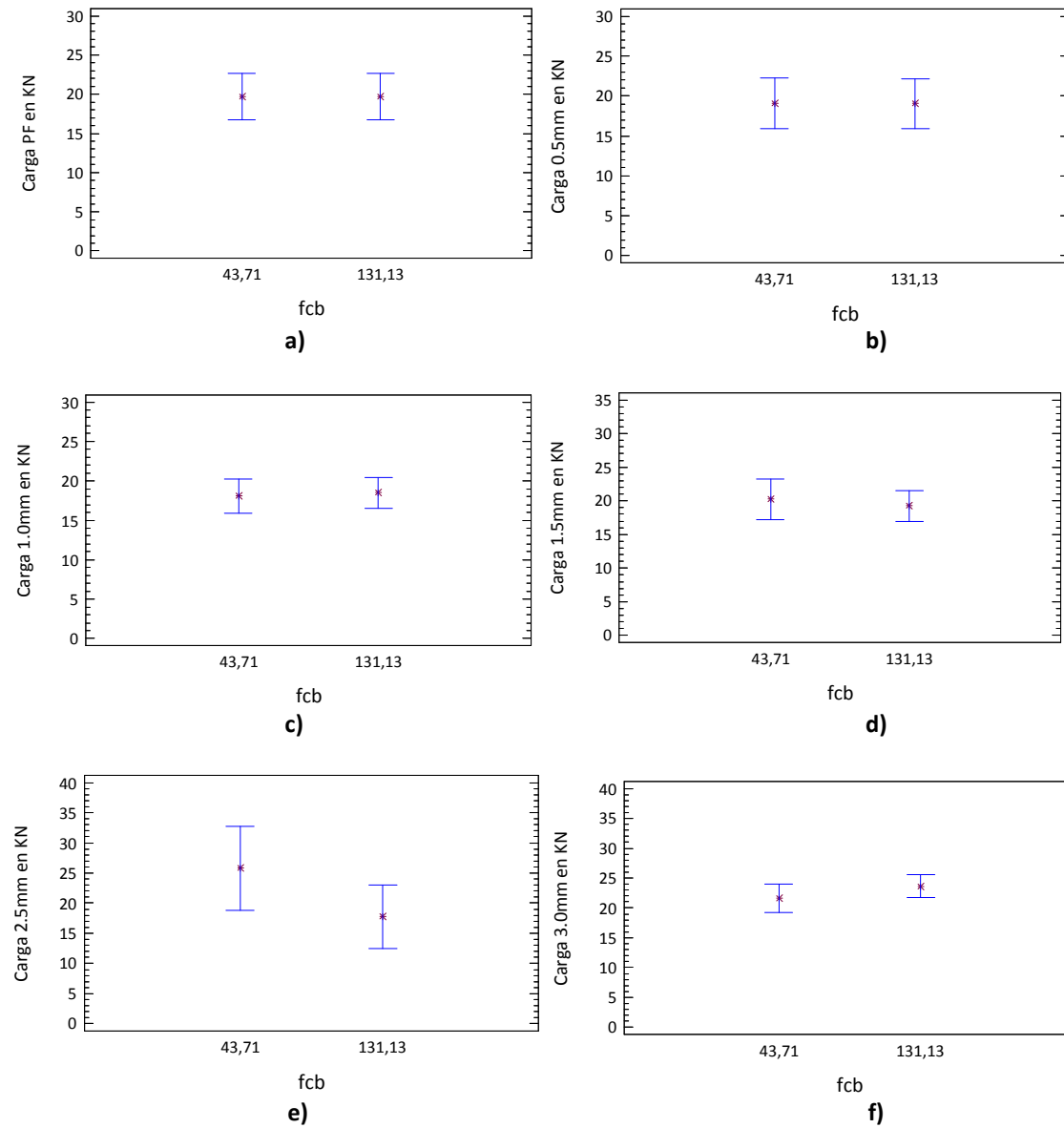
**Figura B. 32.** Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro  $f_1$ , ASTM1550.

*Carga*  
Parámetro f2



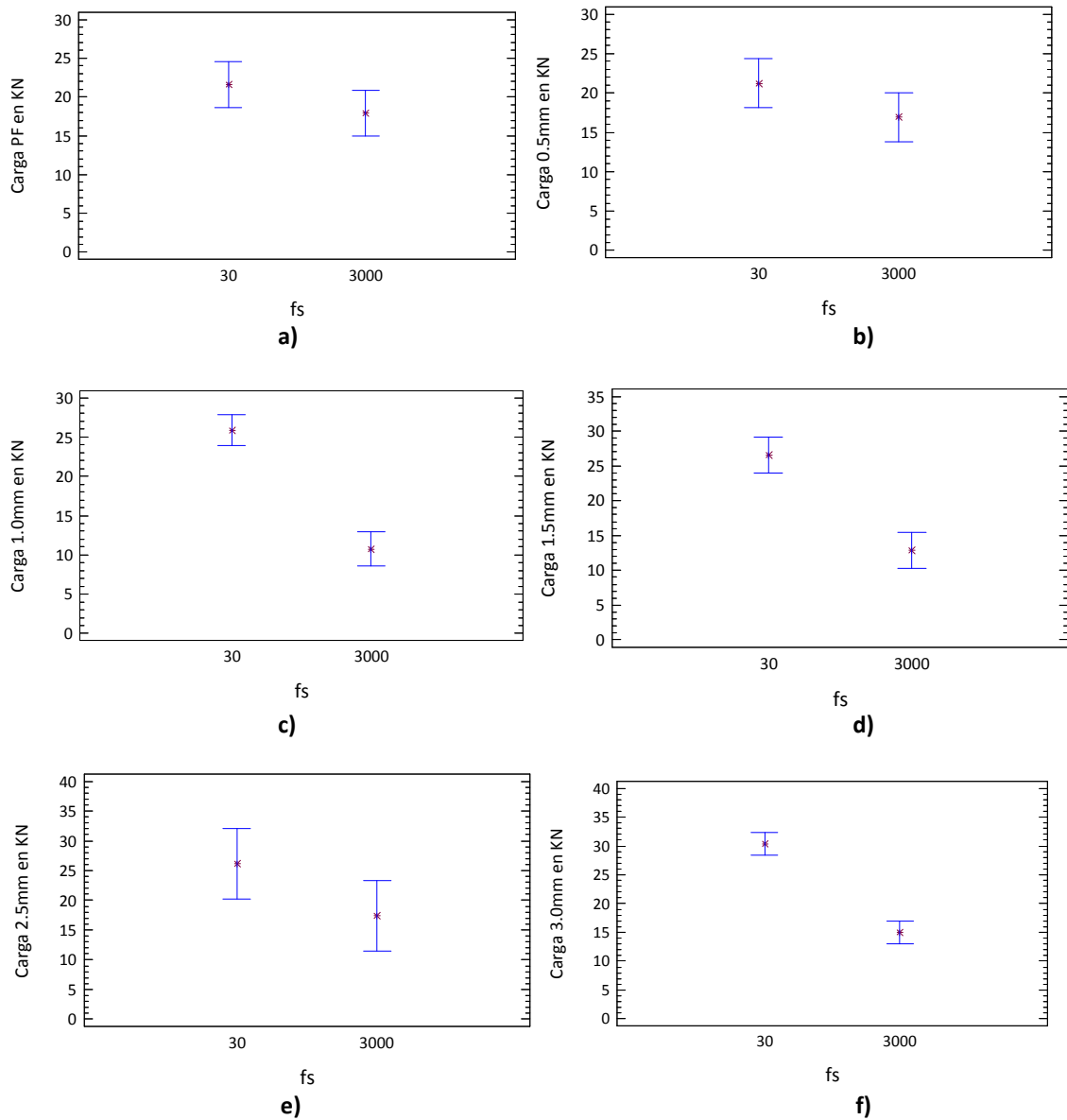
**Figura B. 33.** Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro f2, ASTM1550.

**Carga**  
**Parámetro fcb**



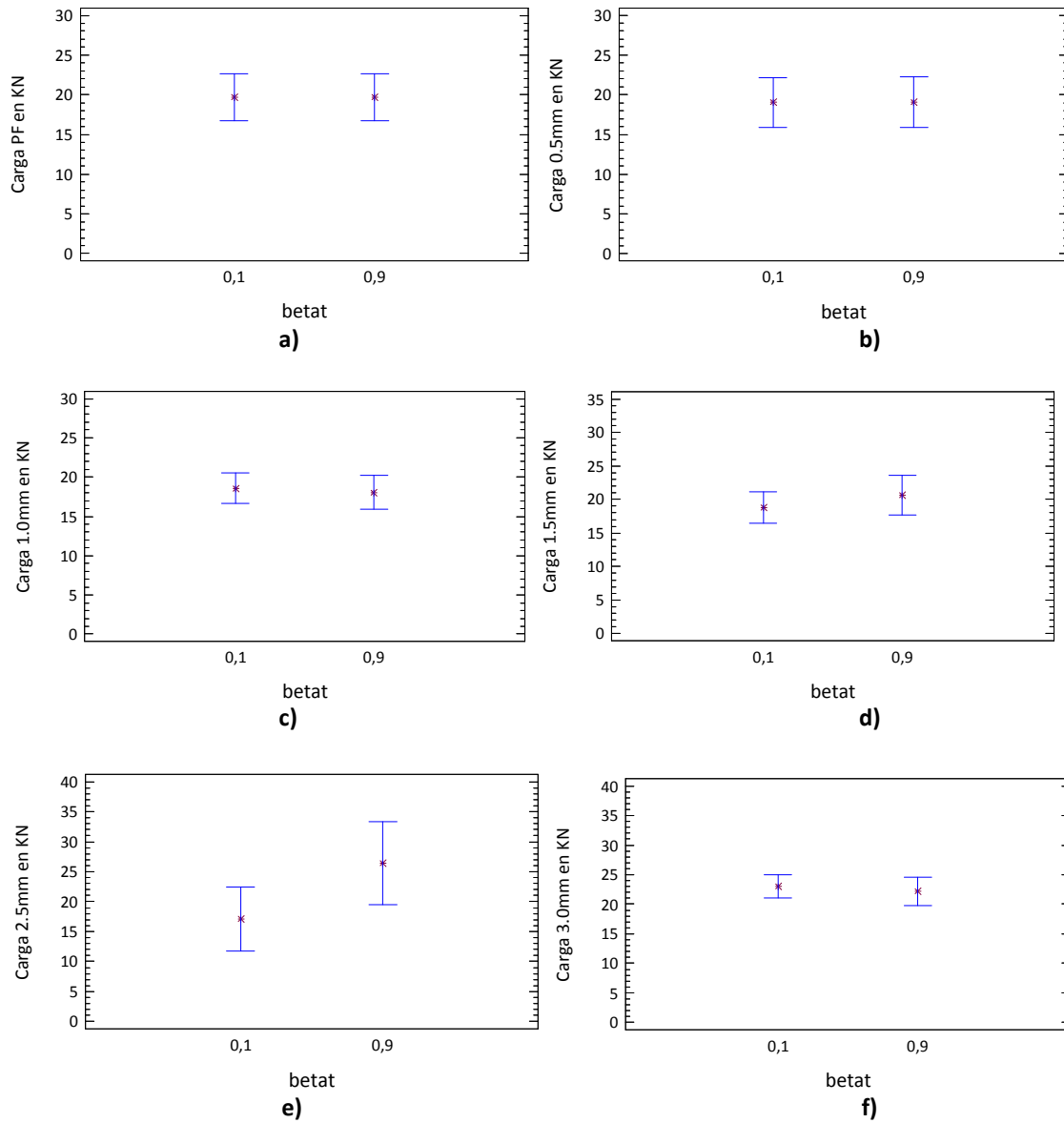
**Figura B. 34.** Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro fcb, ASTM1550.

*Carga*  
Parámetro fs



**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 fs, ASTM1550.

**Carga**  
**Parámetro  $\beta_t$**



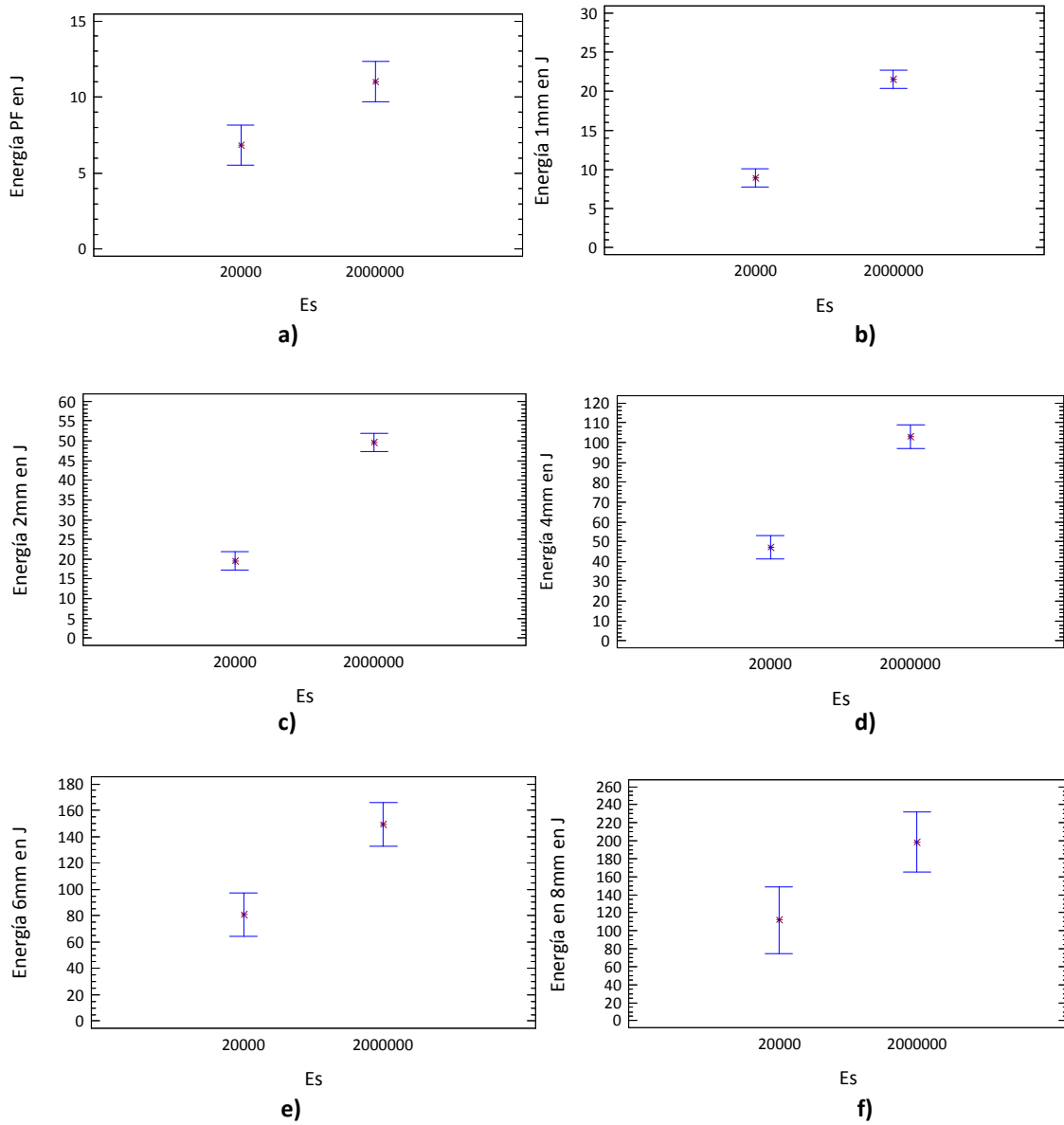
**Figura B. 36.** Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 0,5mm, c) 1,0mm, d) 1,5mm, e) 2,5, y f) 3,0mm para el parámetro  $B_t$ , ASTM1550.

**Tabla B. 4.** Valores de Energía y Carga obtenidos con las 16 pruebas realizadas, Placa 1.

PLACA 1																		
Prueba	Es	fs	fcB	betat	f1	f2	Carga PF	Energía PF	Carga 1,0mm	Energía 1,0mm	Carga 2,0mm	Energía 2,0mm	Carga 4,0mm	Energía 4,0mm	Carga 6,0mm	Energía 6,0mm	Carga 8,0mm	Energía 8,0mm
1	20000	30	43,71	0,1	43,71	43,71	19,928	113,84	16,422	12,098	16,834	26,954	22,072	66,239	25,945	114,511	28,406	168,92
2	20000	30	43,71	0,1	874,2	655,65	19,925	166,76	16,297	12,096	16,67	26,865	22,214	66,143	25,893	114,4	28,322	168,684
3	20000	30	131,13	0,9	43,71	43,71	19,672	120,33	13,406	11,905	17,28	27,272	23,55	68,42	27,855	120,23	30,625	178,91
4	20000	30	131,13	0,9	874,2	655,65	19,803	119,79	13,5	11,971	17,343	27,267	23,488	68,177	27,646	119,64	-	-
5	20000	3000	43,71	0,9	43,71	655,65	14,793	123,77	6,382	6,578	7,51	13,928	7,093	27,877	7,366	42,231	8,313	57,695
6	20000	3000	43,71	0,9	874,2	43,71	14,793	137,92	6,391	6,262	9,033	14,287	9,447	32,453	10,319	52,433	10,427	72,958
7	20000	3000	131,13	0,1	43,71	655,65	15,249	115,63	3,272	4,967	5,335	9,277	7,57	22,513	7,647	37,84	8,429	53,475
8	20000	3000	131,13	0,1	874,2	43,71	15,006	131,84	3,88	5,299	5,491	10,006	9,085	24,873	8,99	43,394	9,615	61,526
9	2000000	3000	43,71	0,1	43,71	43,71	22,312	191,5	21,257	15,086	19,034	34,793	24,156	77,979	27,933	130,561	30,538	189,191
10	2000000	3000	43,71	0,1	874,2	655,65	18,1870	219,17	24,209	15,398	18,938	36,128	24,329	79,402	27,668	131,665	30,117	189,52
11	2000000	3000	131,13	0,9	43,71	43,71	15,5360	469,35	24,607	15,511	20,508	36,371	27,312	83,807	31,699	143,089	34,824	209,728
12	2000000	3000	131,13	0,9	874,2	655,65	15,536	364,984	24,544	15,505	20,424	36,293	26,275	83,515	30,735	140,953	33,556	205,394
13	2000000	30	43,71	0,9	43,71	655,65	34,131	139,92	34,807	27,825	36,537	63,6	3,059	136,606	0	139,92	0	139,92
14	2000000	30	43,71	0,9	874,2	43,71	34,084	96,148	34,459	27,84	38,294	64,469	0	96,148	0	96,148	0	96,148
15	2000000	30	131,13	0,1	43,71	655,65	32,151	569,73	33,431	27,469	35,122	62,404	35,809	133,183	36,78	205,853	37,77	280,476
16	2000000	30	131,13	0,1	874,2	43,71	33,706	520,91	33,994	27,58	35,848	62,622	35,652	132,877	36,508	204,857	37,539	278,763

**PLACA 1**

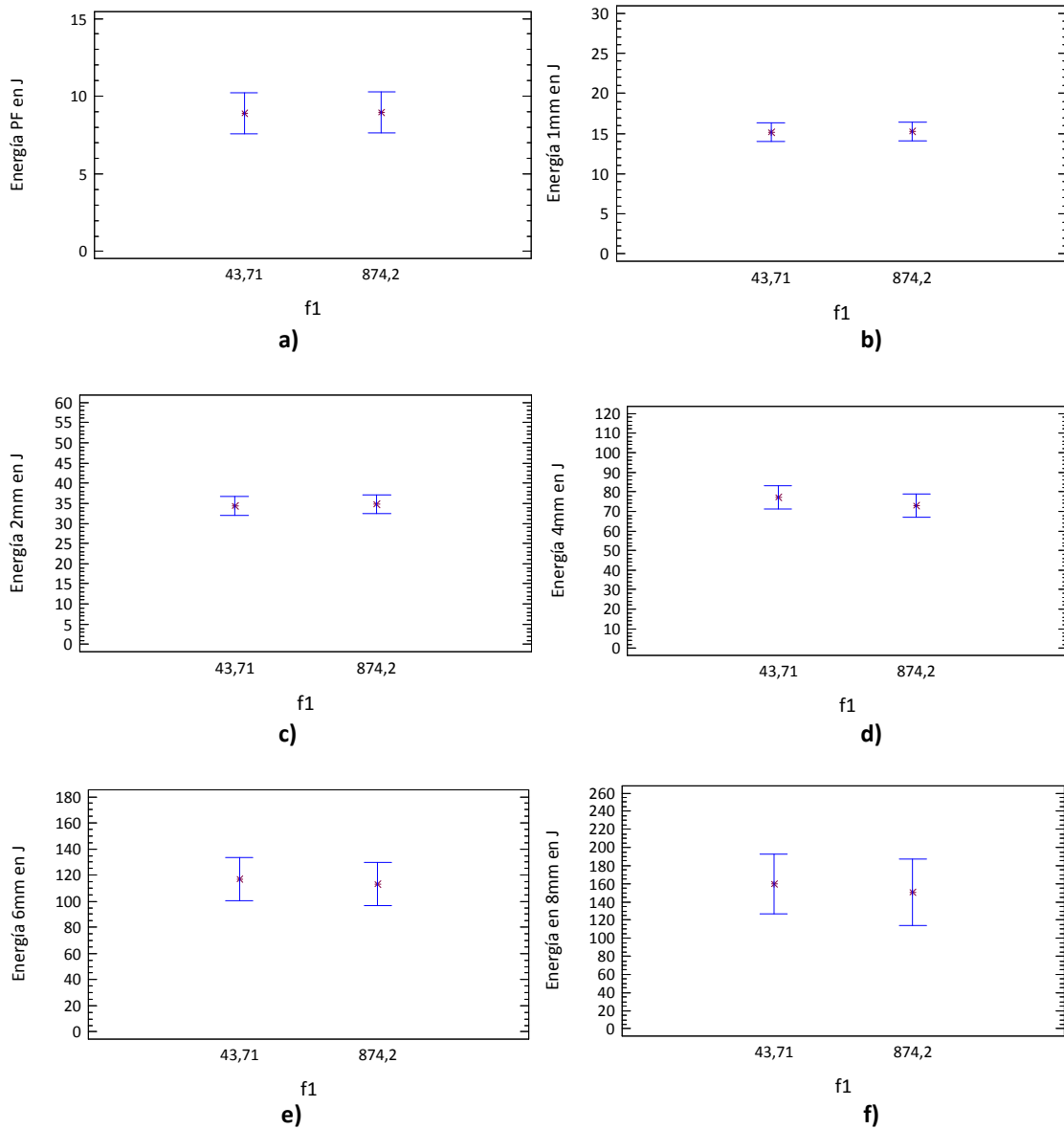
*Energía*  
Parámetro Es



**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.

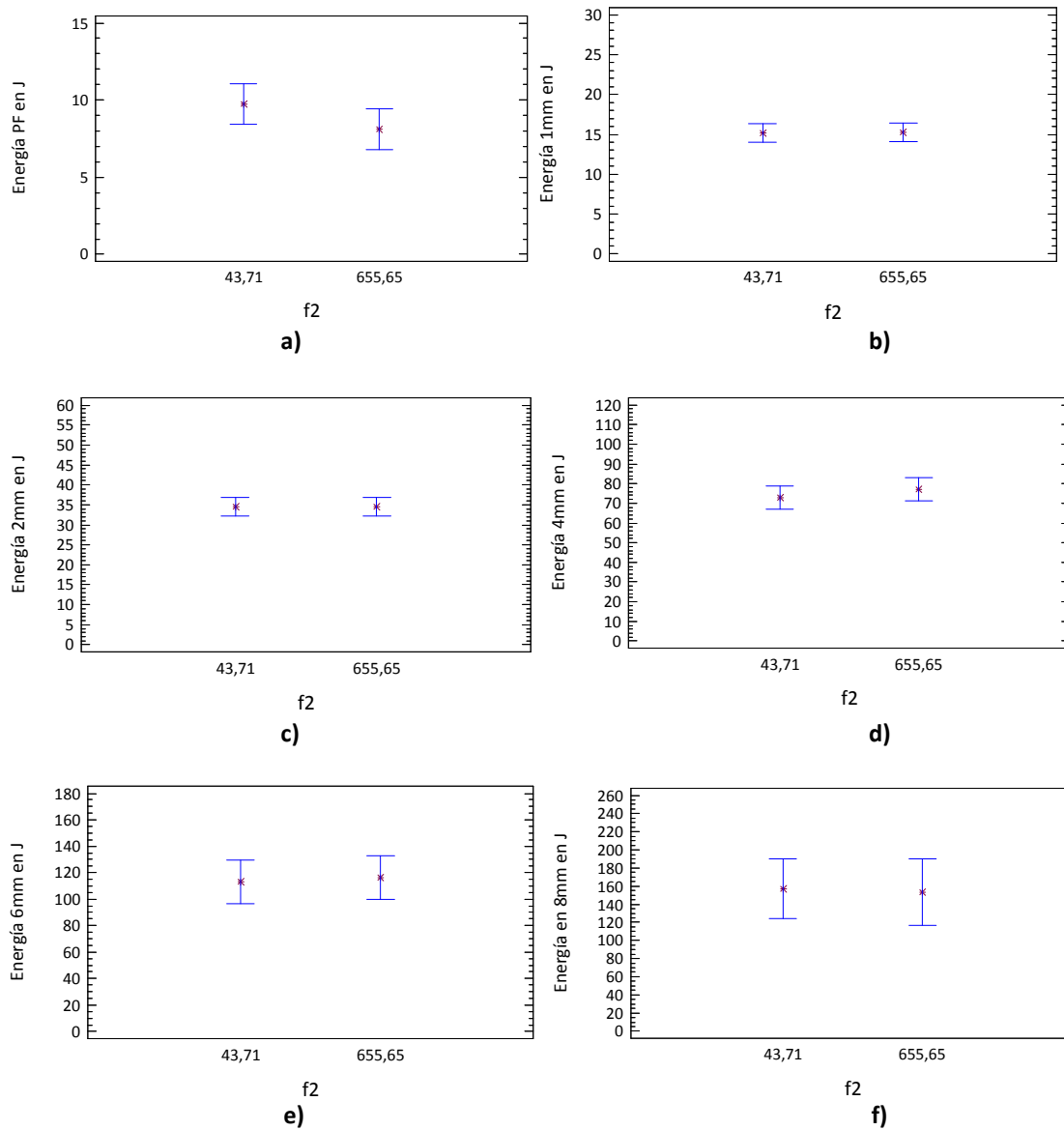


*Energía*  
Parámetro f1



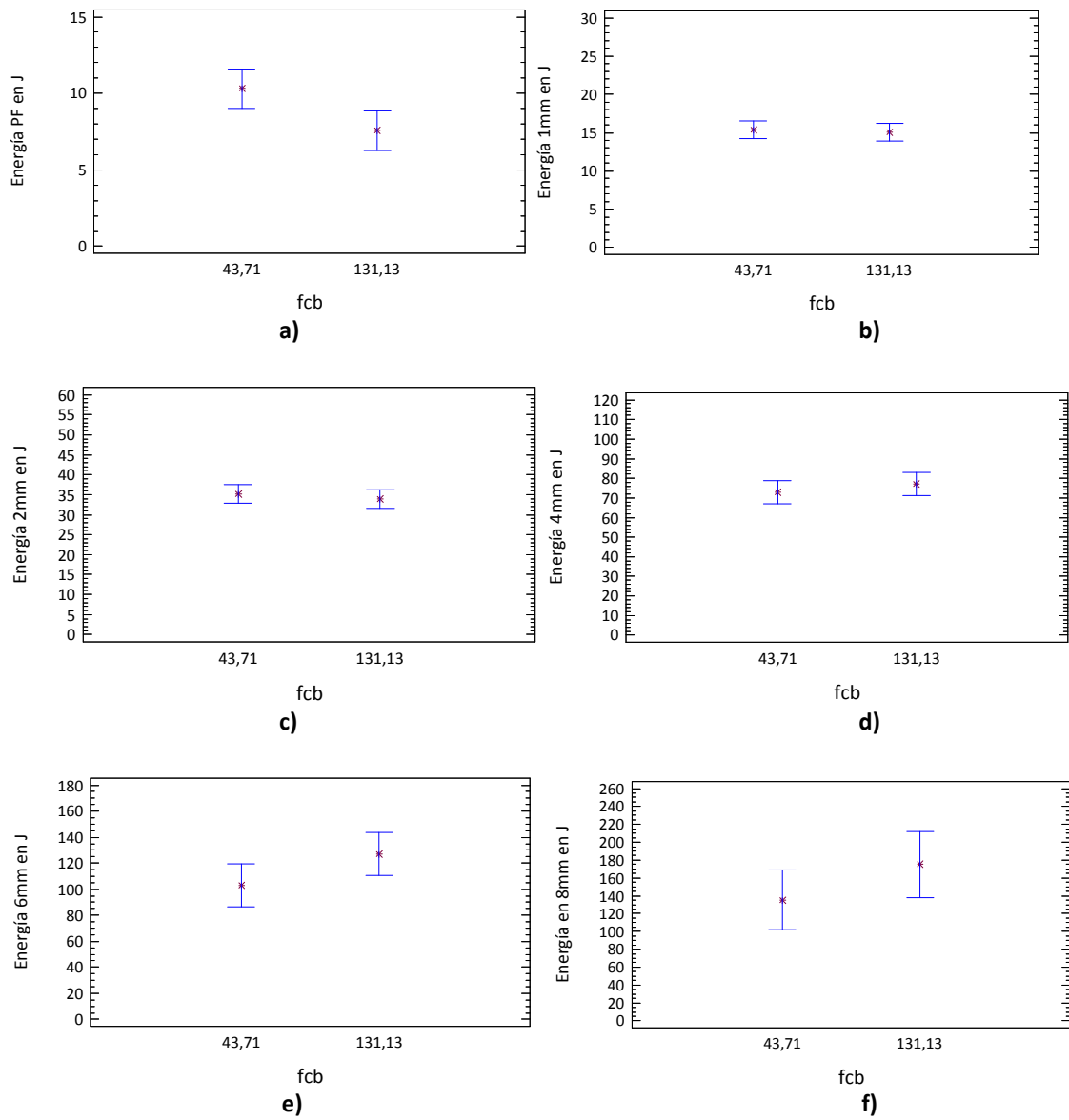
**Figura B. 38.** Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro f1, Placa 1.

**Energía**  
**Parámetro f2**



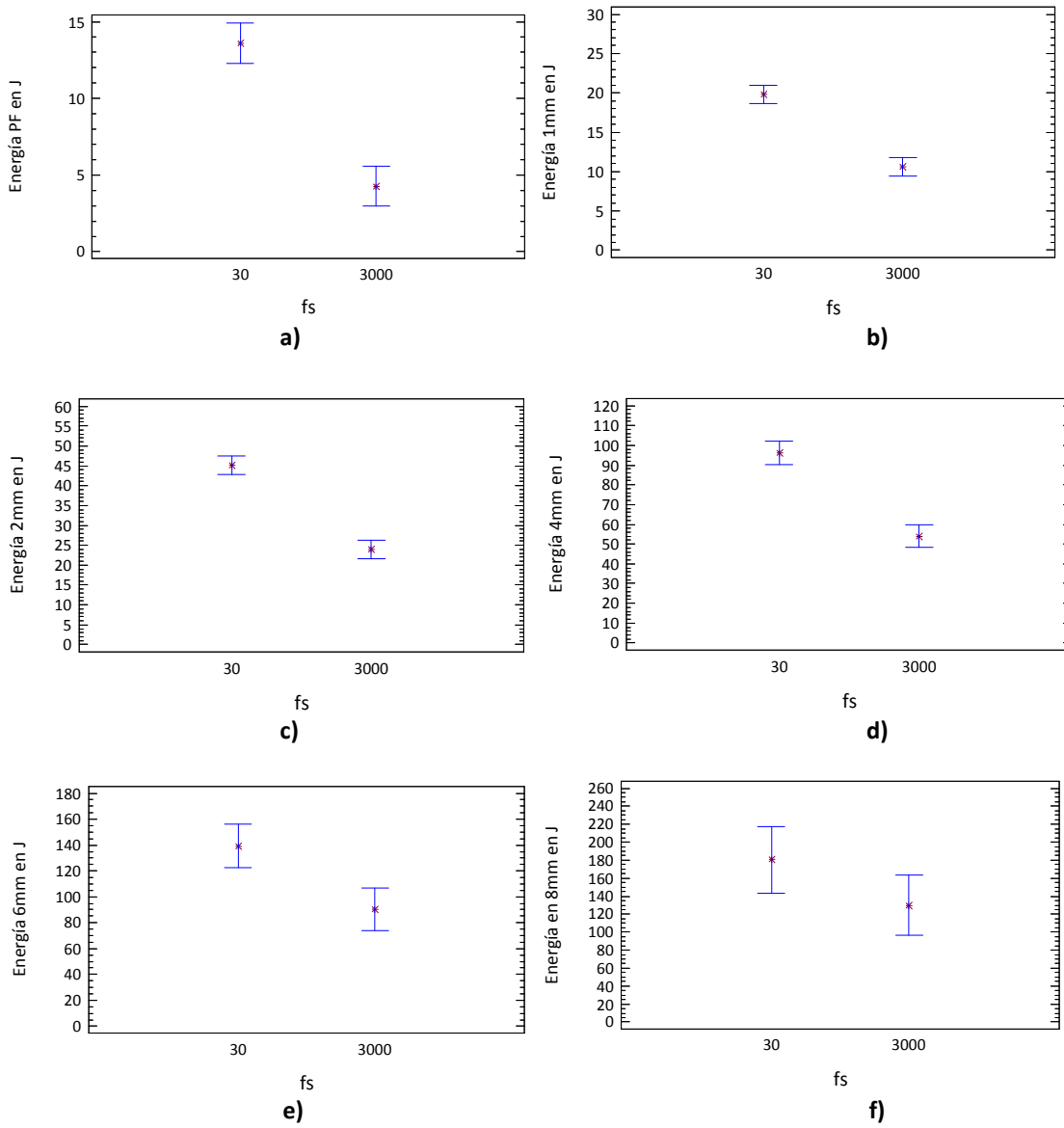
**Figura B. 39.** Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro f2, Placa 1.

*Energía*  
Parámetro fcb



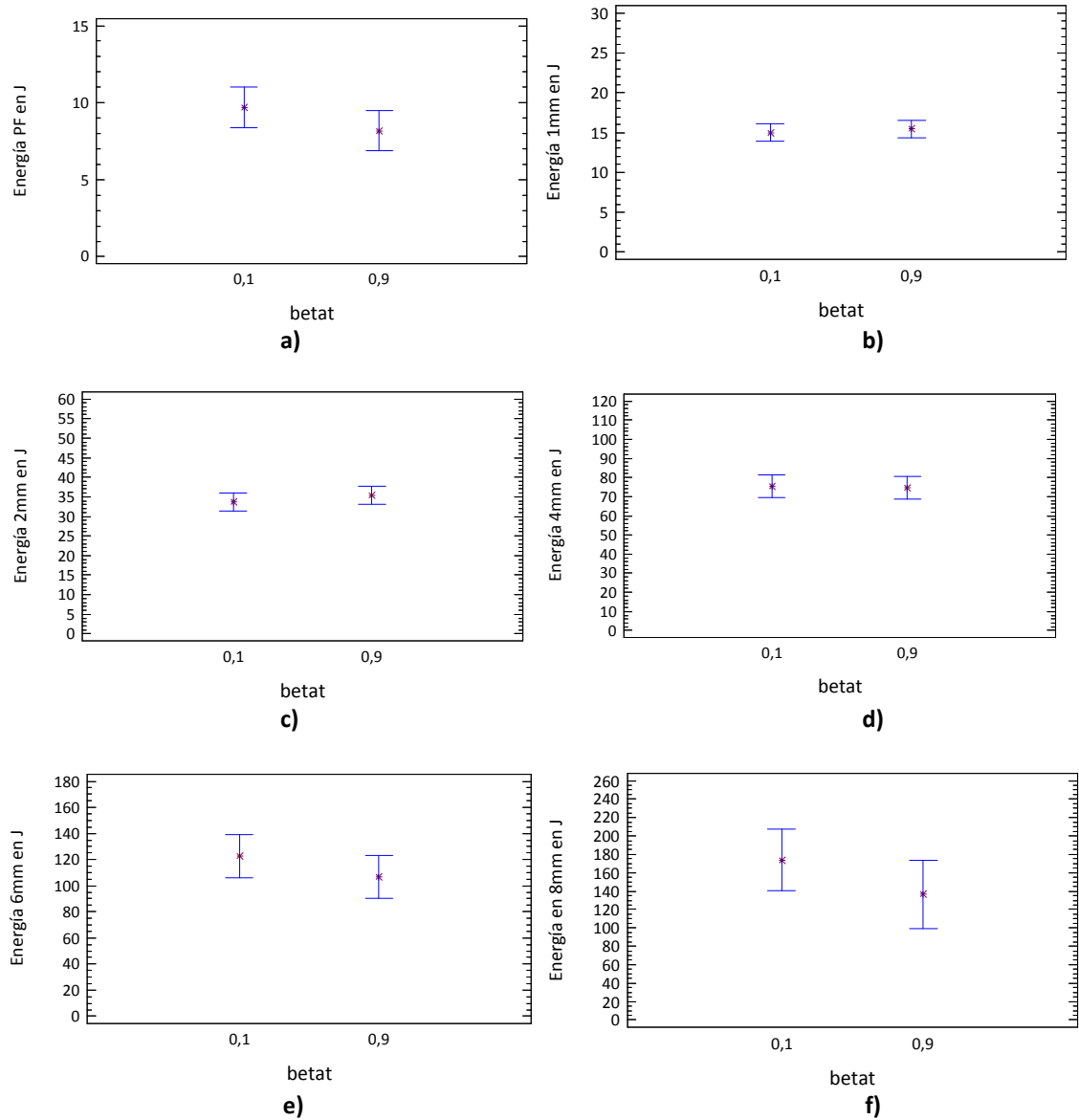
**Figura B. 40.** Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro fcb, Placa 1.

**Energía**  
**Parámetro fs**



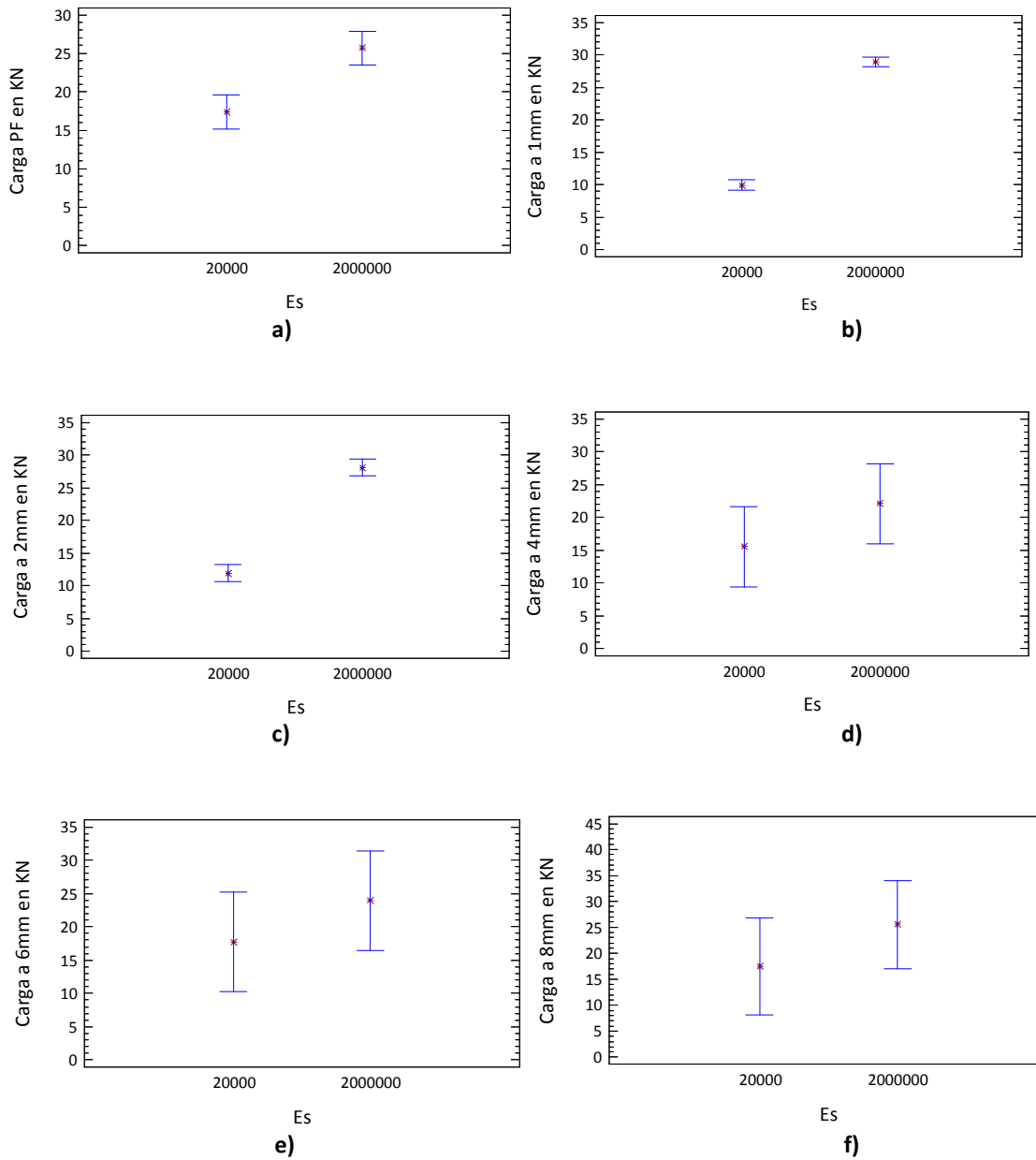
**Figura B. 41.** Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro fs, Placa 1.

*Energía*  
Parámetro  $\beta_t$



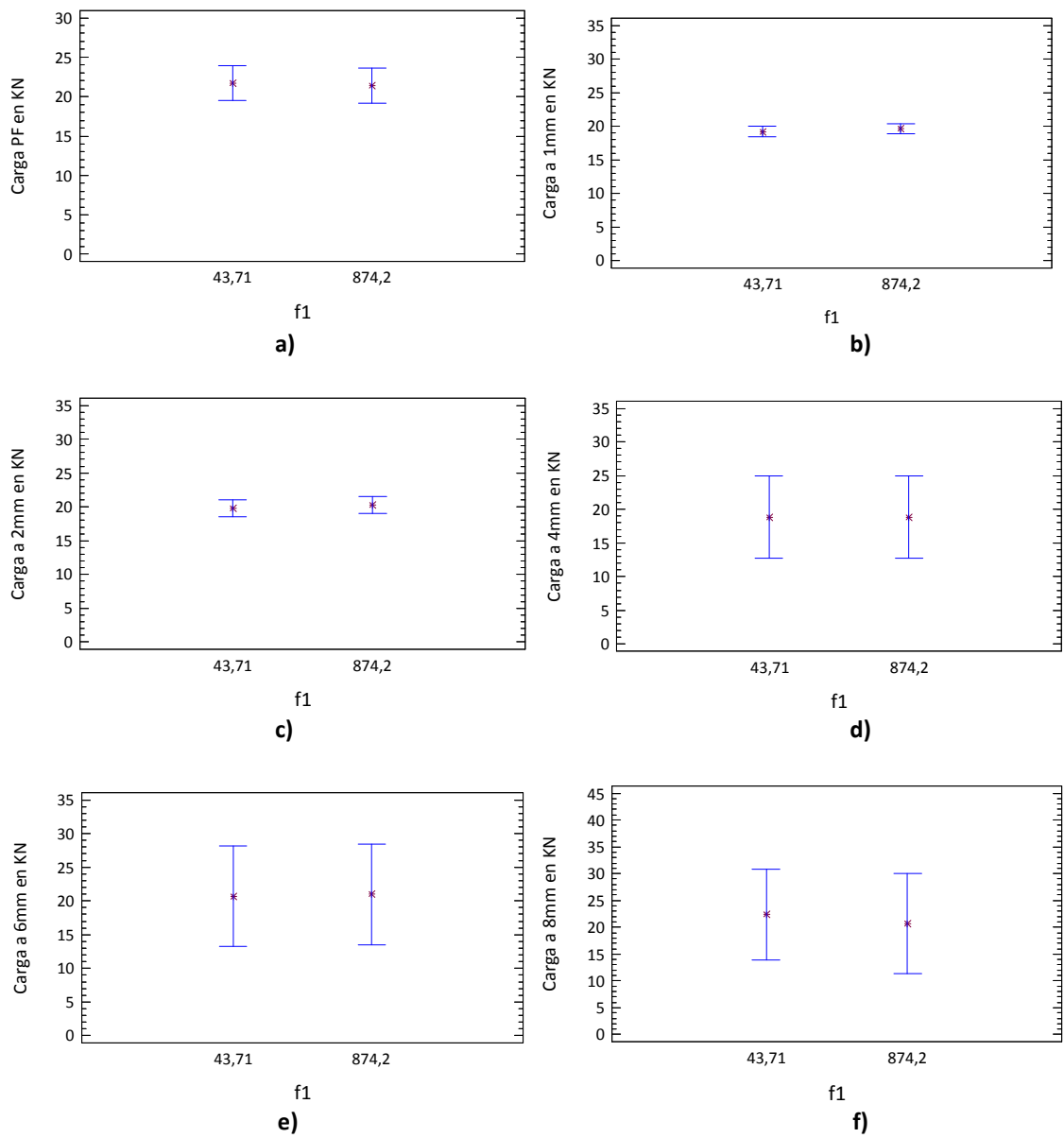
**Figura B. 42.** Valores de energía a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro  $\beta_t$ , Placa 1.

**Carga**  
**Parámetro Es**



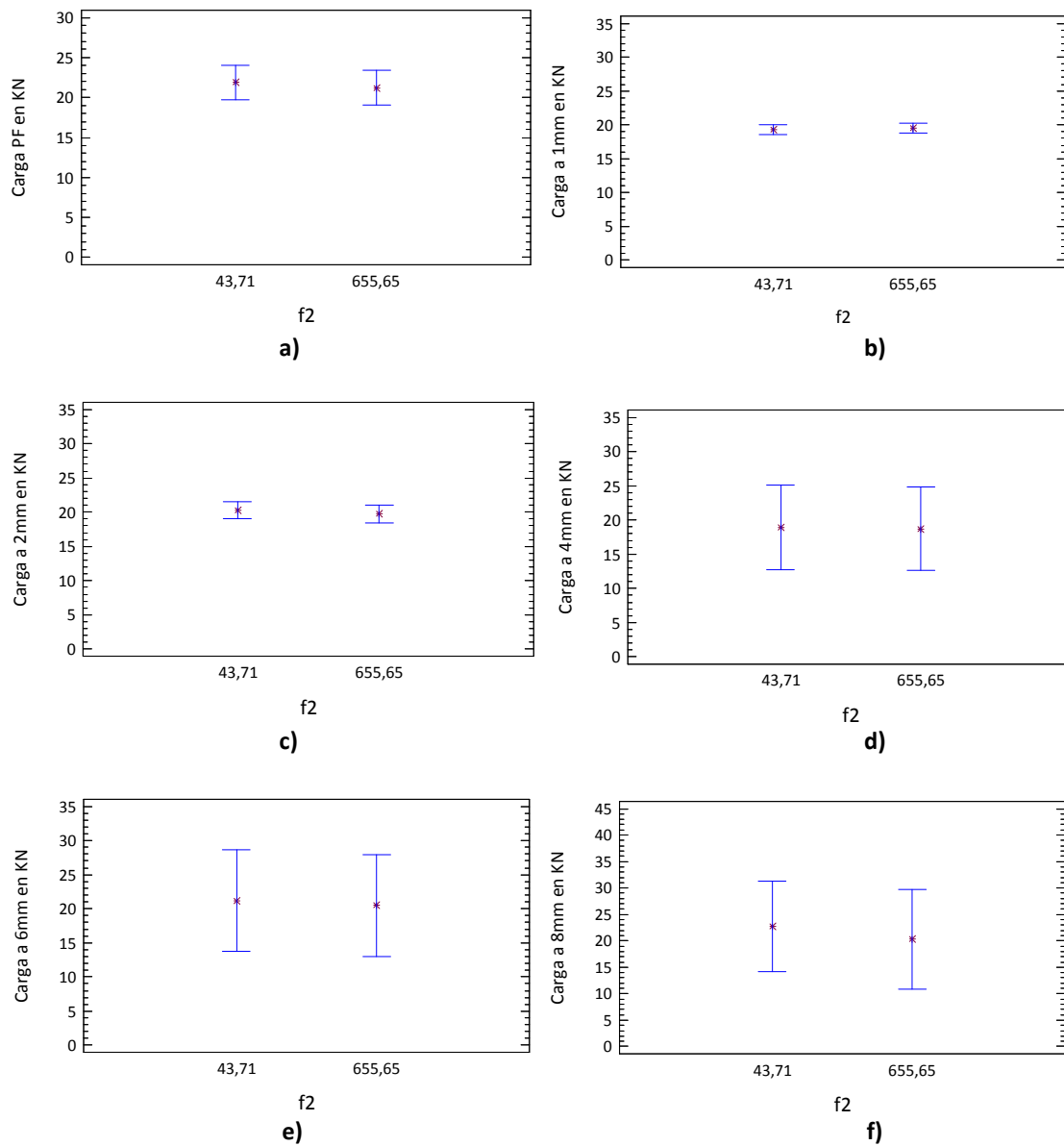
**Figura B. 43.** Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro Es, Placa 1.

*Carga*  
Parámetro f1



**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 f1, Placa 1.

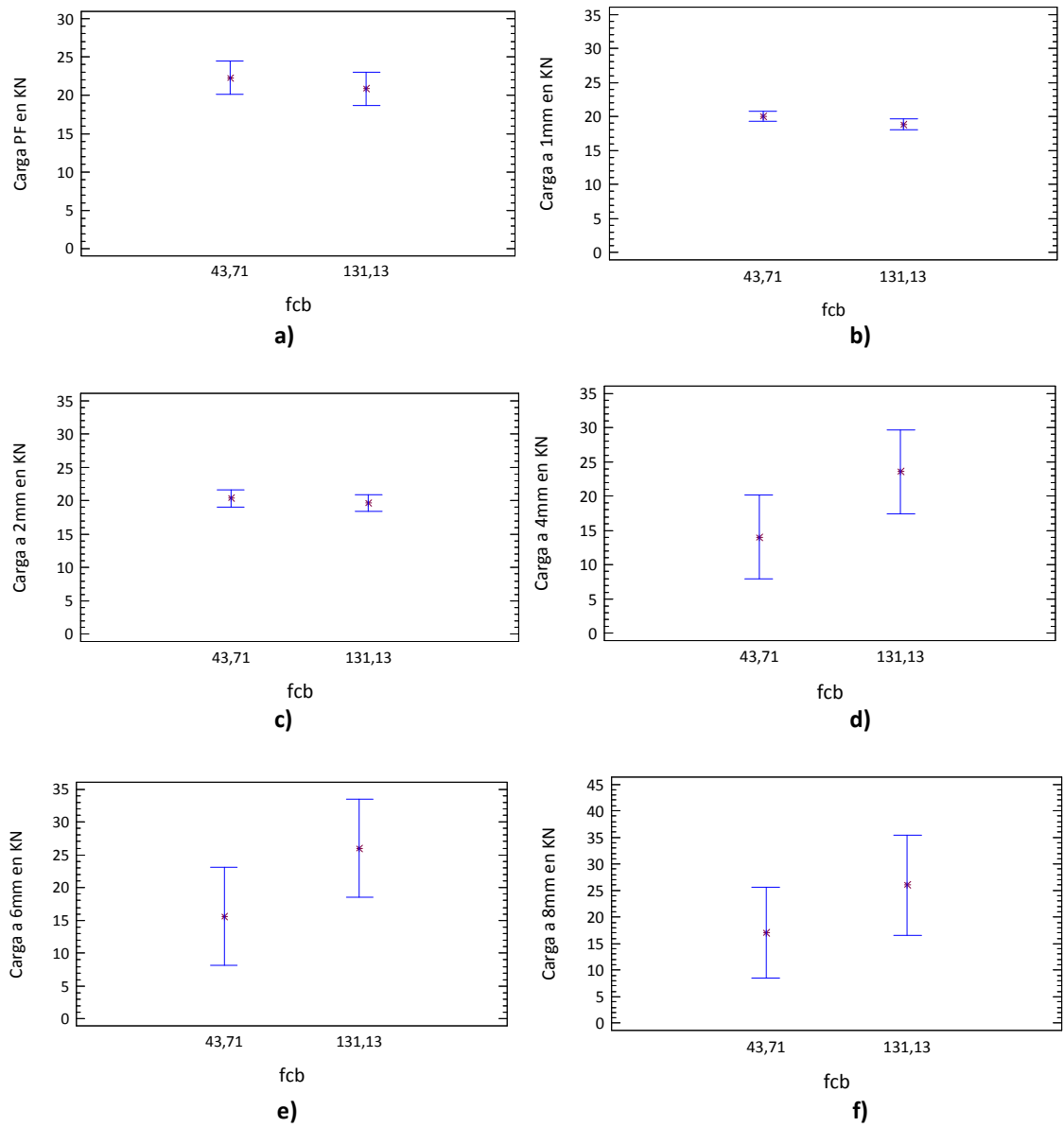
**Carga**  
**Parámetro f2**



**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 f2, Placa 1.

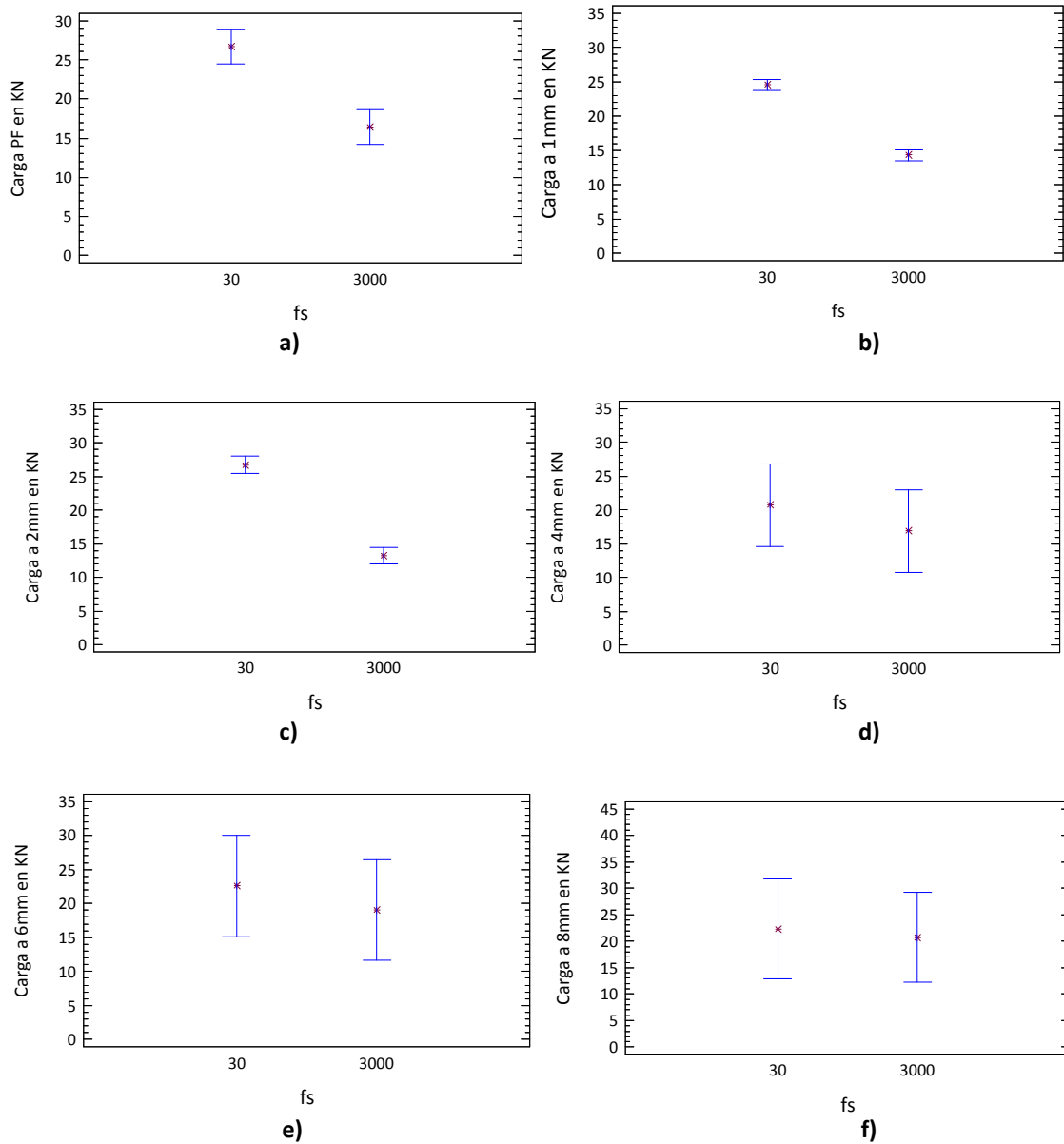


*Carga*  
Parámetro fcb



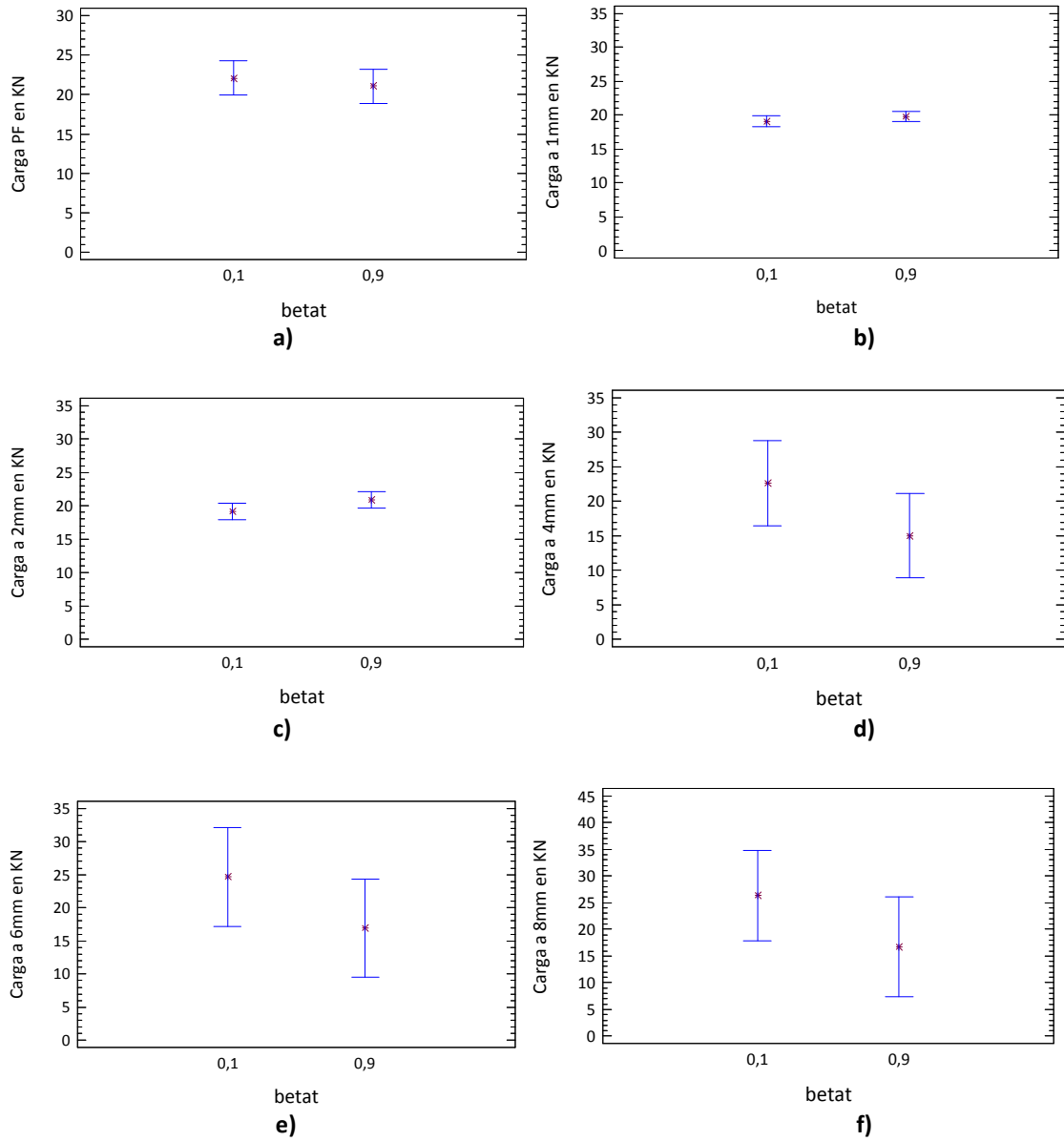
**Figura B. 46.** Valores de carga a: a) PF, y a niveles de flecha de b) 1mm, c) 2mm, d) 4mm, e) 6mm y f) 8mm para el parámetro *fcb*, Placa 1.

**Carga**  
**Parámetro fs**



**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.

Carga  
Parámetro  $\beta_t$



**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  $\beta_t$ , Placa 1.



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



## **ANEJO C**

# **PROFUNDIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS PRINCIPALES**

A continuación se presentan los resultados de las combinaciones  $f_s E_s$ ,  $f_1 f_2$  y  $f_{cb}$  para los elementos EN14651, ASTM1018, PLACA 1, PLACA 2.

### **COMBINACIONES $f_s E_s$**

EN14651  
ASTM1018  
PLACA 1  
PLACA 2

### **COMBINACIONES $f_1 f_2$**

EN14651  
ASTM1018  
PLACA 1  
PLACA 2

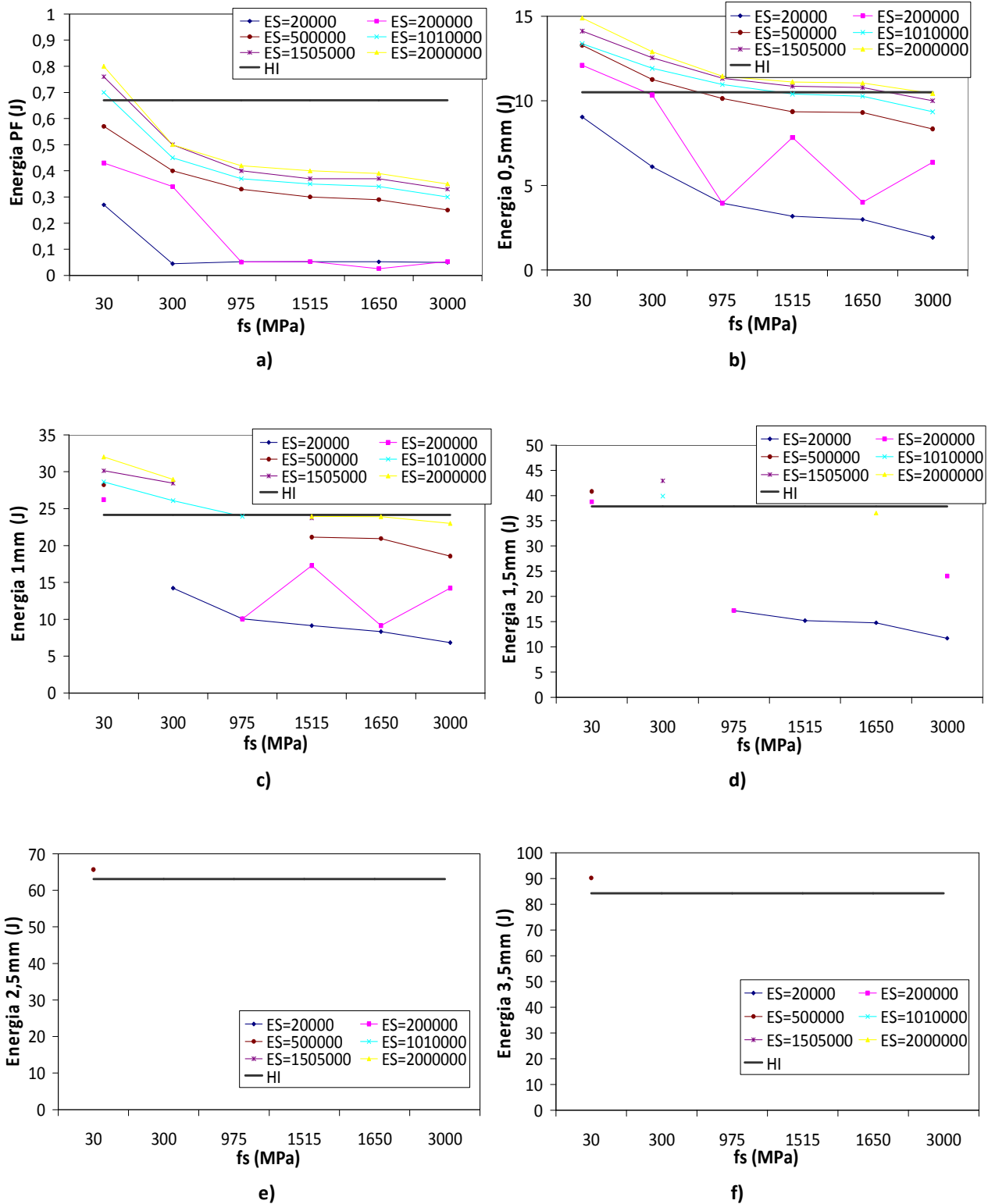
### **COMBINACIONES $f_{cb}$**

EN14651  
ASTM1018  
PLACA 1  
PLACA 2

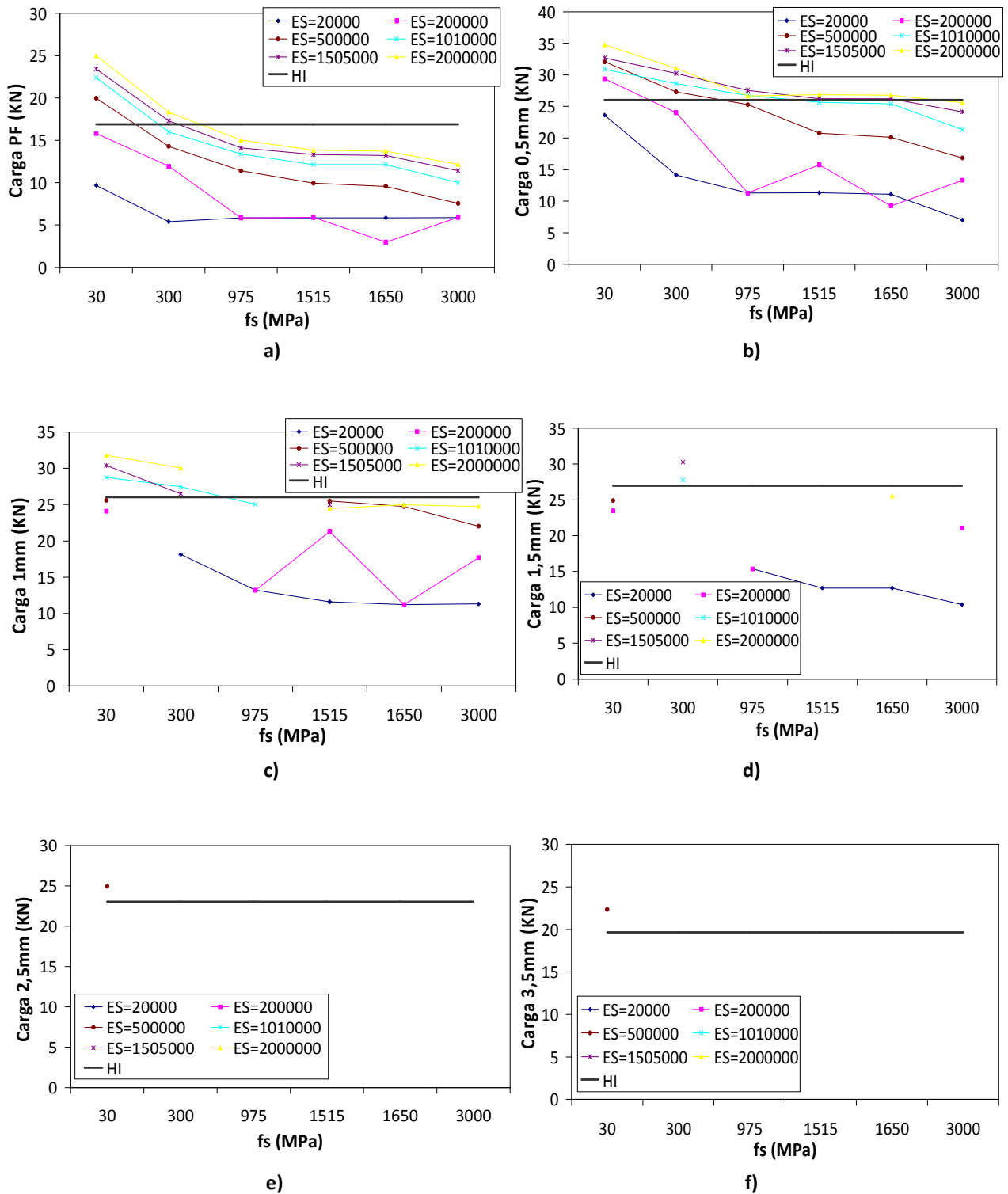
**Tabla C. 1.** Valores de energía y carga para las combinaciones de  $f_s E_s$ , elemento EN14651.

fs		Es		Energía PF (J)	Carga PF (KN)	Energía 0,5mm (J)	Carga 0,5mm (KN)	Energía 1mm (J)	Carga 1mm (KN)	Energía 1,5mm (J)	Carga 1,5mm (KN)	Energía 2,5mm (J)	Carga 2,5mm (KN)	Energía 3,5mm (J)	Carga 3,5mm (KN)
# Variac.	Valor Numérico (MPa)	# Variac.	Valor Numérico (MPa)												
1	30	1	20000	0,27	9,69	9,04	23,63								
2	300	1	20000	0,045	5,41	6,1	14,15	14,22	18,12						
6	975	1	20000	0,052	5,84	3,95	11,29	10,07	13,2	17,22	15,36				
4	1515	1	20000	0,052	5,86	3,18	11,34	9,14	11,6	15,2	12,7				
5	1650	1	20000	0,052	5,86	2,99	11,1	8,34	11,2	14,79	12,68				
3	3000	1	20000	0,05	5,87	1,92	7,02	6,84	11,31	11,72	10,4				
1	30	2	200000	0,43	15,8	12,1	29,38	26,22	24,08	38,75	23,47				
2	300	2	200000	0,34	11,94	10,35	24,01								
6	975	2	200000	0,051	5,84	3,94	11,28	10,06	13,19	17,22	15,35				
4	1515	2	200000	0,053	5,9	7,83	15,74	17,28	21,28						
5	1650	2	200000	0,026	2,97	4,01	9,26	9,13	11,23						
3	3000	2	200000	0,053	5,9	6,37	13,31	14,21	17,69	24,06	21,08				
1	30	3	2000000	0,8	24,98	14,9	34,77	32,03	31,78						
2	300	3	2000000	0,5	18,33	12,9	31,05	28,95	30,04						
6	975	3	2000000	0,42	15,02	11,46	26,65								
4	1515	3	2000000	0,4	13,84	11,12	26,88	23,96	24,47						
5	1650	3	2000000	0,39	13,71	11,05	26,78	23,91	24,98	36,53	25,54				
3	3000	3	2000000	0,35	12,16	10,43	25,6	23	24,75						
1	30	4	1010000	0,7	22,39	13,38	30,87	28,63	28,76						
2	300	4	1010000	0,45	16	11,92	28,64	26,07	27,47	39,86	27,76				
6	975	4	1010000	0,37	13,38	10,97	26,76	23,93	25,04						
4	1515	4	1010000	0,35	12,14	10,4	25,66								
5	1650	4	1010000	0,34	12,14	10,27	25,4								
3	3000	4	1010000	0,3	10,01	9,35	21,33								
1	30	5	1505000	0,76	23,41	14,12	32,68	30,13	30,4						
2	300	5	1505000	0,5	17,3	12,55	30,24	28,46	26,5	42,92	30,27				
6	975	5	1505000	0,4	14,11	11,33	27,54								
4	1515	5	1505000	0,37	13,33	10,87	26,21	23,74	24,98						
5	1650	5	1505000	0,37	13,21	10,79	26,24								
3	3000	5	1505000	0,33	11,41	10	24,15								
1	30	6	500000	0,57	19,96	13,28	32,07	28,23	25,58	40,81	24,91	65,68	24,95	90,24	22,36
2	300	6	500000	0,4	14,29	11,26	27,3								
6	975	6	500000	0,33	11,4	10,14	25,29								
4	1515	6	500000	0,3	9,94	9,36	20,78	21,14	25,49						
5	1650	6	500000	0,29	9,57	9,31	20,12	20,95	24,73						
3	3000	6	500000	0,25	7,55	8,34	16,85	18,55	22,02						
EXPERIMENTAL HORMIGÓN HI				0,67	16,89	10,51	26,02	24,14	26,02	37,86	26,99	63,07	23,05	84,26	19,66





**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.



**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.

**Tabla C. 2.** Valores de energía y carga para las combinaciones de  $f_s E_s$ , elemento ASTM1018.

# Variac.	$f_s$		$E_s$		Energía PF (J)	Carga PF (KN)	Energía 0,5mm (J)	Carga 0,5mm (KN)	Energía 1mm (J)	Carga 1mm (KN)	Energía 1,5mm (J)	Carga 1,5mm (KN)	Energía 2mm (J)	Carga 2mm (KN)	Energía 2,5mm (J)	Carga 2,5mm (KN)
	Valor Numérico (MPa)	# Variac.	Valor Numérico (MPa)	# Variac.												
1	30	1	20000	0,25	12,43	9,12	23,88	22,2	27,43	32,86	19,46	42,78	17,58			
2	300	1	20000	0,24	14,11	4,6	11,52	12,05	18,47	21,89	16,86	28,75	13,86	35,06	12,29	
6	975	1	20000	0,24	14,35	3,05	9,16	7,98	10,33	13,77	12,62	20,63	14,42	26,73	12,44	
4	1515	1	20000	0,24	14,39	2,43	7,34	6,8	9,15	11,95	10,95	17,39	11,68	21,86	9,02	
5	1650	1	20000	0,24	14,4	2,33	6,92	6,61	9,84	11,27	9,35	15,44	6,67	19,2	8,34	
3	3000	1	20000	0,25	14,43	1,74	4,75	4,91	7,71	8,97	8,1	11,52	1,71	12,48	2,14	
1	30	2	200000	0,44	20,19	11,85	27,24	26,07	29,58	41,14	30,04	56,02	19,39			
2	300	2	200000	0,25	14,71	10,3	26,26	24,22	29,13	36,9	25,88	47,22	20,09	57,13	18,25	
6	975	2	200000	0,25	14,54	7,32	19,62	19,26	26,14	29,7	16,84	39,15	20,44	49,39	20,55	
4	1515	2	200000	0,25	14,51	6,27	16,58	16,76	24,62	27,69	16,63	37,99	24,76	49,77	23,46	
5	1650	2	200000	0,25	14,51	6,14	15,95	16,3	24,05	28,95	23,79	38,07	18,02	47,63	20,38	
3	3000	2	200000	0,25	14,49	4,85	11,94	12,5	18,39	23,14	23,9	32,92	17,03	41,92	18,64	
1	30	3	2000000	0,84	26,69	14,31	30,99	29,94	31,55	44,64	29,84	58,52	27,77			
2	300	3	2000000	0,44	22,7	12,67	28,92	27,57	30,66	41,92	25,86	55,24	26			
6	975	3	2000000	0,36	18,67	11,52	26,69	25,29	28,27	39,63	29,2	52,84	19,4			
4	1515	3	2000000	0,35	17,93	11,15	26,42	24,72	27,95	37,46	20,93	28,46	20,87	58,8	20,52	
5	1650	3	2000000	0,34	17,82	11,07	26,66	24,85	28,24	37,16	22,98	48,94	19,18	59,22	21,14	
3	3000	3	2000000	0,26	15,09	10,41	26,13	24,21	28,7	38,5	24,82	50,25	23,93	62,62	25,42	
1	30	4	1010000	0,64	25,33	13,45	30,14	28,95	31,69	44,82	32,26	56,74	24,95			
2	300	4	1010000	0,38	19,7	11,88	26,96	25,87	28,76	40,54	29,81	56,78	30,58	69,62	23,9	
6	975	4	1010000	0,34	17,56	10,88	26,55	24,61	28,44	36,78	23,12	48,72	24,26	59,79	18,39	
4	1515	4	1010000	0,25	15,05	10,39	26,47	24,29	29,12	36,6	24,79	48,03	20,24	57,72	19,11	
5	1650	4	1010000	0,25	15	10,19	26,12	23,9	28,71	36,75	22,72	48,89	26,26	61,61	23,73	
3	3000	4	1010000	0,25	14,76	8,75	23,92	22,08	28,26	34,46	23,24	45,38	19,14	55,12	19,76	
1	30	5	1505000	0,73	26,07	13,87	31,72	29,86	32,39	44,54	29,83	59,47	30,37			
2	300	5	1505000	0,41	21,31	12,18	27,48	26,54	29,09	41,43	30,4	53,78	20,04	65,24	24,86	
6	975	5	1505000	0,35	18,12	11,35	26,89	25,31	28,83	39,67	14,3	50,68	18,42	59,45	12,44	
4	1515	5	1505000	0,34	17,57	10,84	26,54	24,58	27,05	36,66	24,11	46,85	19,4			
5	1650	5	1505000	0,26	15,3	11,02	26,74	25,07	29,2	38,48	25,13	50,71	20,6	61,41	20,33	
3	3000	5	1505000	0,25	14,93	9,87	25,75	23,61	29,73	33,7	17,2	42,19	16,94	49,82	15,57	
1	30	6	500000	0,56	23,8	15,52	28,65	27,38	31,13	43,26	32,31	57,86	16,99			
2	300	6	500000	0,35	17,92	12,18	26,4	24,9	27,84	39,02	28,67	49,21	21,68	60,37	18,05	
6	975	6	500000	0,25	14,85	9,7	25,57	23,25	28,58	37,15	24,31	48,94	23,1	59,2	20,36	
4	1515	6	500000	0,25	14,71	8,59	23,55	21,55	27,11	33,8	23,34	46,24	24,83	57,96	24,27	
5	1650	6	500000	0,25	14,69	8,18	23,25	21,26	27,82	33,08	21,33	41,28	14,63	47,78	11,98	
3	3000	6	500000	0,29	15,8	6,39	17,86	17,36	21,16	27,96	16,86	37,58	20,37			
EXPERIMENTAL HORMIGÓN HI					0,92	24,94	12,03	26,71	25,79	27,02	39,17	26,29	51,6	23,02	57,56	19,82

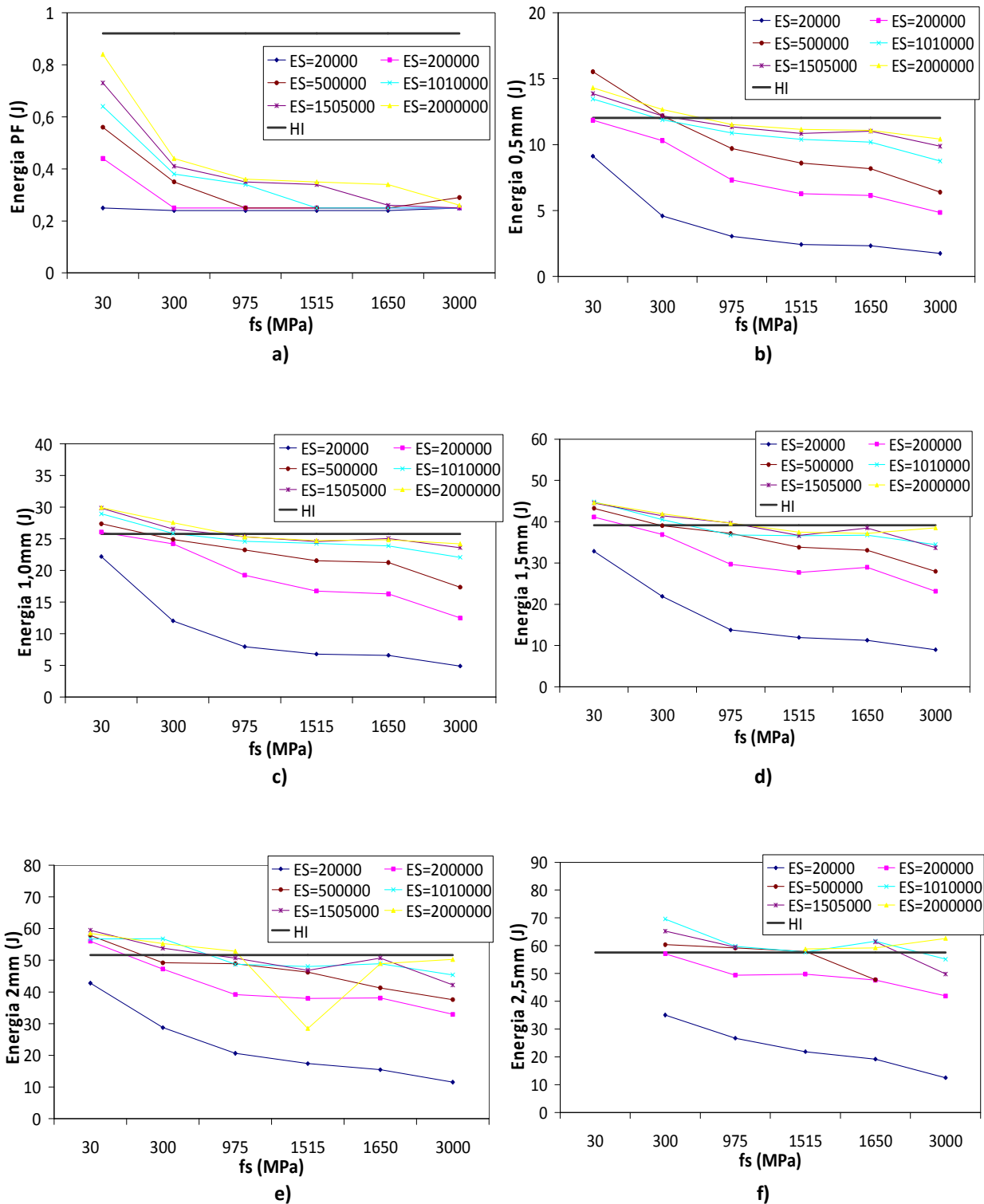
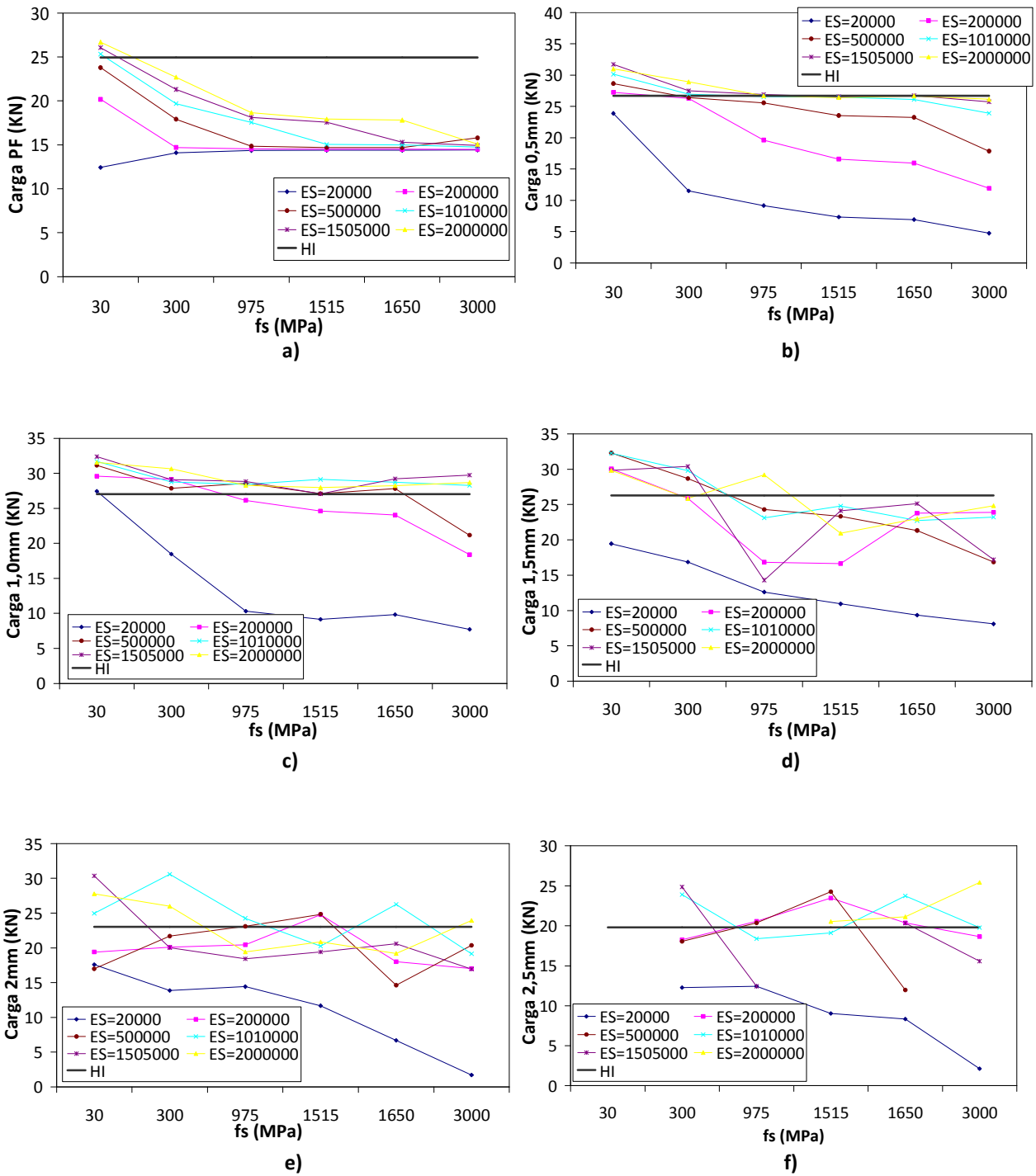


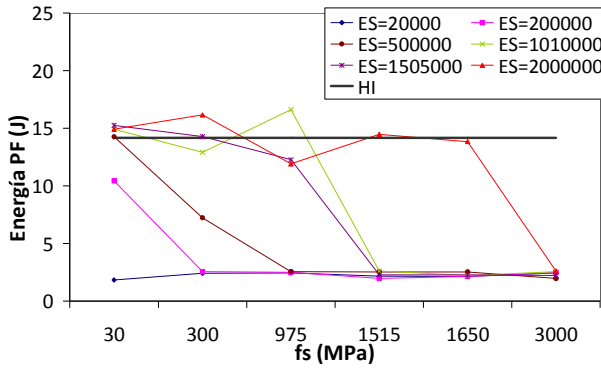
Figura C. 3. Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 0,5 mm (b), 1mm (c), 1,5 mm (d), 2mm (e) y 2,5mm (f) correspondientes a las combinaciones de  $f_s E_s$ , elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.



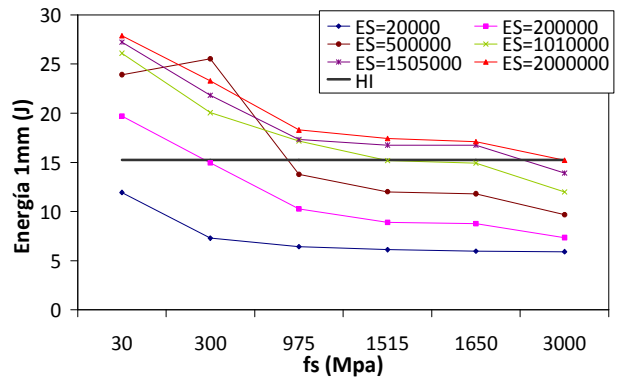
**Figura C. 4.** Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 0,5 mm (b), 1mm (c), 1,5 mm (d), 2mm (e) y 2,5mm (f) correspondientes a las combinaciones de  $f_s E_s$ , elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.

**Tabla C. 3.** Valores de energía y carga para las combinaciones de  $f_s E_s$ , elemento Placa 1.

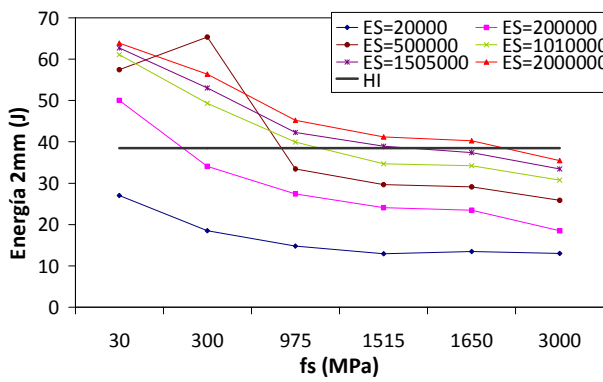
fs		Es		Energía PF (J)	Carga PF (KN)	Energía 1mm (J)	Carga 1mm (KN)	Energía 2mm (J)	Carga 2mm (KN)	Energía 4mm (J)	Carga 4mm (KN)	Energía 6mm (J)	Carga 6mm (KN)	Energía 8mm (J)	Carga 8mm (KN)	Energía 10mm (J)	Carga 10mm (KN)
# Variac.	Valor Numérico (MPa)	# Variac.	Valor Numérico (MPa)														
1	30	1	20000	1,83	11,56	11,94	13,04	27	17,083	67,25	22,94						
2	300	1	20000	2,41	15,03	7,29	8,33	18,49	13,25	43,8	12,06	71,14	14,34	101,26	15,49	134,75	17,8
6	975	1	20000	2,45	15,28	6,43	6,38	14,77	9,66	34,76	10,28	56,12	11,31	79,17	12,02	104,44	12,97
4	1515	1	20000	2,17	14,42	6,12	5,49	12,95	7,86	30,88	9,31	50,16	10,14	71,4	10,9	94,22	11,88
5	1650	1	20000	2,13	14,28	5,97	5,6	13,5	8,71	31,76	9,2	50,73	9,42	70,38	10,11	91,61	10,94
3	3000	1	20000	2,46	15,36	5,92	5,4	13,03	8,31	28,67	7,4	44,8	8,72	63,07	9,21	81,94	9,65
1	30	2	200000	10,45	26,89	19,71	28,11	50,06	31,5	115,71	33,94						
2	300	2	200000	2,55	14,12	14,96	23,68	34,07	19,1	78,43	24,93						
6	975	2	200000	2,51	13,78	10,27	14,38	27,38	16,81	60,82	17,69	99,2	21,1	145,05	24,58		
4	1515	2	200000	1,96	13,74	8,91	11,86	24,07	14,3	54,49	15,5	87,81	18,34	127	21,18		
5	1650	2	200000	2,15	14,4	8,78	11,42	23,43	16,92	53,76	16,09	85,9	17,59	123,43	20,13		
3	3000	2	200000	2,47	15,43	7,35	8,06	18,47	13,8	43,84	13,22	71,18	14,05	101,45	16,39	135,3	17,67
1	30	3	2000000	14,91	33,66	27,87	34,2	63,88	37,71	139,48	38,36						
2	300	3	2000000	16,16	33,77	23,28	31,06	56,35	33,51	125,45	35,45	198,1	36,99	273,42	38	350,91	39,46
6	975	3	2000000	11,91	27,54	18,29	25,12	45,21	28,35	105,06	31,63	170,76	33,9	240,38	35,58	312,71	36,7
4	1515	3	2000000	14,47	27,1	17,42	21,32	41,16	25,11	96,27	29,71	158,56	32,44	225,36	34,23	295,11	35,44
5	1650	3	2000000	13,85	26,46	17,11	21,19	40,24	24,43	94,34	29,23						
3	3000	3	2000000	2,62	14,47	15,22	23,98	35,5	20,03	81,06	25,74	136,41	29,57				
1	30	4	1010000	14,91	32,7	26,1	32,82	61,1	36,86	133,87	37,05	209,69	38,41	288,15	39,91		
2	300	4	1010000	12,93	29,48	20,05	27,58	49,35	30,25	125,45	35,45	198,1	36,99	273,42	38	350,91	39,46
6	975	4	1010000	16,61	27,25	17,16	25,05	39,93	22,97	91,71	28,18	152,04	31,72	217,88	33,82	287,16	35,4
4	1515	4	1010000	2,61	14,43	15,18	23,9	34,71	19,76	79,7	25,2						
5	1650	4	1010000	2,23	14,93	14,93	23,42	34,19	20,26	79	24,66	132,79	28,92				
3	3000	4	1010000	2,55	14,04	12	17,88	30,71	14,68	66,73	20,4	111,46	24,33	163,65	27,54		
1	30	5	1505000	15,26	33,73	27,23	33,79	62,75	36,59	136,7	37,72	213,44	39,14				
2	300	5	1505000	14,28	31,77	21,82	29,48	53,04	32,14								
6	975	5	1505000	12,27	26,91	17,33	22,8	42,24	26,52	99,12	30,24	162,46	33	230,39	34,76	301,31	36,11
4	1515	5	1505000	2,29	15,33	16,76	23,12	38,95	22,99	90,63	28,04						
5	1650	5	1505000	2,28	15,25	16,75	26,31	37,41	21,92	87,05	27,14	145,15	30,61	208,92	32,96	276,36	34,49
3	3000	5	1505000	2,22	14,84	13,91	21,96	33,47	17,8	74,23	23,22	125,16	27,44	183,01	30,28		
1	30	6	500000	14,27	31,69	23,92	31,71	57,49	35,47	127,88	35,98	201,43	37,56				
2	300	6	500000	7,23	29,89	25,53	37	65,38	42,27	154,91	46,27	248,95	47,74	345,99	48,89	444,35	49,4
6	975	6	500000	2,57	14,19	13,78	21,58	33,45	17,67	74,59	23,33	125,61	27,43	183,83	30,43		
4	1515	6	500000	2,54	13,99	12,01	17,93	29,65	16,02	66,39	20,33	110,8	24,2				
5	1650	6	500000	2,54	13,96	11,81	17,38	29,12	15,69	64,57	19,97	107,66	23,28	157,96	26,95		
3	3000	6	500000	1,97	13,82	9,67	13,2	25,84	16,22	57,88	15,86	93,26	19,42	135,19	22,52	183,47	25,59
EXPERIMENTAL HORMIGÓN HI				14,17	23,31	15,26	22,9	38,47	21,74	84,03	22,92	128,66	22,3	171,7	21,23	213	20,01



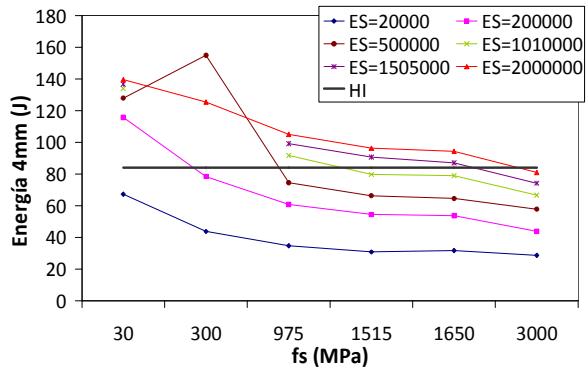
a)



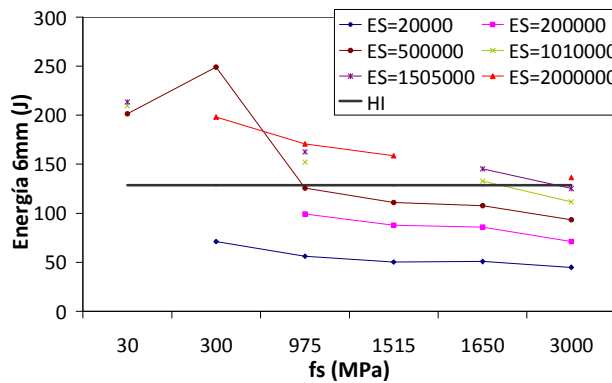
b)



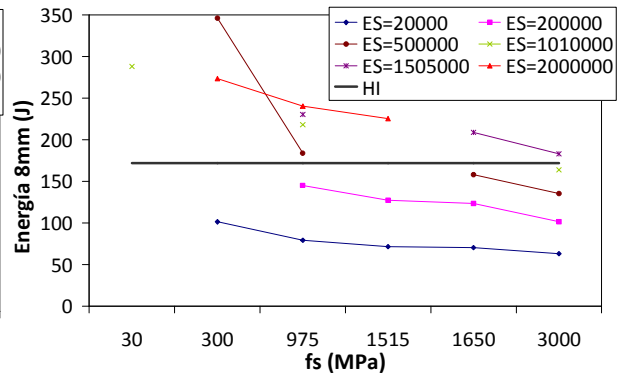
c)



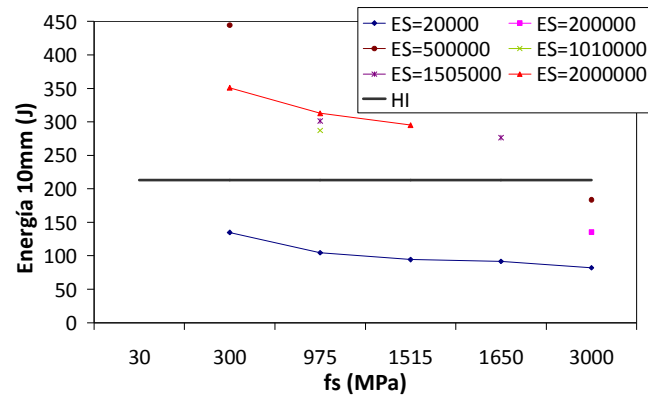
d)



e)

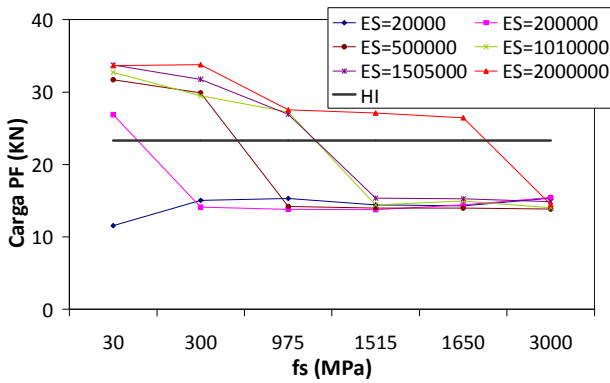


f)

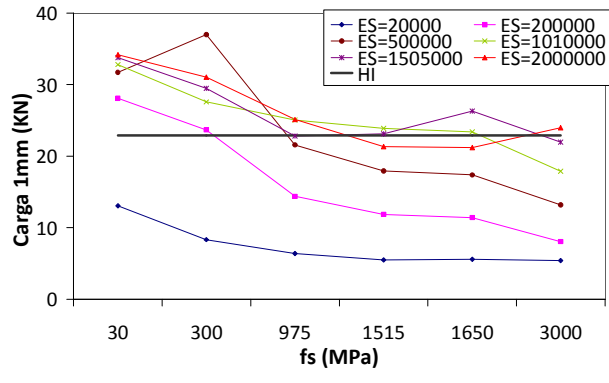


g)

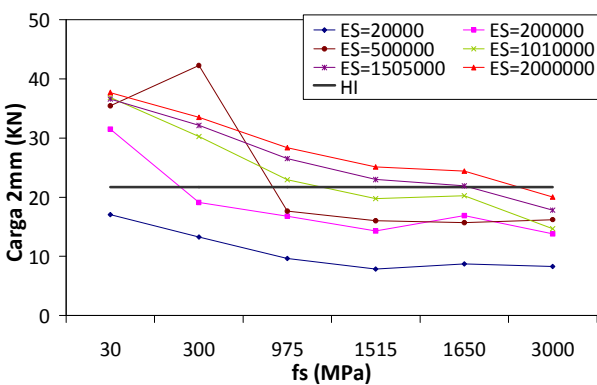
Figura C. 5. Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de  $f_s E_s$ , elemento Placa 1, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.



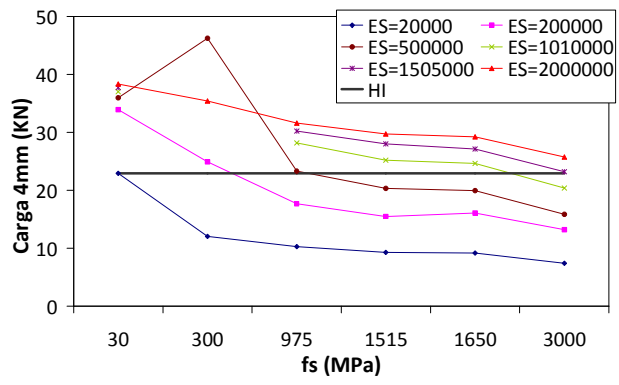
a)



b)

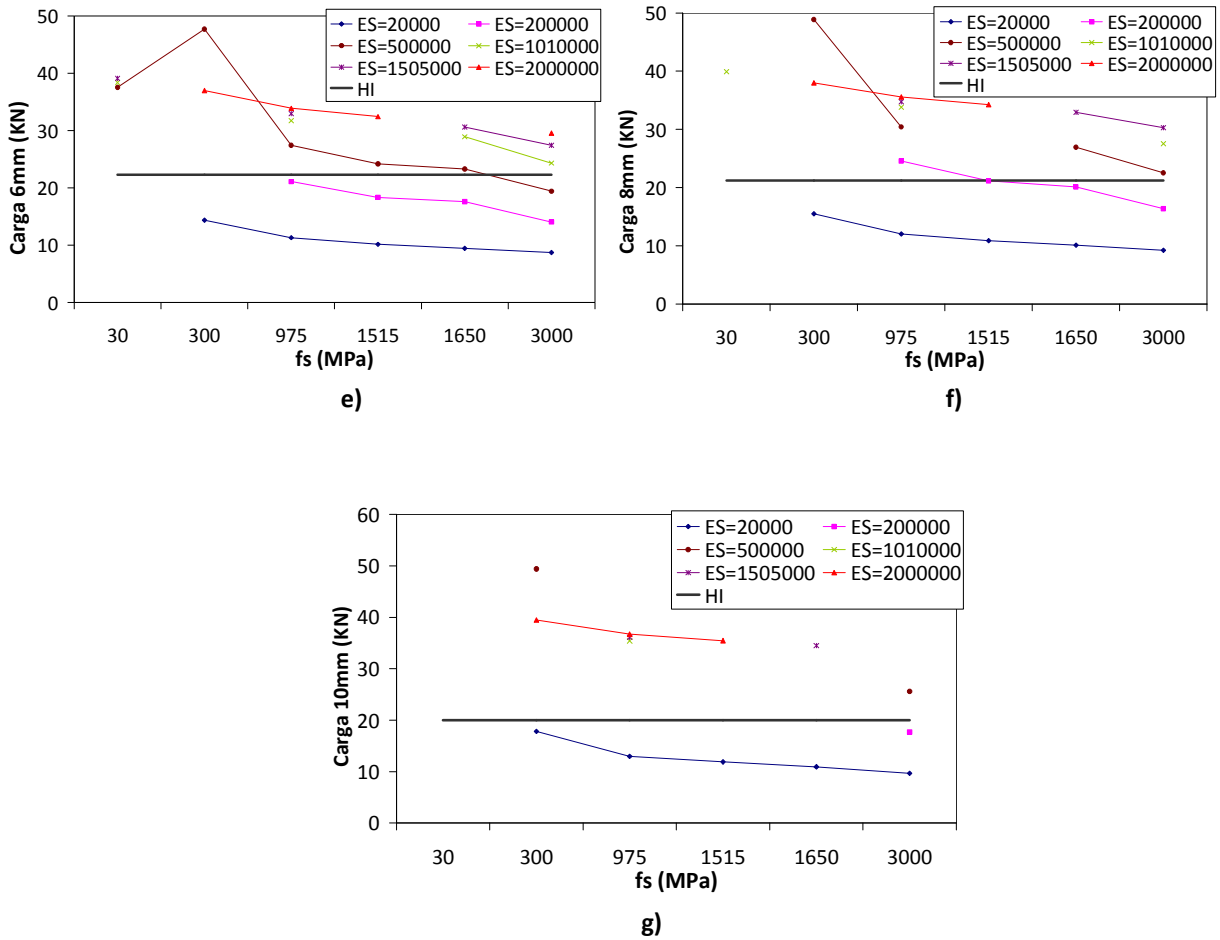


c)



d)

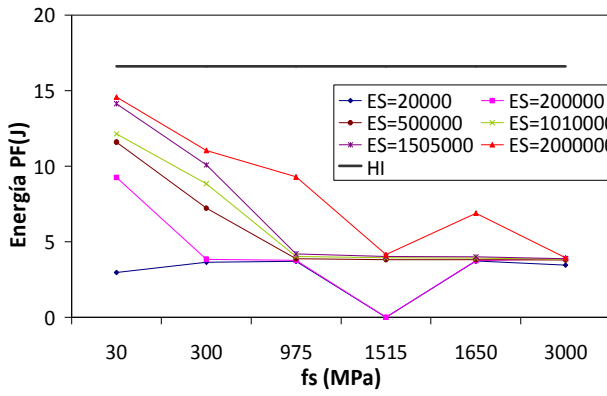




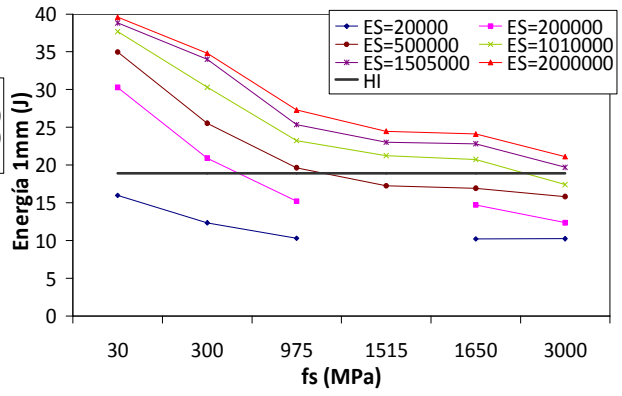
**Figura C. 6.** Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de  $f_s E_s$ , elemento Placa 1, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.

Tabla C. 4. Valores de energía y carga para las combinaciones de  $f_s E_s$ , elemento Placa 2.

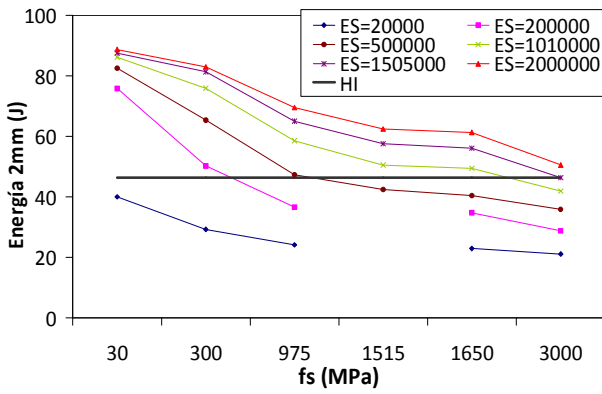
fs		Es		Energía PF (J)	Carga PF (KN)	Energía 1mm (J)	Carga 1mm (KN)	Energía 2mm (J)	Carga 2mm (KN)	Energía 4mm (J)	Carga 4mm (KN)	Energía 6mm (J)	Carga 6mm (KN)	Energía 8mm (J)	Carga 8mm (KN)	Energía 10mm (J)	Carga 10mm (KN)	
# Variac.	Valor Numérico (MPa)	# Variac.	Valor Numérico (MPa)															
1	30	1	20000	2,97	17,68	15,98	22,09	40,06	26,78	106,71	38,48	189,19	43,07	277,02	44,51	366,34	45	
2	300	1	20000	3,66	22,08	12,35	14,91	29,28	18,12	64,68	18,24	103,51	20,5	147,35	23,12	195,22	24,22	
6	975	1	20000	3,72	22,44	10,31	12,06	24,15	14,63	55,05	15,66	87,23	16,34	120,75	17,86	158,08	19,79	
4	1515	1	20000	NO CONVERGE														
5	1650	1	20000	3,73	22,51	10,22	11,33	22,97	13,84	36,94	14,29	82,27	15,34	114,44	17,3	149,85	18,46	
3	3000	1	20000	3,46	21,72	10,25	8,33	21,14	13,03	47,51	13,98	76,28	14,35	106,04	15,51	137,86	16,1	
1	30	2	200000	9,26	37,12	30,28	42,2	75,86	46,63	170,84	48,22	266,06	47,7	362,36	48,62	458,55	48,8	
2	300	2	200000	3,85	23,25	20,91	28,82	50,26	32,61	125,5	41,44	212,61	45,06	302,15	45,49	394,83	46,98	
6	975	2	200000	3,78	22,81	15,22	20,58	36,67	21,36	84,63	26,28	143,9	32,91	215,35	37,66	293,29	40,19	
4	1515	2	200000	NO CONVERGE														
5	1650	2	200000	3,76	22,72	14,72	19,29	34,79	21,33	75,82	21,75	124,41	27,13	183,17	31,92	247,54	31,88	
3	3000	2	200000	3,88	23,12	12,36	13,44	28,84	17,49	63,35	17,92	102,1	20,12	145,39	23,09	194,1	24,94	
1	30	3	2000000	14,58	45,51	39,59	47,03	88,75	49,79	187,86	47,47	285,79	49,53	385,25	50,21	458,87	50,37	
2	300	3	2000000	11,05	43,54	34,82	47,52	82,99	49,04	182,83	50,95	283,95	51,04	387,04	52			
6	975	3	2000000	9,3	33,1	27,29	39,65	69,56	44,34	161,54	47,21	257,17	47,65	353,84	48,7	452,08	48,99	
4	1515	3	2000000	4,15	25,04	24,47	34,54	62,47	40,36	149,97	45,67	241,75	46,71	336,74	48,04	433,53	48,8	
5	1650	3	2000000	6,9	27	24,1	34,06	61,36	39,51	147,4	45,44	240,32	45,72	333,7	47,54	429,78	48,61	
3	3000	3	2000000	3,95	23,84	21,12	28,15	50,59	32,91	126,57	41,84	215,32	45,96	308,66	46,2	400,94	47,31	
1	30	4	1010000	12,14	44,05	37,68	46,14	86,21	48,75	185,6	49,88	284,07	49,62	383,72	49,99	483,55	49,73	
2	300	4	1010000	8,85	35,53	30,3	43,86	75,94	46,39	171,34	48,61	270,09	49,65	367,97	49,57	468,1	50,6	
6	975	4	1010000	4,04	24,42	23,24	31,84	58,58	38,45	142,86	45,14	235,84	47,67	332,22	48,93	430,38	49,3	
4	1515	4	1010000	3,94	23,78	21,25	29,13	50,55	32,11	125,87	41,5	213,71	45,5	306,7	47,02	402,39	48,32	
5	1650	4	1010000	3,92	23,68	20,75	27,61	49,47	30,73	121,42	40,28	207,57	44,77	299,43	46,12	393,29	47,66	
3	3000	4	1010000	3,84	23,2	17,41	24,08	41,96	23,12	96,36	31,27	167,21	38,79	249,48	43,1	337,15	43,57	
1	30	5	1505000	14,14	44,86	38,82	46,29	87,58	48,93	186,86	50,14	286,23	49,82	386,25	49,6	484,14	48,8	
2	300	5	1505000	10,09	40,04	34,01	46,01	81,38	48,34	179,83	49,44	280,62	49,97	380,56	50,38	482,33	51,42	
6	975	5	1505000	4,21	25,4	25,36	36,73	65,05	42,39	154,49	46,33	249,15	48,05	345,93	47,4			
4	1515	5	1505000	4,04	24,41	23,03	31,71	57,59	37,45	140,83	44,72	233,17	47,23	328,63	48,13	425,58	47,3	
5	1650	5	1505000	4,01	24,26	22,82	30,09	56,1	36,73	138,3	44,14	228,54	46,34	323,3	48,2	419,7	48,98	
3	3000	5	1505000	3,89	23,52	19,7	27,88	46,36	27,68	113,31	37,92	195,57	43,46	285,08	45,67	378,2	46,99	
1	30	6	500000	11,6	42,36	34,98	44,84	82,54	48,33	180,22	49,89	279,1	49,2	375,78	48,82	472,94	48,58	
2	300	6	500000	7,23	29,89	25,53	37	65,38	42,27	154,91	46,27	248,95	47,74	345,99	48,89	444,35	49,4	
6	975	6	500000	3,88	23,41	19,65	27,81	47,32	30,27	115,51	38,37	199,16	44,27	289,62	46,2	382,19	46,9	
4	1515	6	500000	3,83	23,12	17,25	23,08	42,46	27,64	99,05	31,45	171	39,79	255,14	43,77	341,9	44,07	
5	1650	6	500000	3,82	23,08	16,93	23,16	40,43	23,23	95,24	30,75	165,59	38,82	247,4	41,77	333,55	43,02	
3	3000	6	500000	3,79	22,87	15,82	19,7	35,87	20,52	80,04	24,24	134,25	30,32	199,8	35,21	270,64	35,15	
EXPERIMENTAL HORMIGÓN HI				16,61	29,1	18,92	29,01	46,38	27,78	102,09	26,99	156,53	27,45	210,73	26,1	259,18	22,76	



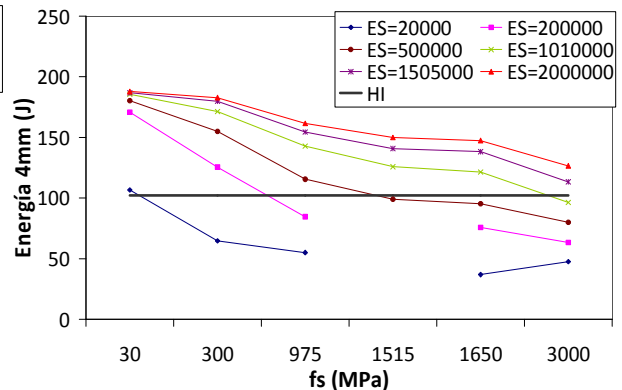
a)



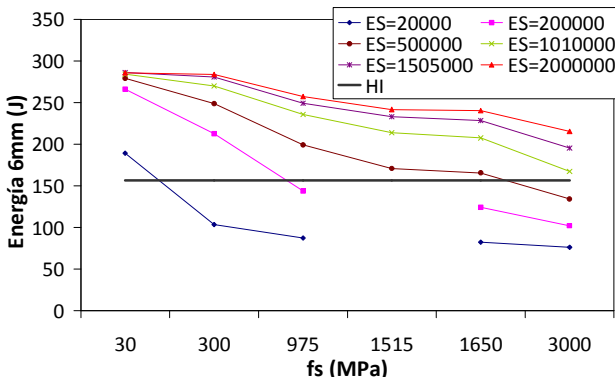
b)



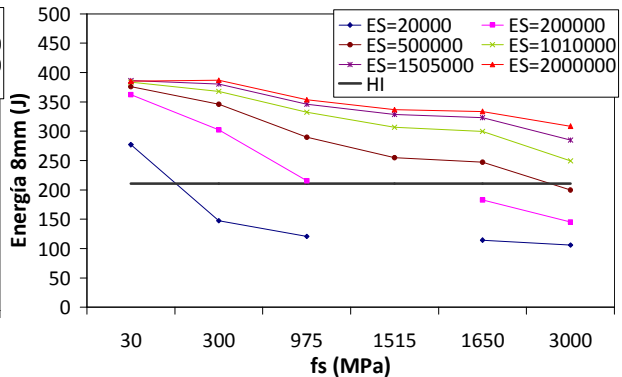
c)



d)



e)



f)

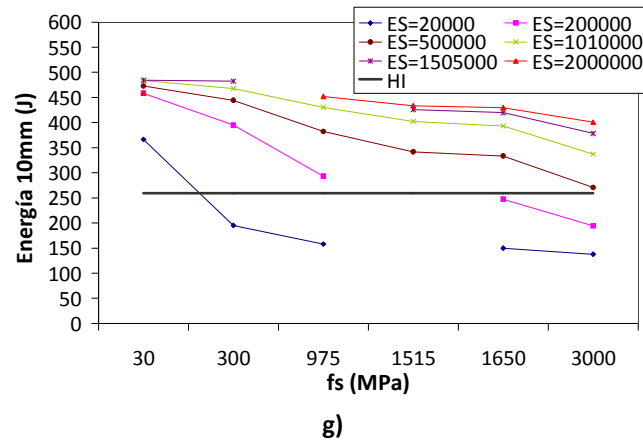
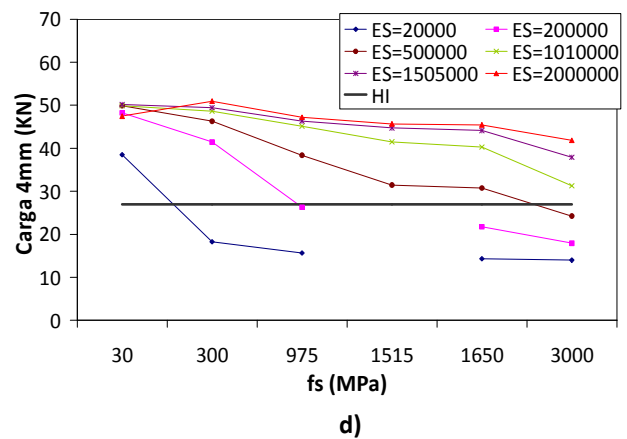
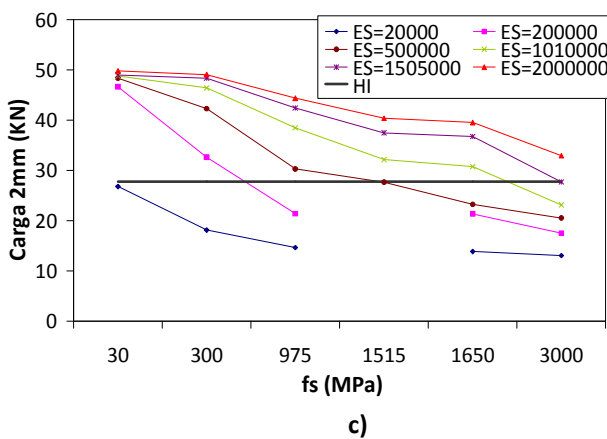
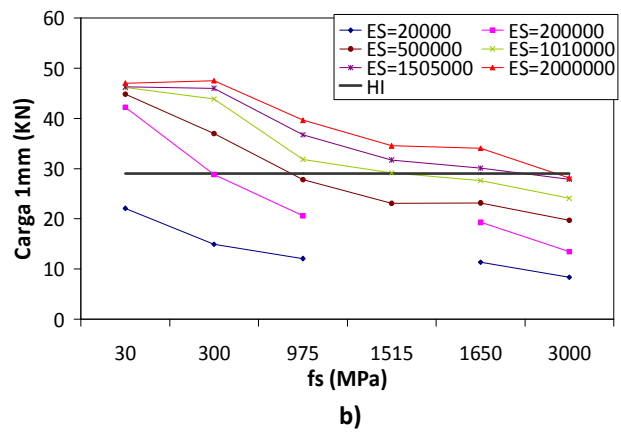
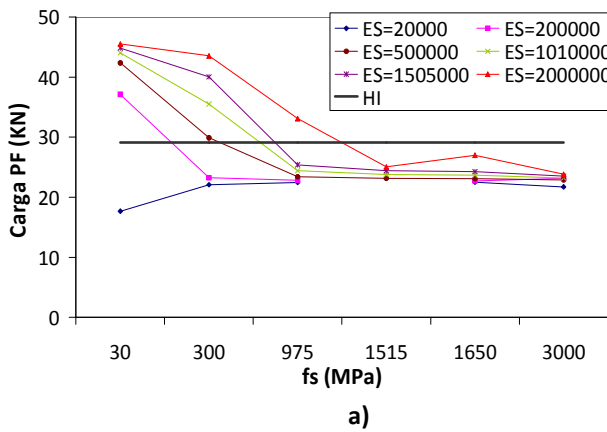
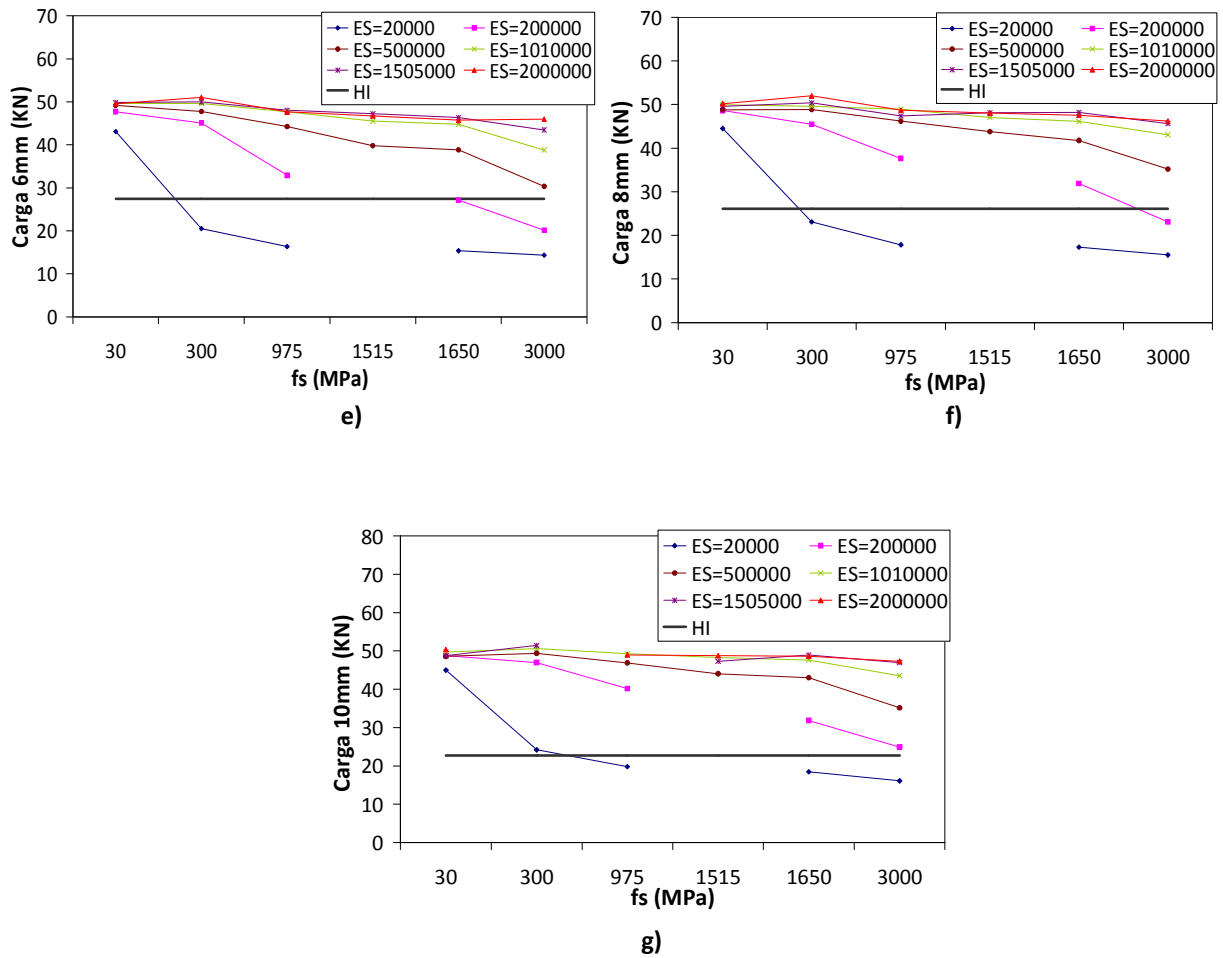


Figura C. 7. Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de  $f_s E_s$ , elemento Placa 2, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.

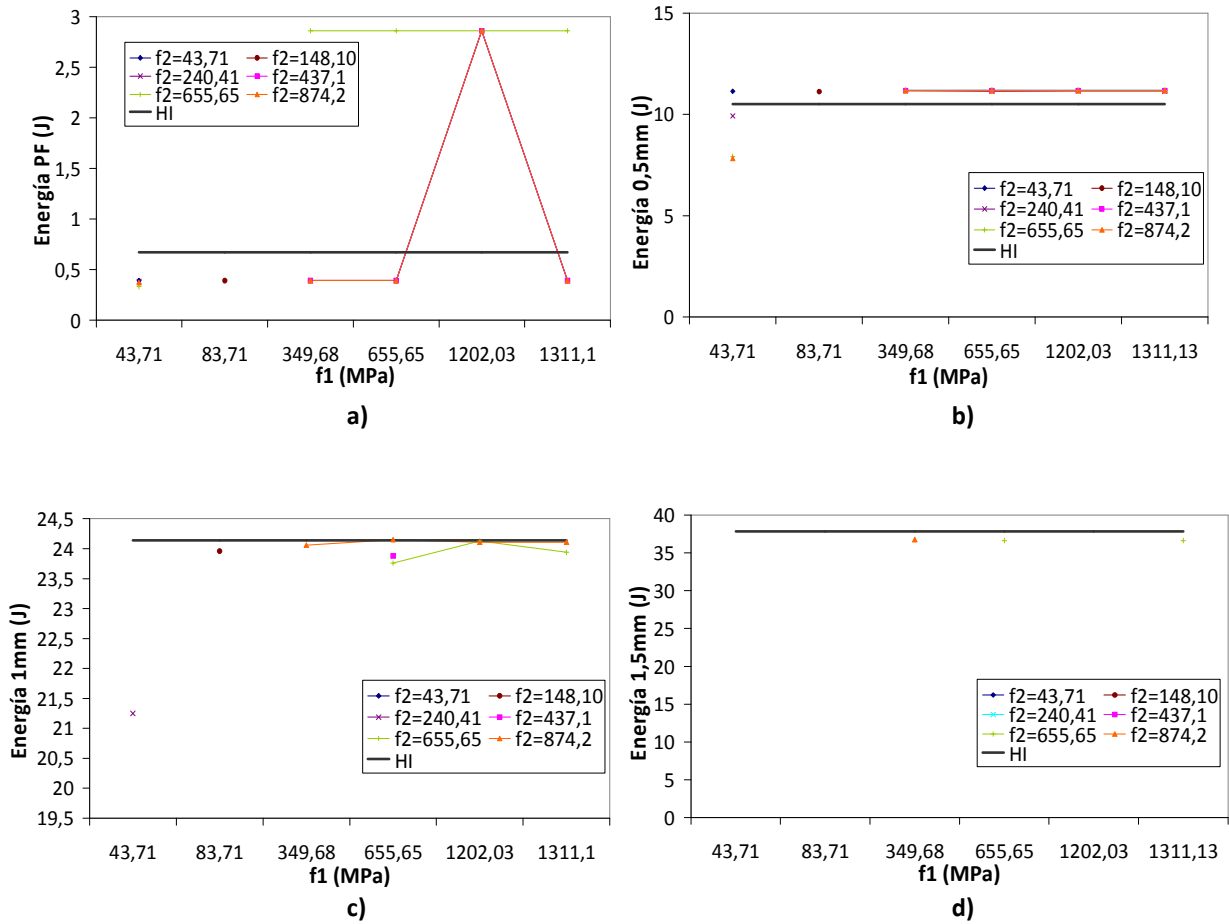




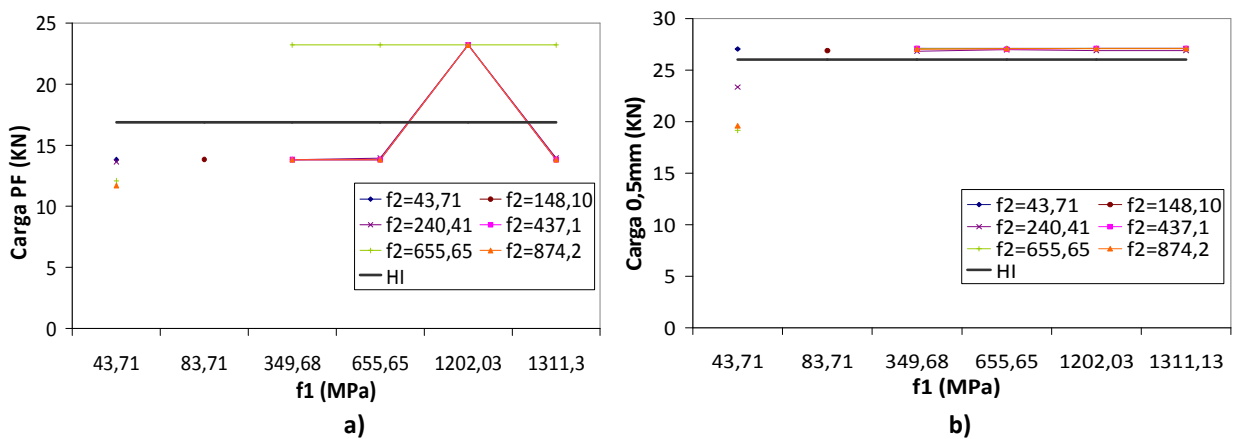
**Figura C. 8.** Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de  $f_s E_s$ , elemento Placa 2, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.

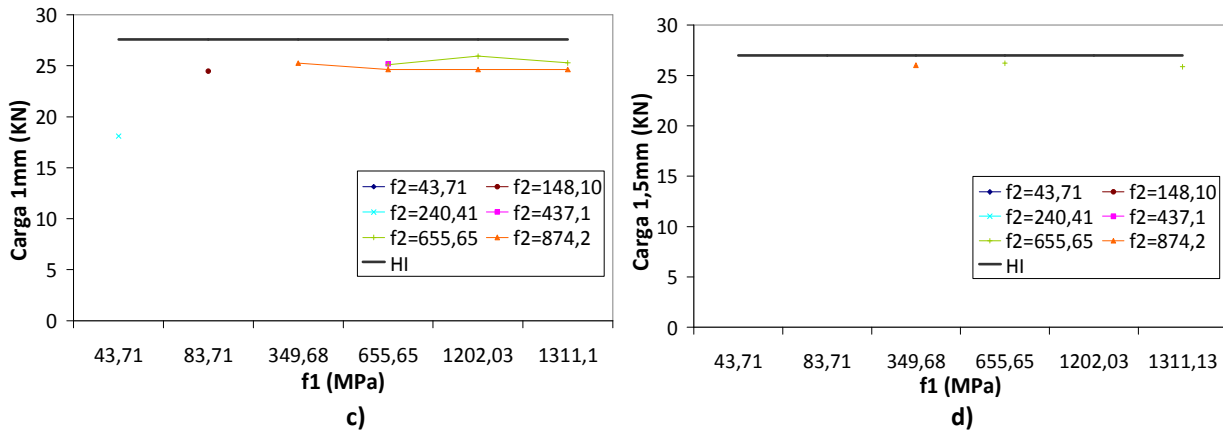
**Tabla C. 5.** Valores de energía y carga para las combinaciones de f1 f2, elemento EN14651.

f1		f2		Energía PF (J)	Carga PF (KN)	Energía 0,5mm (J)	Carga 0,5mm (KN)	Energía 1mm (J)	Carga 1mm (KN)	Energía 1,5mm (J)	Carga 1,5mm (KN)	Energía 2,5mm (J)	Carga 2,5mm (KN)	Energía 3,5mm (J)	Carga 3,5mm (KN)
# Variac.	Valor Numérico (MPa)	# Variac.	Valor Numérico (MPa)												
1	43,71	0	148,10												
0	83,71	0	148,10	0,39	13,84	11,12	26,88	23,96	24,47						
4	349,68	0	148,10												
2	655,65	0	148,10												
3	1202,03	0	148,10												
5	1311,3	0	148,10												
1	43,71	1	43,71	0,39	13,82	11,14	27,05								
0	83,71	1	43,71												
4	349,68	1	43,71	0,39	13,82	11,18	27,1								
2	655,65	1	43,71	0,39	13,82	11,18	27,09								
5	1202,03	1	43,71	2,86	23,22	11,18	27,09								
3	1311,3	1	43,71	0,39	13,82	11,18	27,09								
1	43,71	2	437,10												
0	83,71	2	437,10												
4	349,68	2	437,10	0,39	13,82	11,17	27,1								
2	655,65	2	437,10	0,39	13,82	11,17	27	23,88	25,19						
5	1202,03	2	437,10	2,86	23,22	11,17	27,09								
3	1311,3	2	437,10	0,39	13,82	11,17	27,1								
1	43,71	3	874,20	0,37	11,7	7,83	19,58								
0	83,71	3	874,20												
4	349,68	3	874,20	0,39	13,82	11,17	27,02	24,06	25,26	36,78	26,02				
2	655,65	3	874,20	0,39	13,82	11,17	27,08	24,15	24,64						
5	1202,03	3	874,20	2,86	23,22	11,17	27,08	24,11	24,63						
3	1311,3	3	874,20	0,39	13,82	11,17	27,08	24,11	24,63						
1	43,71	4	240,41	0,38	13,65	9,92	23,35	21,25	18,1						
0	83,71	4	240,41												
4	349,68	4	240,41	0,39	13,82	11,17	26,83								
2	655,65	4	240,41	0,39	13,96	11,14	26,96								
5	1202,03	4	240,41	2,86	23,22	11,16	26,89								
3	1311,3	4	240,41	0,39	13,96	11,15	26,89								
1	43,71	5	655,65	0,33	12,09	7,92	19,14								
0	83,71	5	655,65												
4	349,68	5	655,65	2,86	23,22	11,17	27,07								
2	655,65	5	655,65	2,86	23,22	11,18	27,08	23,76	25,11	36,63	26,22				
5	1202,03	5	655,65	2,86	23,22	11,17	27,09	24,13	25,93						
3	1311,3	5	655,65	2,86	23,22	11,17	27,09	23,94	25,27	36,64	25,87				
EXPERIMENTAL HORMIGÓN HI				0,67	16,89	10,51	26,02	24,14	26,02	37,86	26,99	63,07	23,05	84,26	19,66



**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.





**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 f1 f2, elemento EN14651, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.



**Tabla C. 6.** Valores de energía y carga para las combinaciones de f1 f2, elemento ASTM1018.

f1		f2		Energía PF (J)	Carga PF (KN)	Energía 0,5mm (J)	Carga 0,5mm (KN)	Energía 1mm (J)	Carga 1mm (KN)	Energía 1,5mm (J)	Carga 1,5mm (KN)	Energía 2mm (J)	Carga 2mm (KN)	Energía 2,5mm (J)	Carga 2,5mm (KN)
# Variac.	Valor Numérico (MPa)	# Variac.	Valor Numérico (MPa)												
1	43,71	0	148,10												
0	83,71	0	148,10	0,34	17,93	11,15	26,42	24,72	27,95	37,46	20,93	48,46	20,87	58,8	20,52
4	349,68	0	148,10												
2	655,65	0	148,10												
3	1202,03	0	148,10												
5	1311,3	0	148,10												
1	43,71	1	43,71	0,34	17,93	11,14	26,34	24,68	27,77	37,21	24,9	49,29	22,65	59,8	19,92
0	83,71	1	43,71												
4	349,68	1	43,71	0,35	17,93	11,17	26,42	24,78	27,93	38,51	23,84	50,03	23,96	62,18	24,55
2	655,65	1	43,71	0,31	16,87	11,13	26,4	24,73	27,83	38,02	22,51	50,31	26,07	65,75	33,79
5	1202,03	1	43,71	0,35	17,93	11,17	26,42	24,78	27,92	38,46	23,63	49,87	24,02	62,03	24,55
3	1311,30	1	43,71	0,35	17,93	11,17	26,42	24,78	27,92	38,46	23,44	49,87	24,02	62,03	24,56
1	43,71	2	437,10	0,31	15,18	8,32	16,53	10,18	7,84	14,2	8,23				
0	83,71	2	437,10												
4	349,68	2	437,10	0,35	17,93	11,17	26,42	24,78	28,01	39	28,86	51,76	23,78	64,04	22,81
2	655,65	2	437,10	0,35	17,93	11,17	26,42	24,78	28,01	39	28,88	51,65	24,64	63,72	24,35
5	1202,03	2	437,10	0,35	17,93	11,17	26,42	24,78	28,01	39	28,89	51,77	23,46	62,47	21,7
3	1311,3	2	437,10	0,31	16,87	11,13	26,4	24,73	27,81	38,8	28,11	51,57	25,87	63,62	24,07
1	43,71	3	874,20	0,34	14,54										
0	83,71	3	874,20												
4	349,68	3	874,20	0,35	17,9	11,17	26,42	24,79	28,01	39,02	28,91	52,24	23,5	63,68	22,68
2	655,65	3	874,20	0,35	17,9	11,17	26,42	24,78	28,01	39	28,86	51,97	25,5	64,14	23,08
5	1202,03	3	874,20	0,35	17,9	11,17	26,42	24,78	28	39	28,88	51,61	24,13	63,63	24,18
3	1311,3	3	874,20	0,35	17,93	11,17	26,42	24,78	28,01	39	28,86	51,61	25,16	63,66	24,48
1	43,71	4	240,41	0,34	16,38	9,58	21,64	18,97	16,69	27,8	18,38	36,97	18,39		
0	83,71	4	240,41												
4	349,68	4	240,41	0,35	17,93	11,17	26,42	24,78	28	39	28,87	51,36	24,39	64	25
2	655,65	4	240,41	0,35	17,93	11,17	26,42	24,78	28	39	28,88	51,97	23,3	64,14	24,35
5	1202,03	4	240,41	0,35	17,93	11,17	26,42	24,78	28	39	28,88	51,36	22,85	63,3	24,39
3	1311,3	4	240,41	0,35	17,93	11,17	26,42	24,78	28	39	28,88	51,93	25,2	64,83	23,54
1	43,71	5	655,65	0,23	12,89	8,35	17,97	16,12	15,6	23,96	15,55	31,2	13,73	38,17	14,54
0	83,71	5	655,65												
4	349,68	5	655,65	0,31	16,99	11,17	26,6	24,97	28,3	39,24	24,28	51,87	25,31	64,22	27,87
2	655,65	5	655,65	0,35	17,93	11,17	26,42	24,78	28	39	28,88	52,06	25,99	64,14	24,01
5	1202,03	5	655,65	0,35	17,93	11,17	26,42	24,78	28,01	39	28,89	52,63	25,34	65,16	17,59
3	1311,3	5	655,65	0,35	17,93	11,17	26,42	24,78	28	39	28,89	52,49	24,55	65,02	27,2
EXPERIMENTAL HORMIGÓN HI				0,92	24,94	12,03	26,71	25,79	27,02	39,17	26,29	51,6	23,02	57,56	19,82

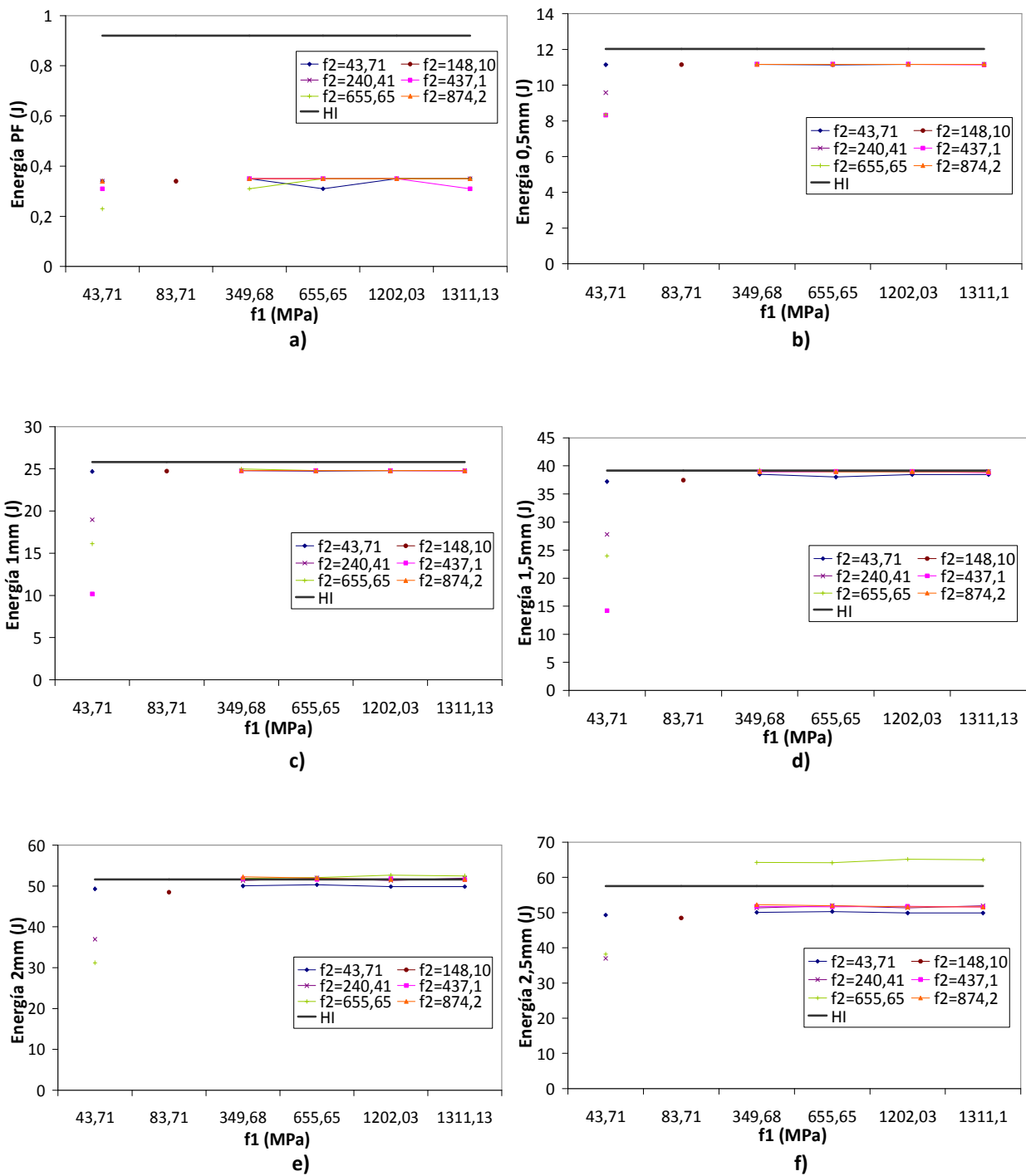
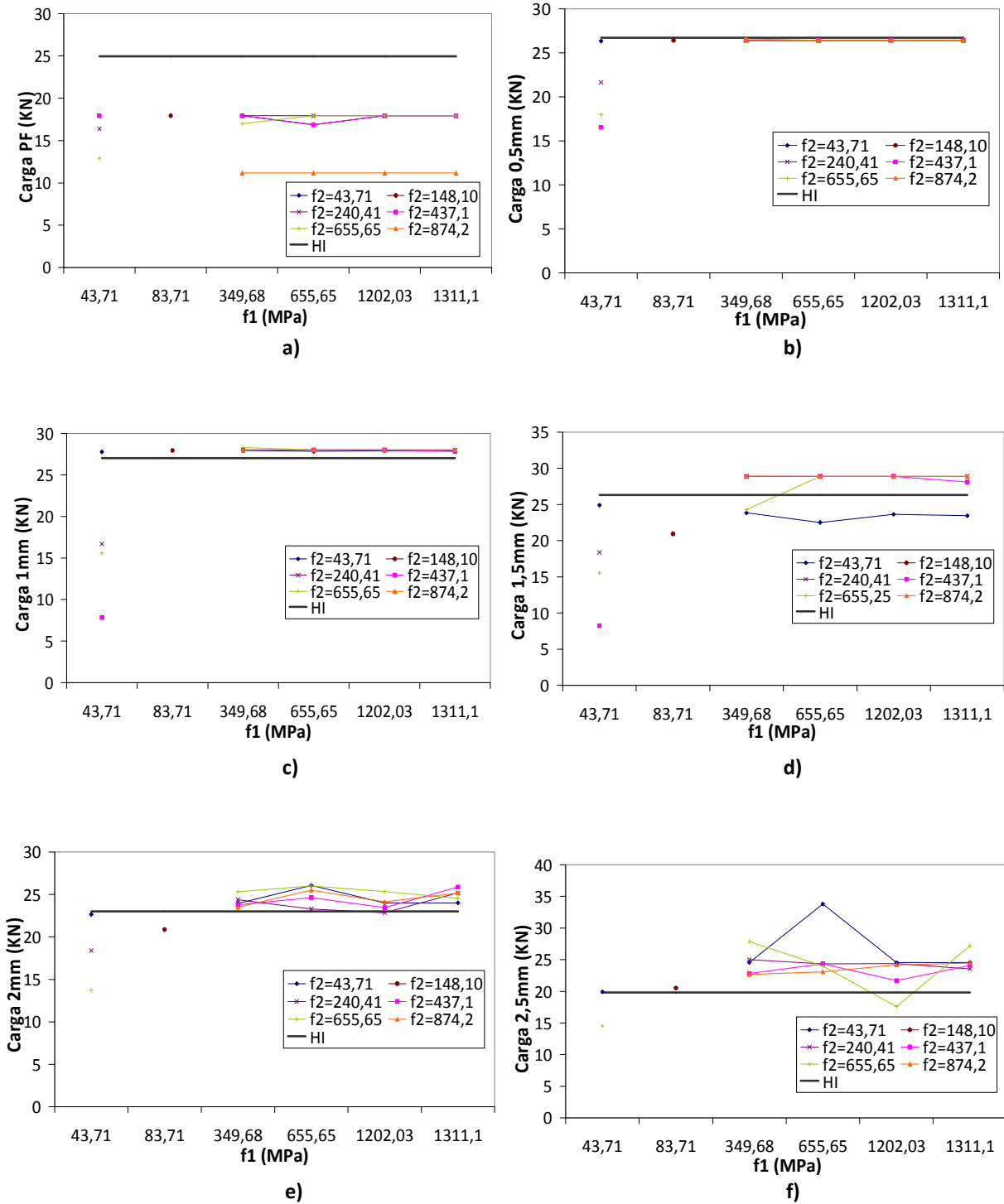


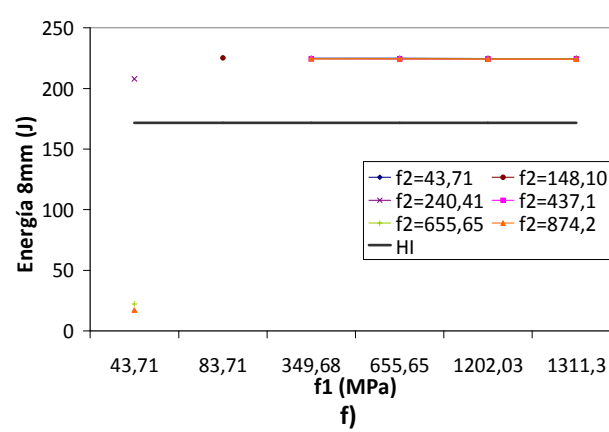
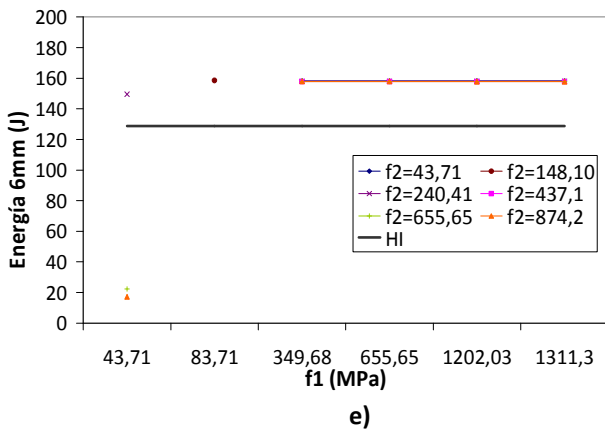
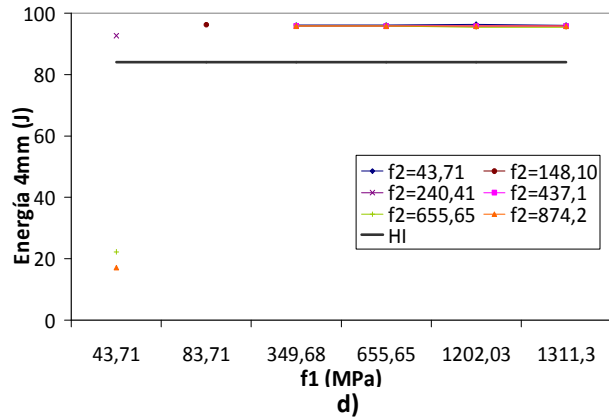
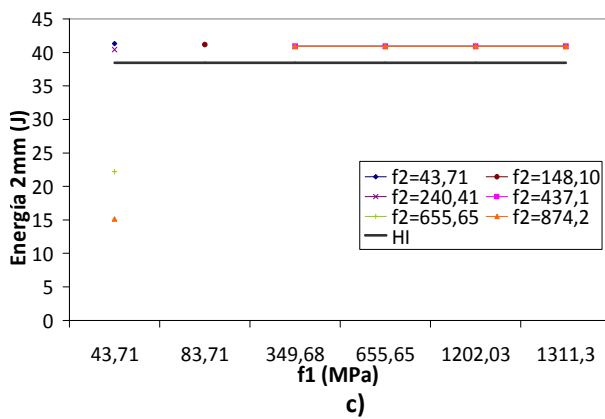
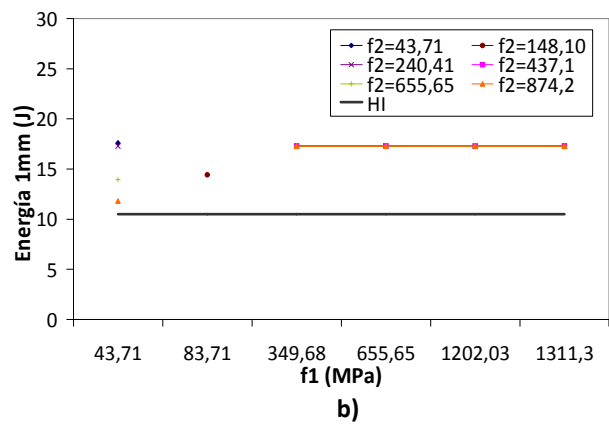
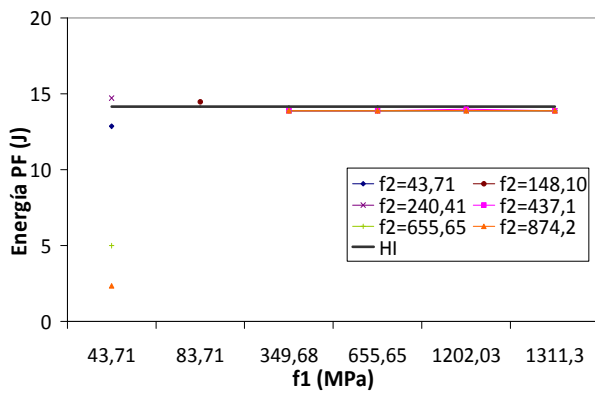
Figura C. 11. Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 0,5 mm (b), 1mm (c), 1,5 mm (d), 2mm (e) y 2,5mm (f) correspondientes a las combinaciones de  $f_1$   $f_2$ , elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.

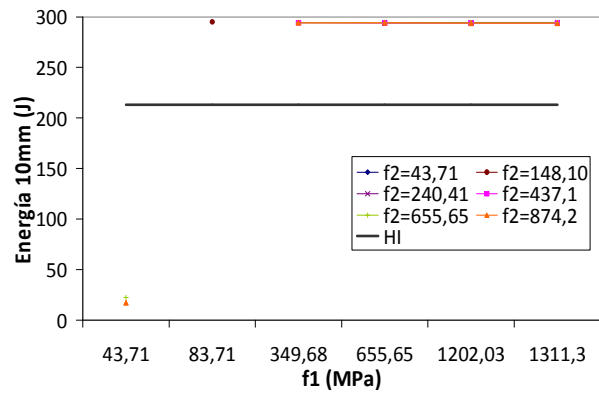


**Figura C. 12.** Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 0,5 mm (b), 1mm (c), 1,5 mm (d), 2mm (e) y 2,5mm (f) correspondientes a las combinaciones de f1 f2, elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.

**Tabla C. 7.** Valores de energía y carga para las combinaciones de f1 f2, elemento Placa 1.

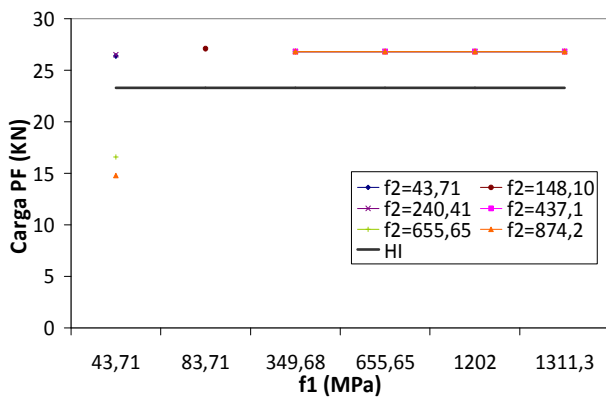
f1		f2		Energía PF (J)	Carga PF (KN)	Energía 1mm (J)	Carga 1mm (KN)	Energía 2mm (J)	Carga 2mm (KN)	Energía 4mm (J)	Carga 4mm (KN)	Energía 6mm (J)	Carga 6mm (KN)	Energía 8mm (J)	Carga 8mm (KN)	Energía 10mm (J)	Carga 10mm (KN)
# Variac.	Valor Numérico (MPa)	# Variac.	Valor Numérico (MPa)														
1	43,71	0	148,10														
0	83,71	0	148,10	14,47	27,1	14,42	21,31	41,16	25,11	96,26	29,7	158,56	32,43	225,35	34,22	295,11	35,44
4	349,68	0	148,10														
2	655,65	0	148,10														
5	1202,03	0	148,10														
3	1311,3	0	148,10														
1	43,71	1	43,71	12,87	26,39	17,6	21,11	41,31	24,88								
0	83,71	1	43,71														
4	349,68	1	43,71	13,89	26,82	17,28	21,41	40,94	25,11	96,14	29,56	158,21	32,37	224,92	34,15		
2	655,65	1	43,71	13,89	26,82	17,28	21,41	40,94	25,11	96,13	29,65	158,22	32,36	224,95	34,2		
5	1202,03	1	43,71	13,89	26,82	17,28	21,4	40,94	25,11	96,41	29,6	158,15	32,3	224,87	34,1		
3	1311,3	1	43,71	13,89	26,82	17,26	21,41	40,94	25,11	96,12	29,6	158,15	32,3	224,87	34,1		
1	43,71	2	437,10	NO CONVERGE													
0	83,71	2	437,10														
4	349,68	2	437,10	13,89	26,82	17,29	21,39	40,9	24,69	95,84	29,58	157,86	32,29	224,46	34,08	294,14	35,53
2	655,65	2	437,10	13,89	26,82	17,29	21,39	40,9	24,69	95,82	29,57	157,77	32,3	224,23	34	293,7	35,45
5	1202,03	2	437,10	13,99	26,82	17,28	21,4	40,9	24,69	95,82	29,56	157,77	32,3	224,29	34	293,7	35,46
3	1311,3	2	437,10	13,89	26,82	17,29	21,39	40,9	24,69	95,82	29,57	157,77	32,29	224,23	33,98	293,72	35,47
1	43,71	3	874,20	2,35	14,79	11,8	6,48	15,13	3,53	17,09	0,061	17,23	0,001	17,23	0,001	17,23	0,001
0	83,71	3	874,20														
4	349,68	3	874,20	13,89	26,82	17,28	21,39	40,9	24,69	95,84	29,58	157,89	32,3	224,5	34,11	294,19	35,53
2	655,65	3	874,20	13,89	26,82	17,28	21,39	40,9	24,69	95,84	29,58	157,89	32,3	224,5	34,11	294,19	35,51
5	1202,03	3	874,20	13,9	26,82	17,28	21,39	40,9	24,69	95,82	29,54	157,77	32,24	224,22	34,03	293,7	35,46
3	1311,3	3	874,20	13,89	26,82	17,28	21,39	40,9	24,69	95,82	29,54	157,77	32,24	224,24	34,03	293,7	35,46
1	43,71	4	240,41	14,72	26,52	17,29	20,64	40,43	24,18	92,68	27,65	149,57	29,1	208,02	29,1		
0	83,71	4	240,41														
4	349,68	4	240,41	13,89	26,82	17,29	21,38	40,9	24,69	95,86	29,62	158	32,32	224,7	34,13		
2	655,65	4	240,41	13,89	26,82	17,29	21,38	40,9	24,69	95,86	29,63	158	32,33	224,7	34,15	294,28	35,35
5	1202,3	4	240,41	13,89	26,82	17,29	21,38	40,9	24,69	95,86	29,62	158	32,31	224,7	34,14	294,32	35,33
3	1311,3	4	240,41	13,89	26,82	17,29	21,38	40,9	24,69	95,86	29,63	158	32,31	224,7	34,14	294,31	35,35
1	43,71	5	655,65	5	16,58	13,95	14,93	22,19	0,0168	22,23	0,017	22,27	0,022	22,33	0,028	22,39	0,035
0	83,71	5	655,65														
4	349,68	5	655,65	13,89	26,82	17,28	21,38	40,9	24,69	95,84	29,58	157,89	32,3	224,51	34,11	294,2	35,54
2	655,65	5	655,65	13,89	26,82	17,28	21,39	40,9	24,69	95,84	29,58	157,89	32,3	224,5	34,12	294,19	35,53
5	1202,03	5	655,65	13,89	26,82	17,28	21,39	40,9	24,69	95,49	29,59	157,89	32,3	224,5	34,09	294,2	35,52
3	1311,3	5	655,65	13,89	26,82	17,28	21,39	40,9	24,69	95,49	29,59	157,89	32,3	224,5	34,09	294,2	35,52
EXPERIMENTAL HORMIGÓN HI				14,17	23,31	15,26	22,9	38,47	21,74	84,03	22,92	128,66	22,3	171,7	21,23	213	20,01



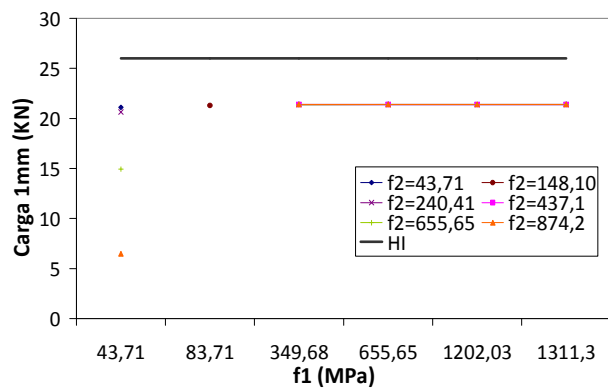


g)

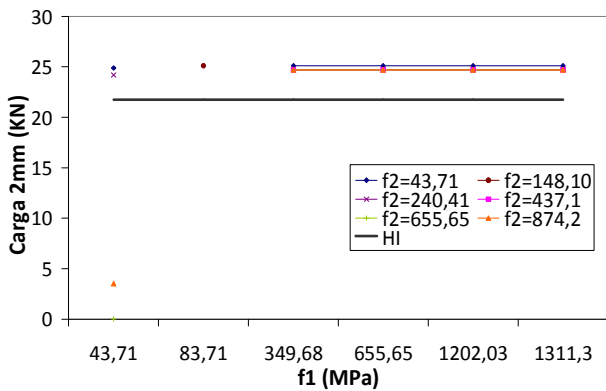
**Figura C. 13.** Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de f1 f2, elemento Placa 1, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.



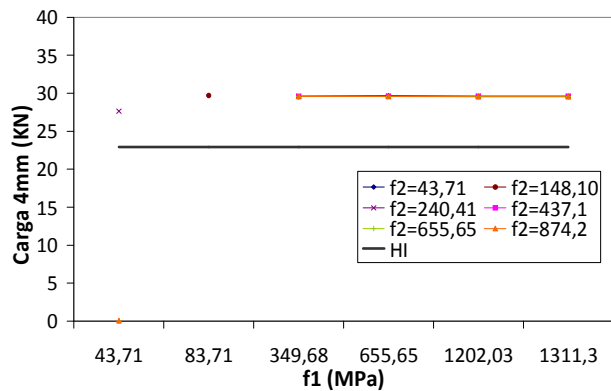
a)



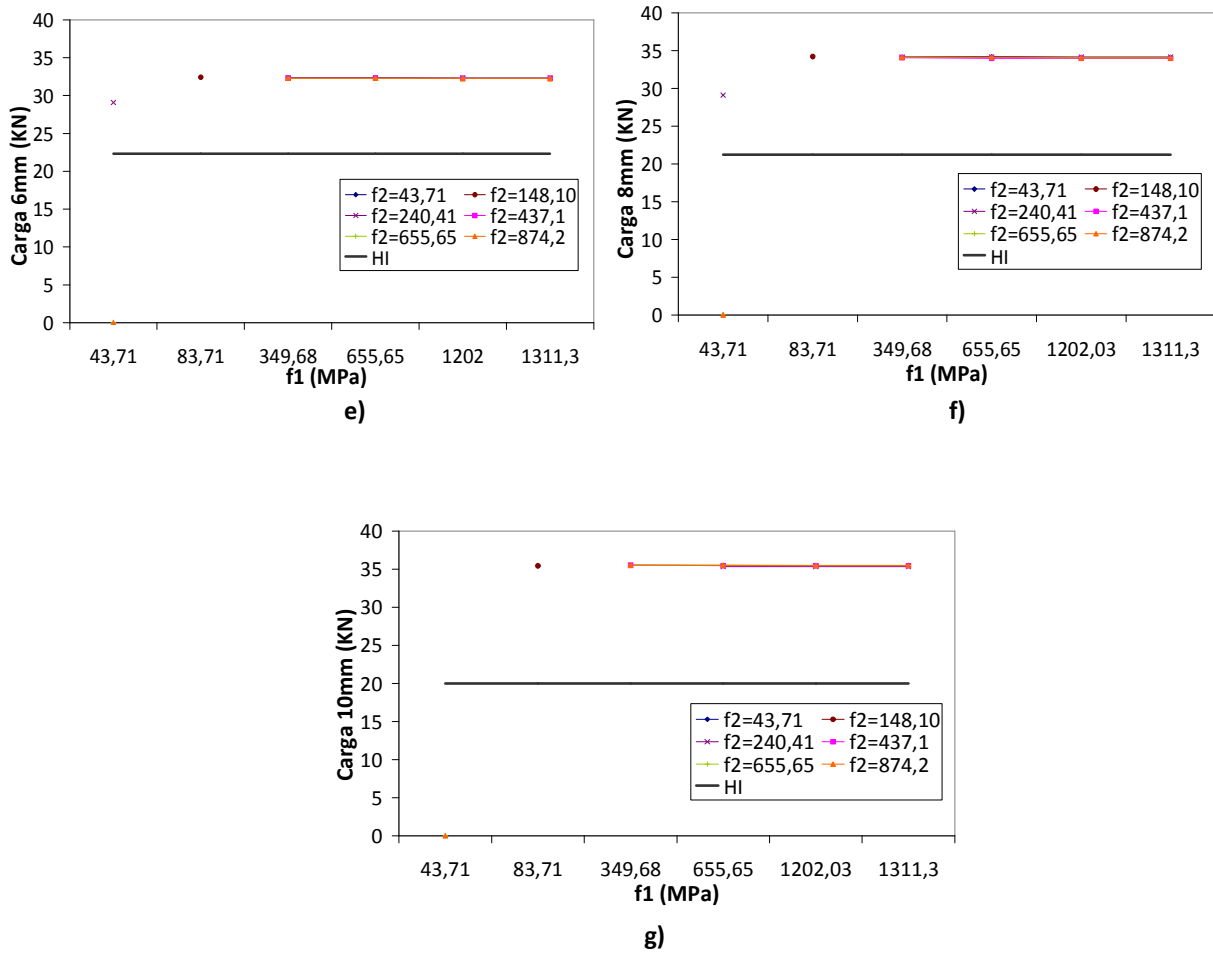
b)



c)



d)

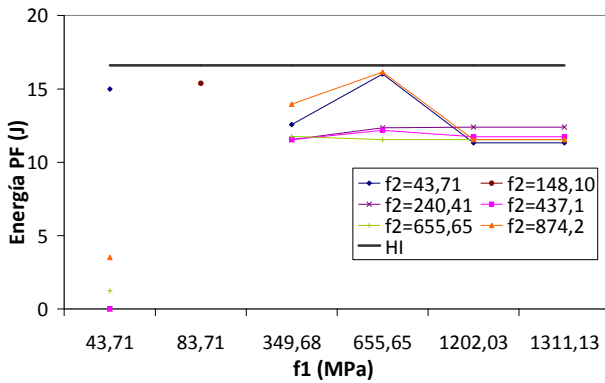


**Figura C. 14.** Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de  $f_1$   $f_2$ , elemento Placa 1, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.

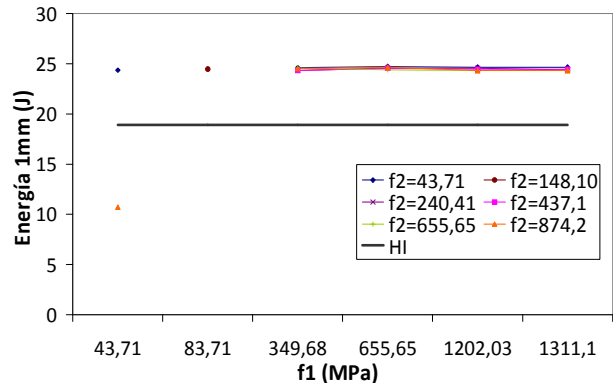
**Tabla C. 8.** Valores de energía y carga para las combinaciones de f1 f2, elemento Placa 2.

f1		f2		Energía PF (J)	Carga PF (KN)	Energía 1mm (J)	Carga 1mm (KN)	Energía 2mm (J)	Carga 2mm (KN)	Energía 4mm (J)	Carga 4mm (KN)	Energía 6mm (J)	Carga 6mm (KN)	Energía 8mm (J)	Carga 8mm (KN)	Energía 10mm (J)	Carga 10mm (KN)
# Variac.	Valor Numérico (MPa)	# Variac.	Valor Numérico (MPa)														
1	43,71	0	148,10														
0	83,71	0	148,10	15,38	32,57	24,47	34,54	62,47	40,36	149,97	45,67	241,75	46,71	336,74	48,04	433,53	48,8
4	349,68	0	148,10														
2	655,65	0	148,10														
3	1202,03	0	148,10														
5	1311,3	0	148,10														
1	43,71	1	43,71	14,98	32,11	24,37	34,9	62,33	41,23	148,45	44,78	239,48	45,94	332,99	47,18	428,61	48,42
0	83,71	1	43,71														
4	349,68	1	43,71	12,56	32,38	24,62	36,17	63,13	41,07	152,12	46,66	246,59	48,07	342,85	48,52	440,62	49,11
2	655,65	1	43,71	16,02	33,43	24,73	35,28	63,31	41	152,04	46,52	246,56	48,29	343,52	48,88	442,28	50,13
5	1202,03	1	43,71	11,32	32,57	24,66	34,83	63,11	40,83	151,97	46,63	246,86	48,36	344,53	49,29	442,8	49,73
3	1311,3	1	43,71	11,32	32,57	24,66	34,83	63,11	40,83	151,98	46,53	246,86	48,32	344,43	49,59	443,68	50,08
1	43,71	2	437,10														
0	83,71	2	437,10														
4	349,68	2	437,10	11,54	31,27	24,33	35,17	62,69	40,11	151,35	46,64	246,17	48,71	342,2	48,34	440,57	49,39
2	655,65	2	437,10	12,17	31,78	24,56	35,74	62,95	40,77	151,74	46,81	246,44	48,48	345,13	49,86	445,76	50,79
5	1202,03	2	437,10	11,73	30,95	24,45	34,93	62,72	40,64	151,28	46,53	245,23	47,82	342,69	48,79	441,22	49,57
3	1311,3	2	437,10	11,73	30,95	24,45	34,93	62,72	40,64	151,28	46,53	245,23	47,82	342,59	48,82	441,1	49,6
1	43,71	3	874,20	3,51	14,19	10,72	10,41	21,06	10,81								
0	83,71	3	874,20														
4	349,68	3	874,20	13,96	32,16	24,52	35,27	62,83	40,92	151,62	46,8	246,22	48,2	344,57	49,7	445,45	50,8
2	655,65	3	874,20	16,14	33,04	24,64	35,26	63,44	41,76	152,08	46,54	247,31	48,54	344,5	49,58	444,09	50,32
5	1202,03	3	874,20	11,54	31,28	24,32	35,57	62,97	41,39	151,81	46,65	245,95	48,1	343,15	48,5	442,21	50,3
3	1311,3	3	874,20	11,54	31,28	24,32	35,57	62,97	41,4	151,8	46,65	245,57	47,31	341,99	48,55	440,81	50,22
1	43,71	4	240,41														
0	83,71	4	240,41														
4	349,68	4	240,41	11,54	31,27	24,33	35,17	62,69	40,11	151,35	46,64	246,17	48,71	342,2	48,34	440,57	49,39
2	655,65	4	240,41	12,35	31,97	24,56	35,14	62,88	41,01	151,37	46,62	245,55	47,94	342,82	49,33	440,83	49,76
5	1202,03	4	240,41	12,39	31,97	24,56	35,41	62,79	41,07	151,71	46,72	246,16	48,39	344,32	48,04	441,2	49,34
3	1311,3	4	240,41	12,39	31,98	24,4	35,67	62,65	40,86	151,11	46,36	245,3	48,24	343,45	49,4	441,95	49,82
1	43,71	5	655,65	1,25	12,7												
0	83,71	5	655,65														
4	349,68	5	655,65	11,76	31,05	24,6	36,08	63,11	41,25	152,36	46,83	247,09	48,36	344,12	48,67	443,03	50,03
2	655,65	5	655,65	11,54	31,28	24,39	35,21	62,5	40,64	151,2	46,69	246,15	47,65	343,96	49,6	443,4	49,58
5	1202,03	5	655,65	11,54	31,28	24,35	34,81	62,72	40,63	151,34	46,4	246,41	48,55	344,1	49,14	443,13	49,77
3	1311,3	5	655,65	11,54	31,28	24,35	34,81	62,72	40,63	151,34	46,37	246,65	48,66	345,06	49,35	444,08	49,79
EXPERIMENTAL HORMIGÓN HI				16,61	29,1	18,92	29,01	46,38	27,78	102,09	26,99	156,53	27,45	210,73	26,1	259,18	22,76

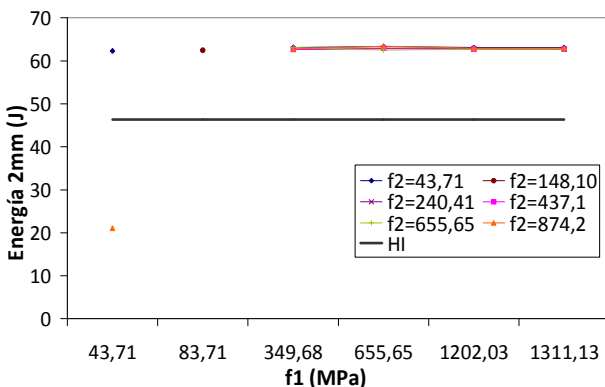




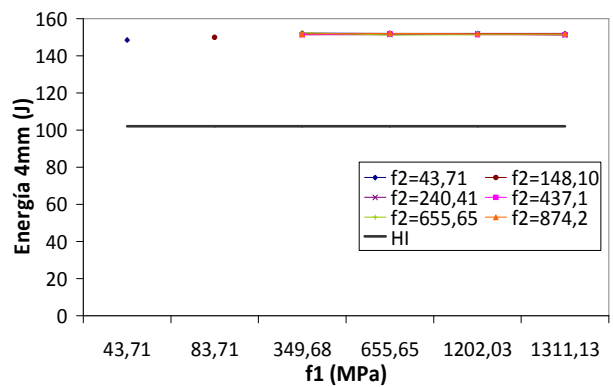
a)



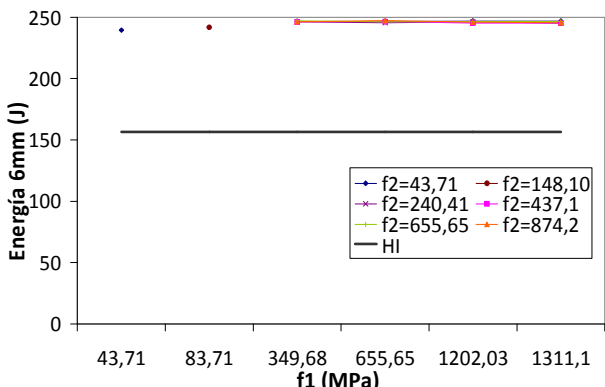
b)



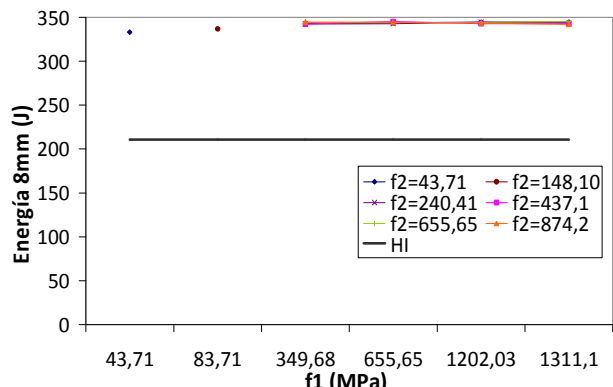
c)



d)



e)



f)

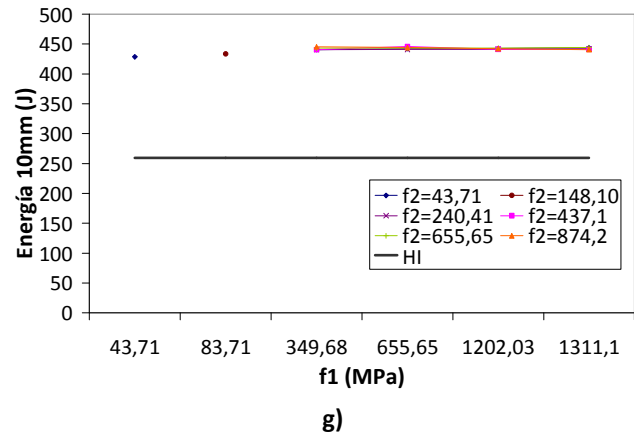
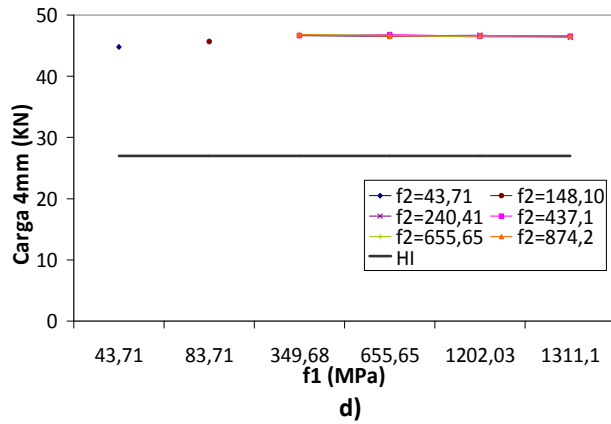
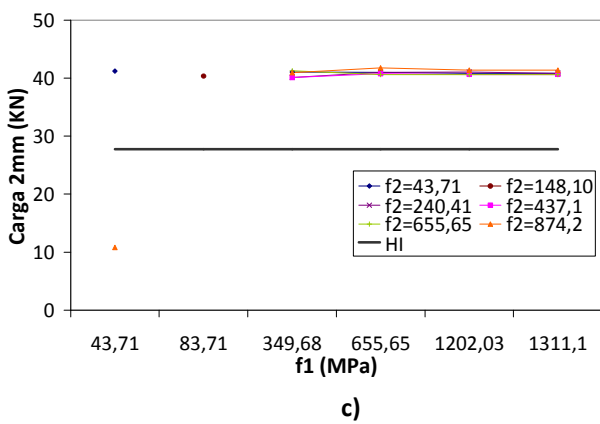
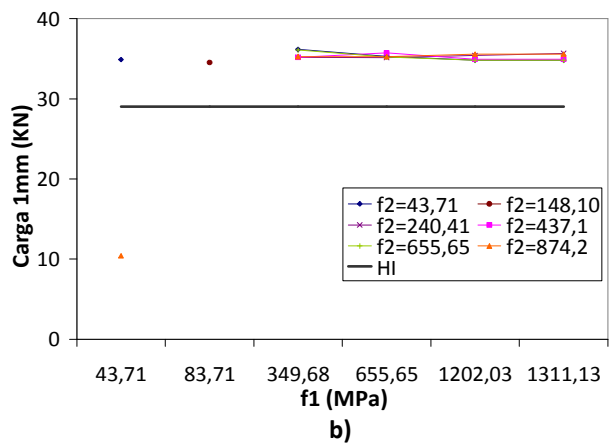
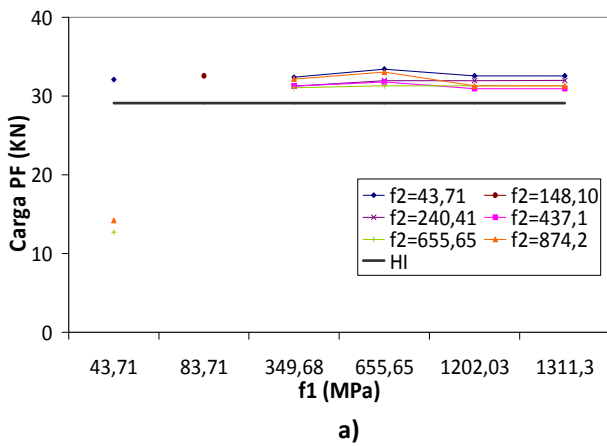
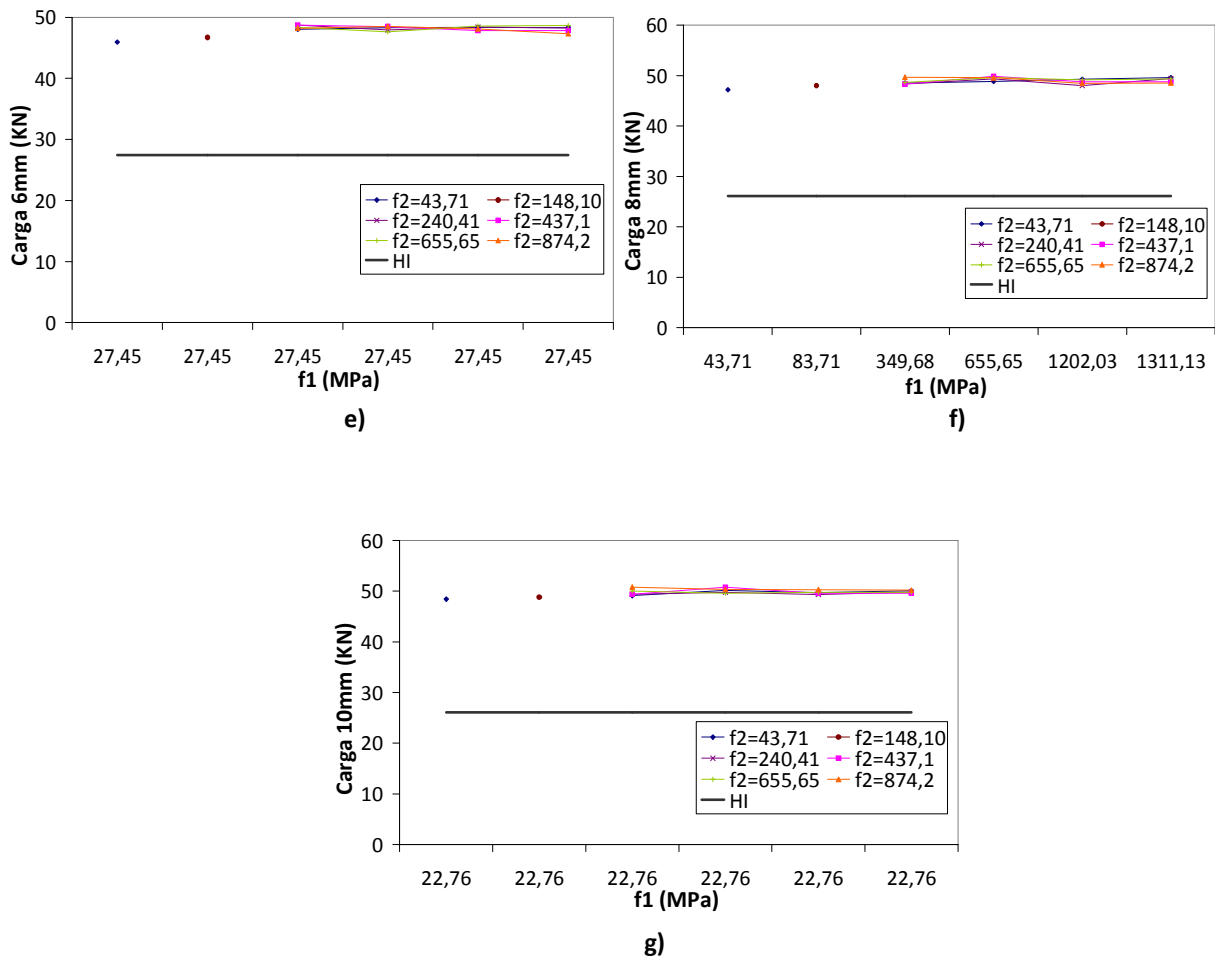


Figura C. 15. Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de f1 f2, elemento Placa 2, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.

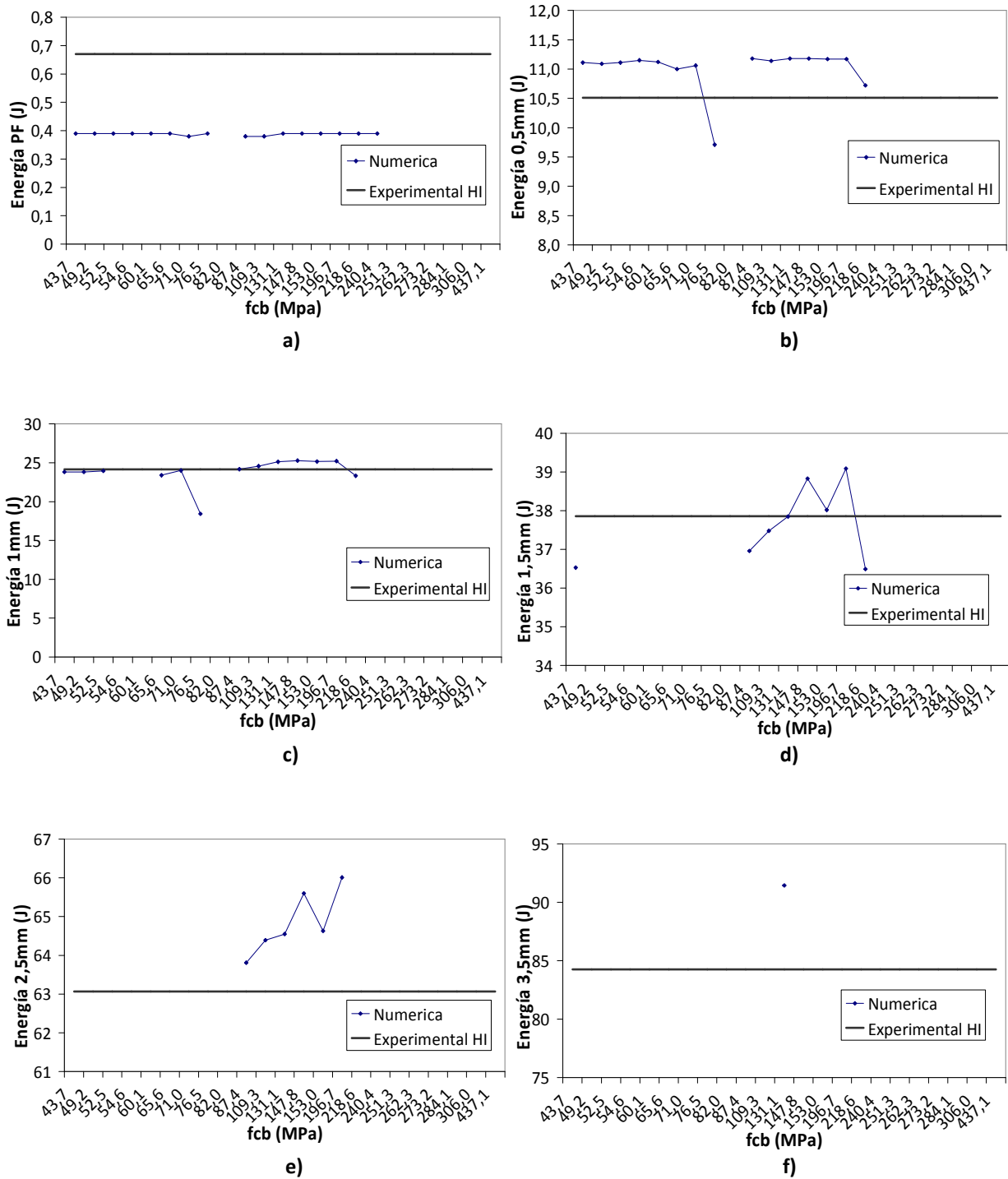




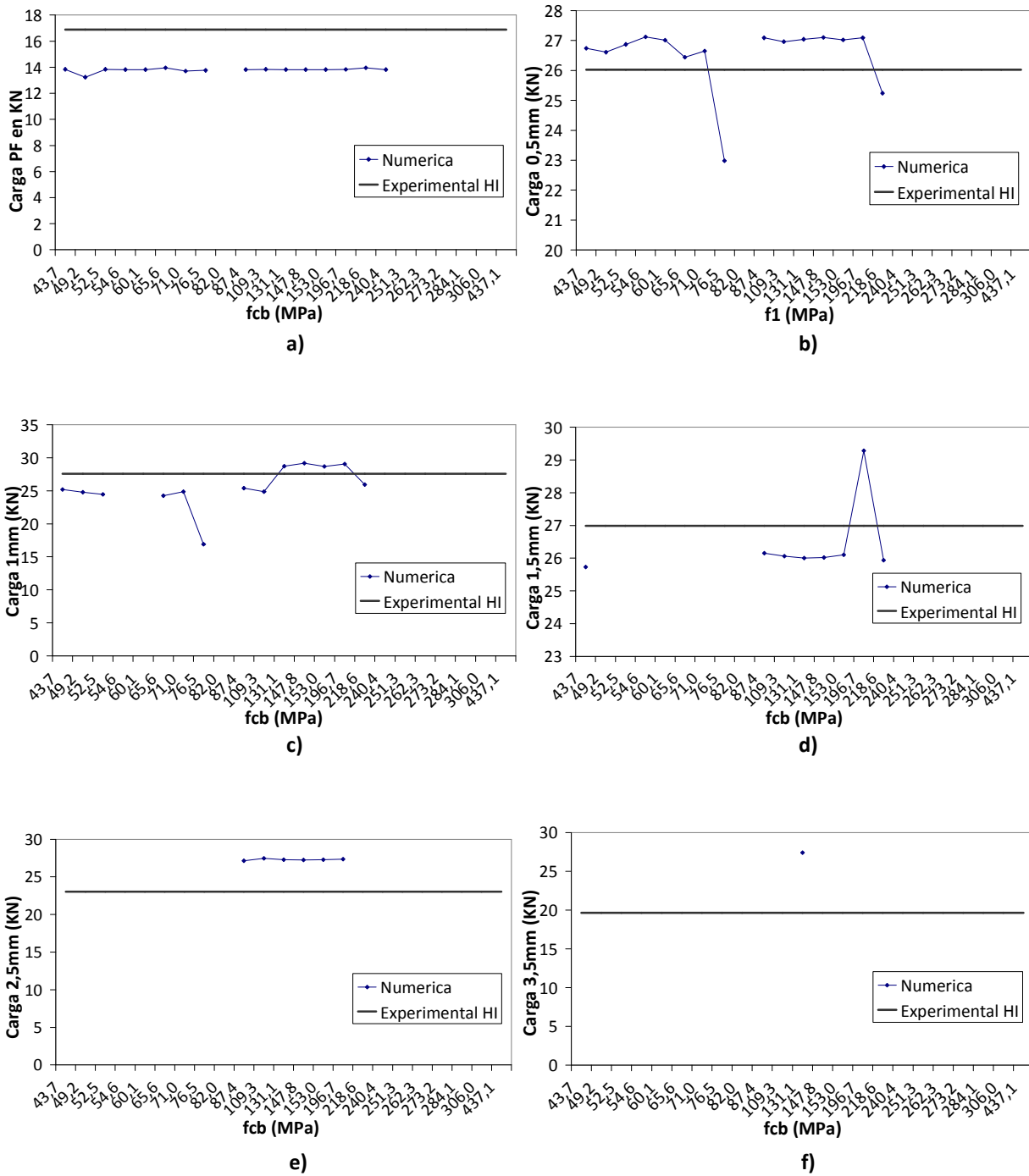
**Figura C. 16.** Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de  $f_1$   $f_2$ , elemento Placa 2, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.

**Tabla C. 9.** Valores de energía y carga para las combinaciones de fcb, elemento EN14651.

fcb		Energía PF (J)	Carga PF (KN)	Energía 0,5mm (J)	Carga 0,5mm (KN)	Energía 1mm (J)	Carga 1mm (KN)	Energía 1,5mm (J)	Carga 1,5mm (KN)	Energía 2,5mm (J)	Carga 2,5mm (KN)	Energía 3,5mm (J)	Carga 3,5mm (KN)
# Variac.	Valor Numérico (MPa)												
1	43,71	0,39	13,84	11,11	26,74	23,82	25,22	36,53	25,73				
19	49,17	0,39	13,24	11,09	26,61	23,82	24,79						
0	52,45	0,39	13,84	11,11	26,87	23,95	24,46						
17	54,64	0,39	13,82	11,15	27,12								
20	60,10	0,39	13,82	11,12	27,01								
14	65,57	0,39	13,96	11	26,44	23,39	24,24						
21	71,03	0,38	13,71	11,06	26,65	24	24,89						
18	76,49	0,39	13,76	9,71	22,98	18,43	16,9						
22	81,96	NO CONVERGE											
13	87,42	0,38	13,82	11,18	27,09	24,18	25,4	36,96	26,15	63,81	27,15		
2	109,28	0,38	13,84	11,14	26,96	24,57	24,89	37,48	26,06	64,39	27,46		
12	131,13	0,39	13,82	11,18	27,04	25,12	28,74	37,85	26	64,55	27,27	91,45	27,42
11	147,84	0,39	13,82	11,18	27,1	25,28	29,17	38,83	26,02	65,6	27,25		
15	152,99	0,39	13,82	11,17	27,02	25,16	28,68	38,02	26,1	64,63	27,28		
16	196,70	0,39	13,83	11,17	27,09	25,21	29,06	39,09	29,28	66,01	27,36		
3	218,55	0,39	13,96	10,72	25,24	23,33	25,95	36,49	25,94				
9	240,41	0,39	13,82										
10	251,33	NO CONVERGE											
6	262,26	NO CONVERGE											
8	273,19	NO CONVERGE											
7	284,12	NO CONVERGE											
5	305,97	NO CONVERGE											
4	437,10	CURVA INSUFICIENTE PARA REALIZAR LECTURA A ESTOS VALORES DE FLECHA											
EXPERIMENTAL HORMIGÓN HI		0,67	16,89	10,51	26,02	24,14	26,02	37,86	26,99	63,07	23,05	84,26	19,66



**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.



**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.

**Tabla C. 10.** Valores de energía y carga para las combinaciones de  $f_{cb}$ , elemento ASTM1018.

<b>fcb</b>		Energía PF (J)	Carga PF (KN)	Energía 0,5mm (J)	Carga 0,5mm (KN)	Energía 1mm (J)	Carga 1mm (KN)	Energía 1,5mm (J)	Carga 1,5mm (KN)	Energía 2mm (J)	Carga 2mm (KN)	Energía 2,5mm (J)	Carga 2,5mm (KN)
# Variac.	Valor Numérico (MPa)												
1	43,71	0,35	17,93	11,17	26,42	24,78	28,01	39	28,9	51,28	23,54	63,26	24,26
19	49,174	0,35	17,93	11,17	26,42	24,79	28,02	39,02	28,89	51,44	21,29	63,06	23,5
0	52,45	0,35	17,93	11,15	26,42	24,72	27,95	37,46	20,93	48,46	20,87	58,8	20,52
17	54,64	0,35	17,93	11,13	26,36	24,7	27,88	37	22,76	48,81	23,97	59,25	19,48
20	60,101	0,35	17,93	11,12	26,24	24,6	27,8	37,62	22,84	48,96	20,96	59	20,15
14	65,57	0,34	17,89	11,06	26,27	24,47	27,69	35,56	18,82	45,4	19,87		
21	71,029	0,35	17,93	10,35	22,53	21,32	14,89	27,64	14,57	34,54	13,36	40,61	12,01
18	76,49	0,33	16,3	9,94	23,14	17,31	14,19	24,36	13,75	30,98	13,2	37,58	13,2
22	81,956	NO CONVERGE											
13	87,42	0,35	17,93	11,17	26,43	24,79	28,04	38,99	28,88	53,12	24,1	66,46	28,86
2	109,28	0,35	17,93	11,17	26,44	24,78	28,01	39	28,9	53,17	28,37	65,47	22,48
12	131,13	0,35	17,93	11,17	26,39	24,78	27,93	38,98	28,89	53,32	26,24	65,75	24,66
11	147,84	0,35	17,93	11,17	26,38	24,78	28,03	39,01	28,89	53,56	28,51	67,08	26,7
15	152,99	0,34	17,93	11,17	26,39	24,79	27,98	39,01	28,91	53,61	29,28	67,15	27,03
16	196,7	0,35	17,93	11,16	26,43	24,75	27,96	38,96	28,87	53,57	29,5	68,4	29,71
3	218,55	0,35	17,93	11,17	26,43	24,78	27,46	37,68	25,15	50,38	25,39	63,14	25,82
9	240,41	0,35	17,93	11,17	26,43	24,73	23,72	37,77	27,02				
10	251,33	NO CONVERGE											
6	262,26	NO CONVERGE											
8	273,19	NO CONVERGE											
7	284,12	NO CONVERGE											
5	305,97	CURVA INSUFICIENTE PARA REALIZAR LECTURA A ESTOS VALORES DE FLECHA											
4	437,1	CURVA INSUFICIENTE PARA REALIZAR LECTURA A ESTOS VALORES DE FLECHA											
EXPERIMENTAL HORMIGÓN HI		0,92	24,94	12,03	26,71	25,79	27,02	39,17	26,29	51,6	23,02	57,56	19,82

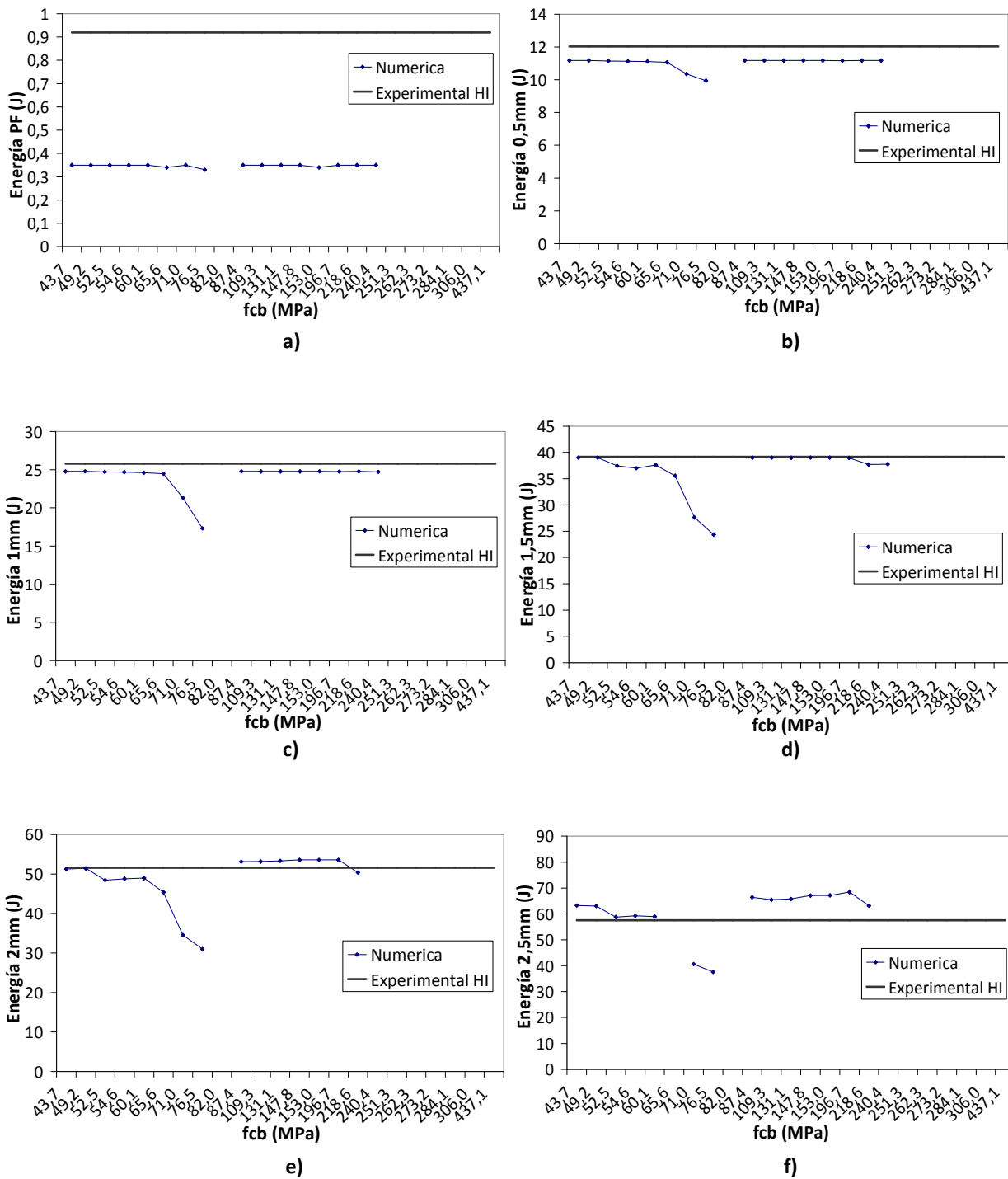
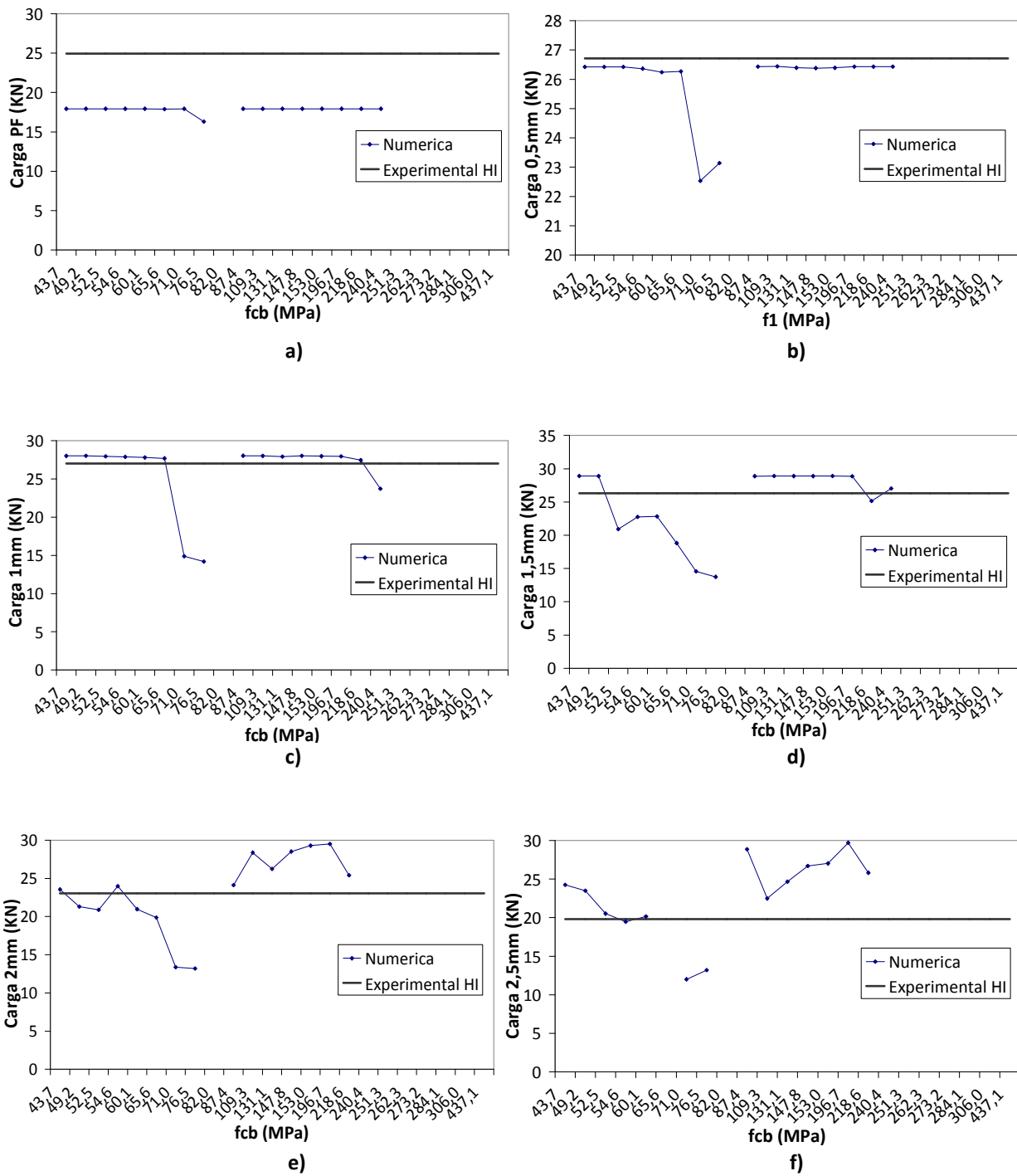


Figura C. 19. Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 0,5mm (b), 1mm (c), 1,5mm (d), 2mm (e) y 2,5mm (f) correspondientes a las combinaciones de  $f_{cb}$ , elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.

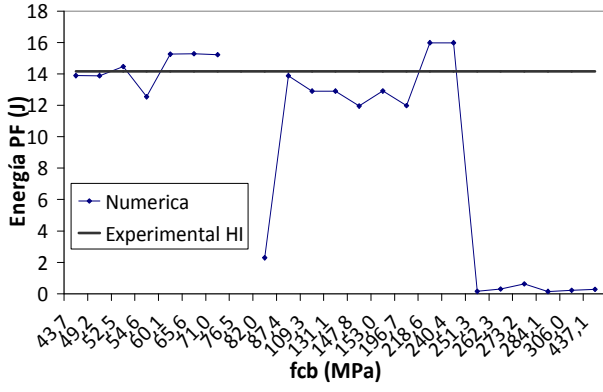




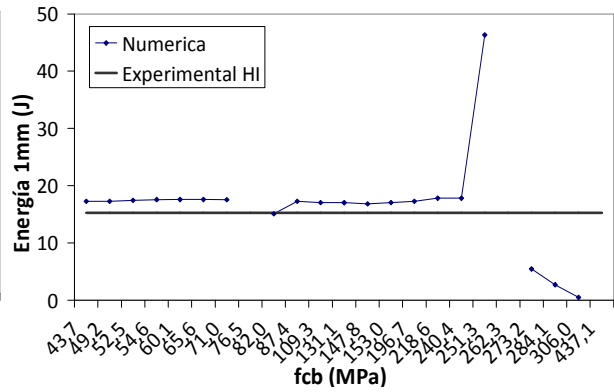
**Figura C. 20.** Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 0,5mm (b), 1mm (c), 1,5mm (d), 2mm (e) y 2,5mm (f) correspondientes a las combinaciones de  $f_{cb}$ , elemento ASTM1018, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.

**Tabla C. 11.** Valores de energía y carga para las combinaciones de  $f_{cb}$ , elemento Placa 1.

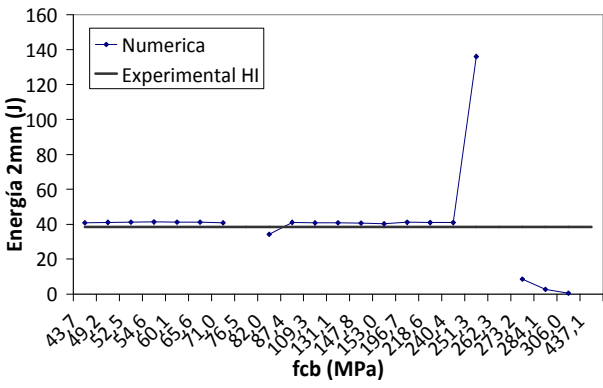
fcb		Energía PF (J)	Carga PF (KN)	Energía 1mm (J)	Carga 1mm (KN)	Energía 2mm (J)	Carga 2mm (KN)	Energía 4mm (J)	Carga 4mm (KN)	Energía 6mm (J)	Carga 6mm (KN)	Energía 8mm (J)	Carga 8mm (KN)	Energía 10mm (J)	Carga 10mm (KN)
# Variac.	Valor Numérico (MPa)														
1	43,71	13,89	26,82	17,26	21,13	40,76	24,81	95,76	29,46	157,68	32,23	224,17	34,08		
19	49,174	13,88	26,87	17,27	21,56	41,1	24,04	96,46	29,56	158,76	32,58	226	34,48	296,25	35,85
0	52,45	14,47	27,1	17,42	21,31	41,16	25,11	96,26	29,7	158,56	32,43	225,36	34,22	295,11	35,44
17	54,64	12,54	26,07	17,57	20,75	41,29	25,11	96,59	29,81						
20	60,101	15,25	27,53	17,59	20,77	41,16	25,46								
14	65,57	15,28	27,48	17,58	20,73	41,14	24,51	95,74	29,36	157,17	31,98	222,71	33,45	290,62	34,4
21	71,029	15,22	27,58	17,55	20,43	40,84	24,06	98,52	28,93	154,44	30,89				
18	76,49	NO CONVERGE													
22	81,956	2,29	15,18	15,08	23,88	34,26	20,07	79,37	25,19						
13	87,42	13,88	26,95	17,27	21,7	41,09	25,01	96,44	29,63	158,63	32,64	226,14	34,35	296,73	36,06
2	109,28	12,9	26,39	17,04	21,87	40,75	25,08	96,02	29,71	158,58	32,58	225,84	34,59	296,54	35,99
12	131,13	12,9	26,39	17,02	21,58	40,78	25,24	96,09	29,71	158,62	32,71	226,1	34,7	297,07	36,2
11	147,84	11,95	25,56	16,82	21,59	40,69	25,58	96,07	29,83	158,78	32,8	226,53	34,72	297,5	36,16
15	152,99	12,91	26,32	17,04	21,79	40,26	25,12	96,26	29,8	158,95	32,66	226,37	34,51	297,04	36,07
16	196,7	11,98	25,27	17,26	21,19	41,13	25,68	96,69	29,86	159,91	33,07	228,13	35,02	299,9	36,66
3	218,55	15,98	28,05	17,8	21,21	40,94	24,96	95,88	29,53	158,08	32,49	223,55	32,19	290,75	34,55
9	240,41	15,98	28,05	17,8	20,21	40,93	24,96	95,88	29,53	158,08	32,49	224,73	34,04		
10	251,33	0,15	1,92	46,31	7,84	136,11	9,86	36,44	12,72	63,67	14,34	93,62	15,5	125,42	16,24
6	262,26	0,3	4,33												
8	273,19	0,63	6,52	5,45	2,6	8,54	3,28	14,93	3,12	20,88	2,93	26,65	2,96	26,65	0,001
7	284,12	0,144	3,69	2,7	0,001	2,7	0,001	2,7	0,001	2,7	0,001	2,7	0,001	2,7	0,001
5	305,97	0,22	4,55	0,47	0,001	0,47	0,001	0,47	0,001	0,47	0,001	0,47	0,001	0,47	0,001
4	437,1	0,28	5,61												
EXPERIMENTAL HORMIGÓN HI		14,17	23,31	15,26	22,9	38,47	21,74	84,03	22,92	128,66	22,3	171,7	21,23	213	20,01



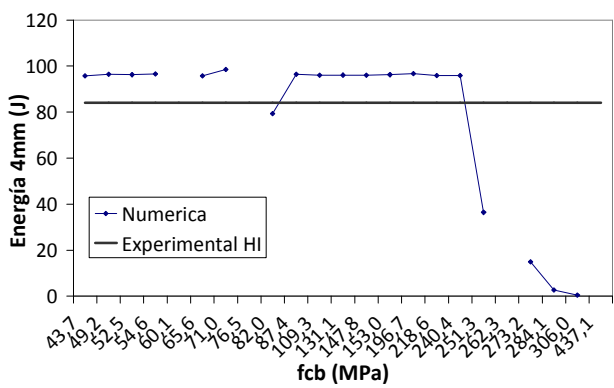
a)



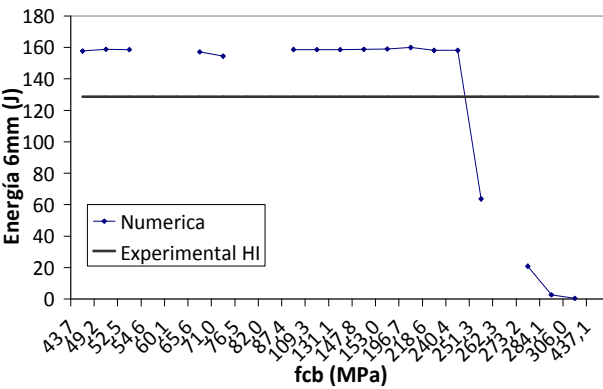
b)



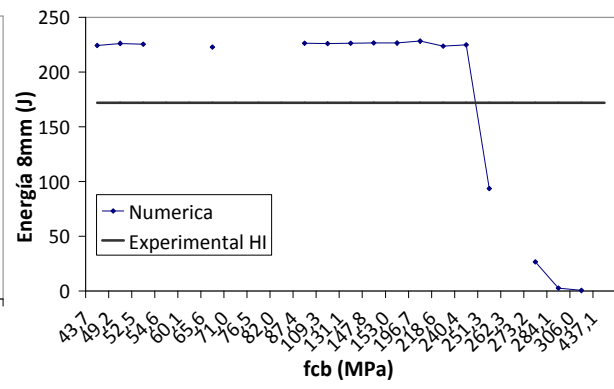
c)



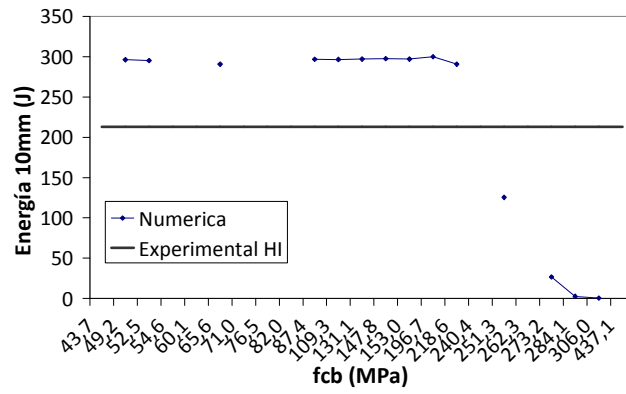
d)



e)

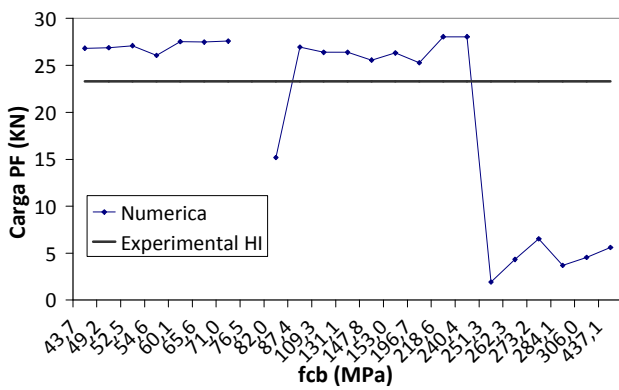


f)

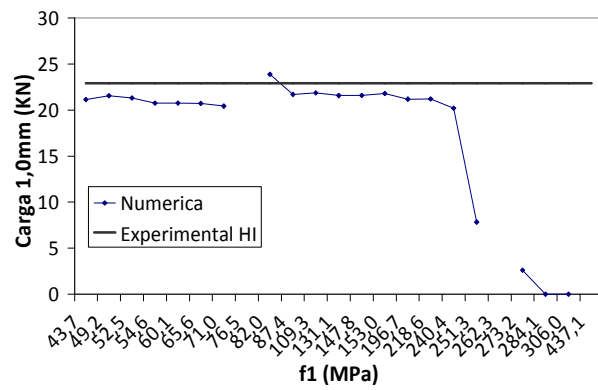


g)

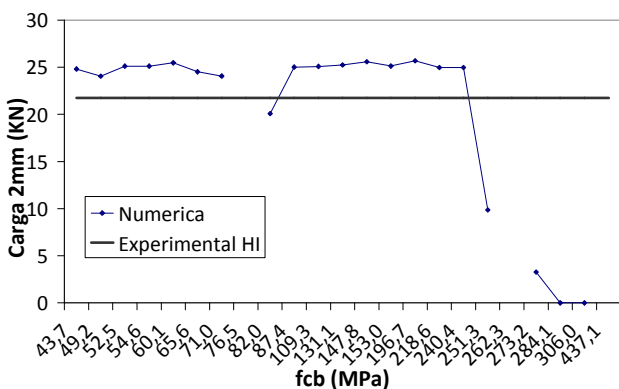
**Figura C. 21.** Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de  $f_{cb}$ , elemento Placa 1, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.



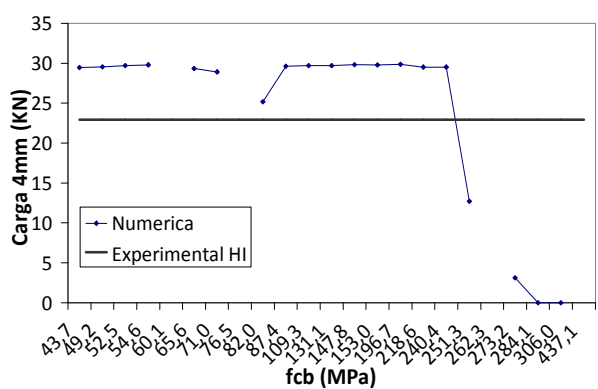
a)



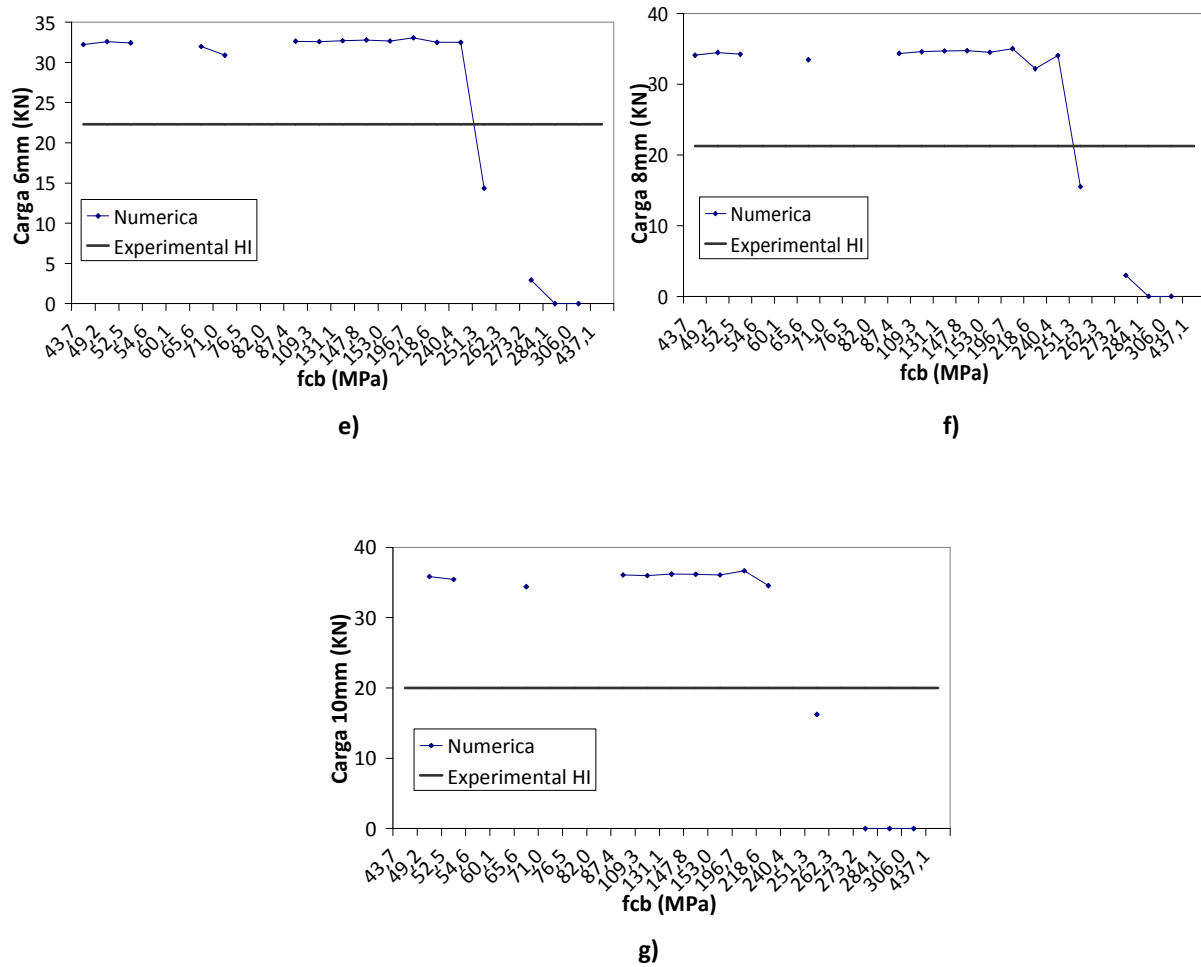
b)



c)



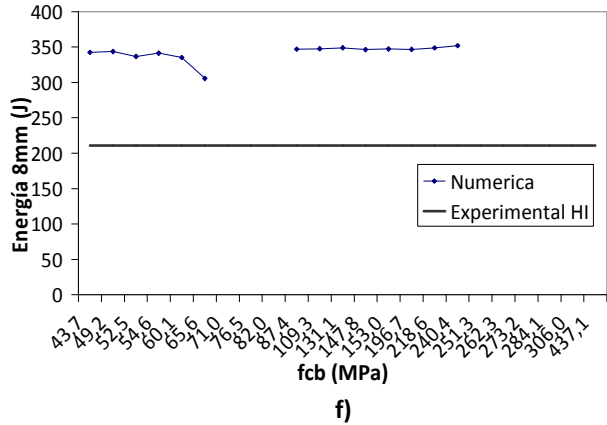
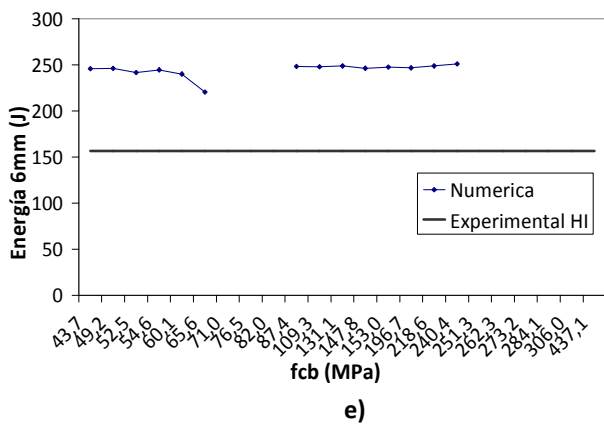
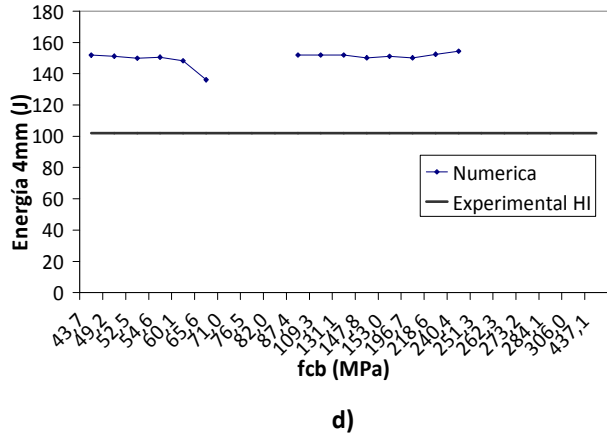
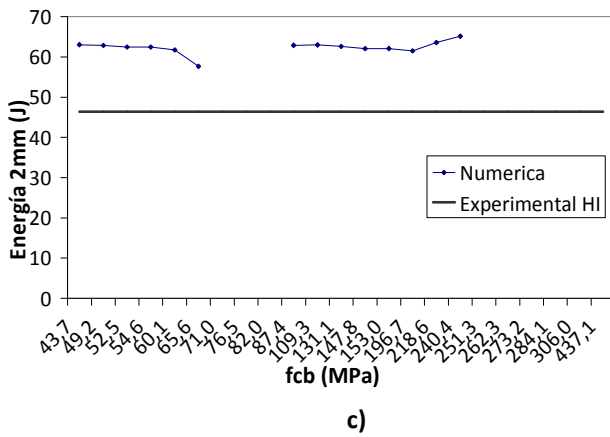
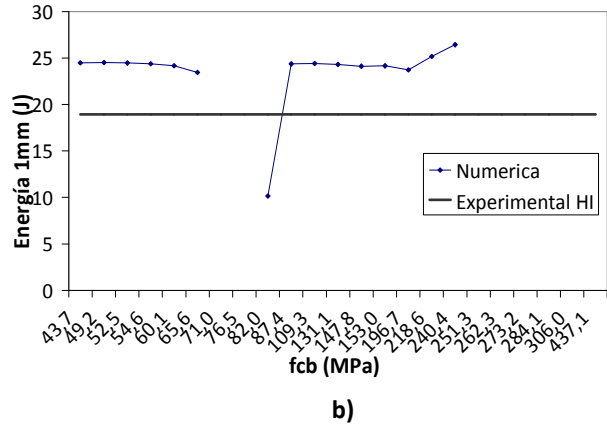
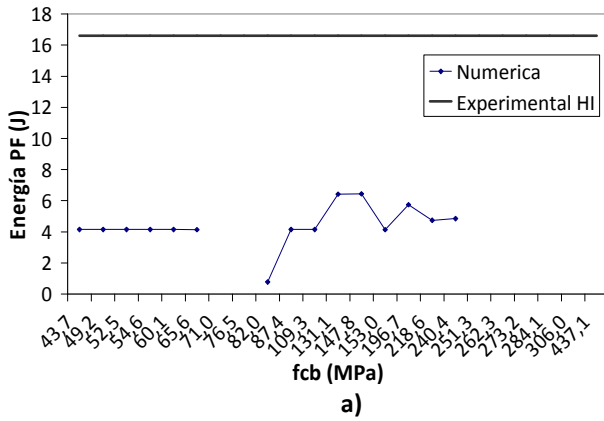
d)

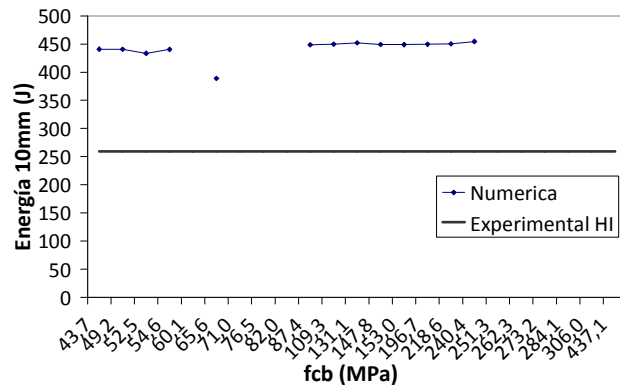


**Figura C. 22.** Valores de carga a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de  $f_{cb}$ , elemento Placa 1, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.

**Tabla C. 12.** Valores de energía y carga para las combinaciones de  $f_{cb}$ , elemento Placa 2.

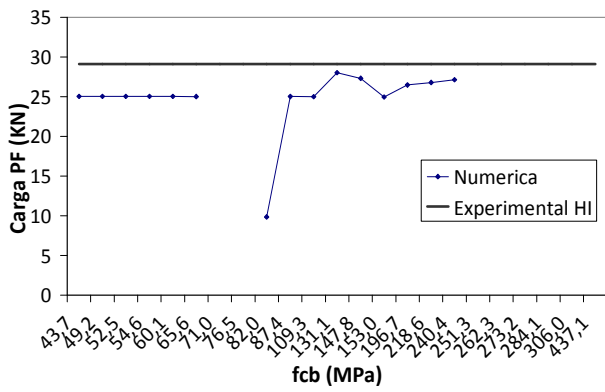
fcb		Energía PF (J)	Carga PF (KN)	Energía 1mm (J)	Carga 1mm (KN)	Energía 2mm (J)	Carga 2mm (KN)	Energía 4mm (J)	Carga 4mm (KN)	Energía 6mm (J)	Carga 6mm (KN)	Energía 8mm (J)	Carga 8mm (KN)	Energía 10mm (J)	Carga 10mm (KN)
# Variac.	Valor Numérico (MPa)														
1	43,71	4,15	25,04	24,48	35,29	63,06	41,56	151,86	46,54	245,94	47,58	342,36	48,98	440,92	49,91
19	49,174	4,15	25,04	24,51	35,05	62,87	41,43	151,2	46,27	246,25	47,64	343,63	48,21	440,61	48,93
0	52,45	4,15	25,04	24,47	34,54	62,47	40,36	149,97	45,67	241,75	46,71	336,74	48,04	433,53	48,8
17	54,64	4,15	25,04	24,38	34,62	62,48	41,2	150,61	46,25	244,61	47,67	341,37	49,09	440,5	50,08
20	60,101	4,15	25,04	24,17	34,48	61,75	40	148,22	45,02	240,06	46,7	335,19	48,19		
14	65,57	4,14	25,01	23,45	32,01	57,67	36,47	136,11	41,13	220,48	42,94	305,75	41,34	389,03	39,79
21	71,029	NO CONVERGE													
18	76,49	NO CONVERGE													
22	81,956	0,78	9,84	10,15	9,83										
13	87,42	4,15	25,02	24,36	34,95	62,91	41,02	151,94	46,88	248,32	49,21	346,91	50,17	448,77	51,31
2	109,28	4,15	24,99	24,41	35,03	62,99	41,01	151,93	46,8	247,98	48,71	347,58	50,71	449,74	51,72
12	131,13	6,42	28,02	24,31	35,15	62,61	41,02	151,94	47,07	248,83	48,61	348,89	50,84	452,05	52,18
11	147,84	6,44	27,31	24,11	33,79	62,07	40,68	150,16	46,62	246,35	49,32	346,35	50,64	449,25	52,07
15	152,99	4,14	24,96	24,16	34,61	62,09	41,21	151,16	46,72	247,66	49,35	347,26	50,37	449	51,47
16	196,7	5,74	26,47	23,73	33,84	61,51	40,49	150,18	46,79	246,76	48,95	346,63	50,84	449,52	52,14
3	218,55	4,74	26,79	25,17	34,32	63,58	41,14	152,47	46,7	248,82	49,38	348,68	50,43	450,39	51,27
9	240,41	4,85	27,13	26,43	38,13	65,15	41,44	154,46	47,04	251,1	49,45	351,92	50,94	454,52	51,75
10	251,33	NO CONVERGE													
6	262,26	NO CONVERGE													
8	273,19	NO CONVERGE													
7	284,12	NO CONVERGE													
5	305,97	NO CONVERGE													
4	437,1	CURVA INSUFICIENTE PARA REALIZAR LECTURA A ESTOS VALORES DE FLECHA													
EXPERIMENTAL HORMIGÓN HI		16,61	29,1	18,92	29,01	46,38	27,78	102,09	26,99	156,53	27,45	210,73	26,1	259,18	22,76



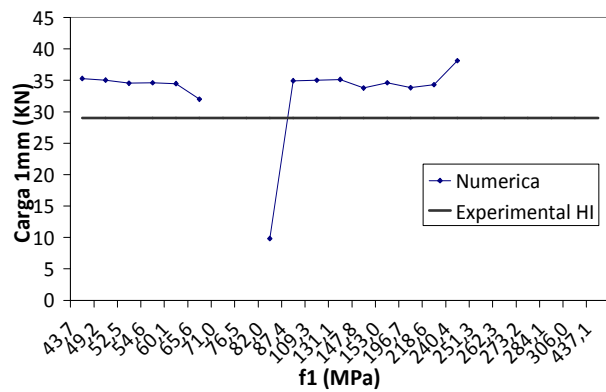


g)

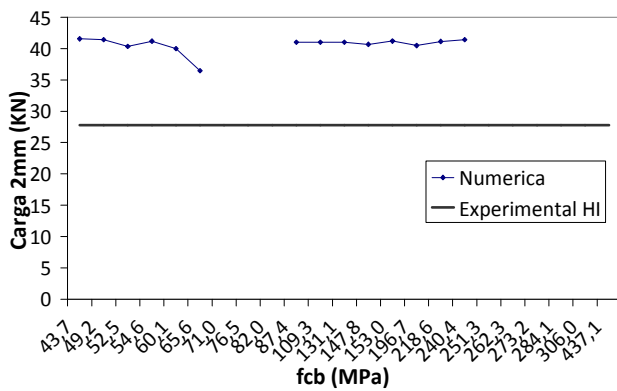
Figura C. 23. Valores de energía a PF primera fisura (a), flechas: 1mm (b), 2mm (c), 4mm (d), 6mm (e), 8mm (f) y 10mm (g) correspondientes a las combinaciones de  $f_{cb}$ , elemento Placa 2, y su comparación con los valores obtenidos experimentalmente del hormigón HI.



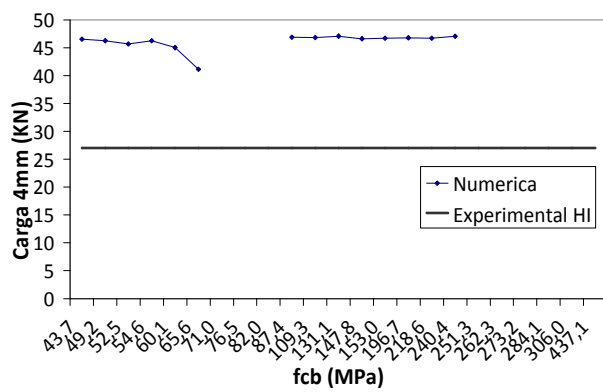
a)



b)

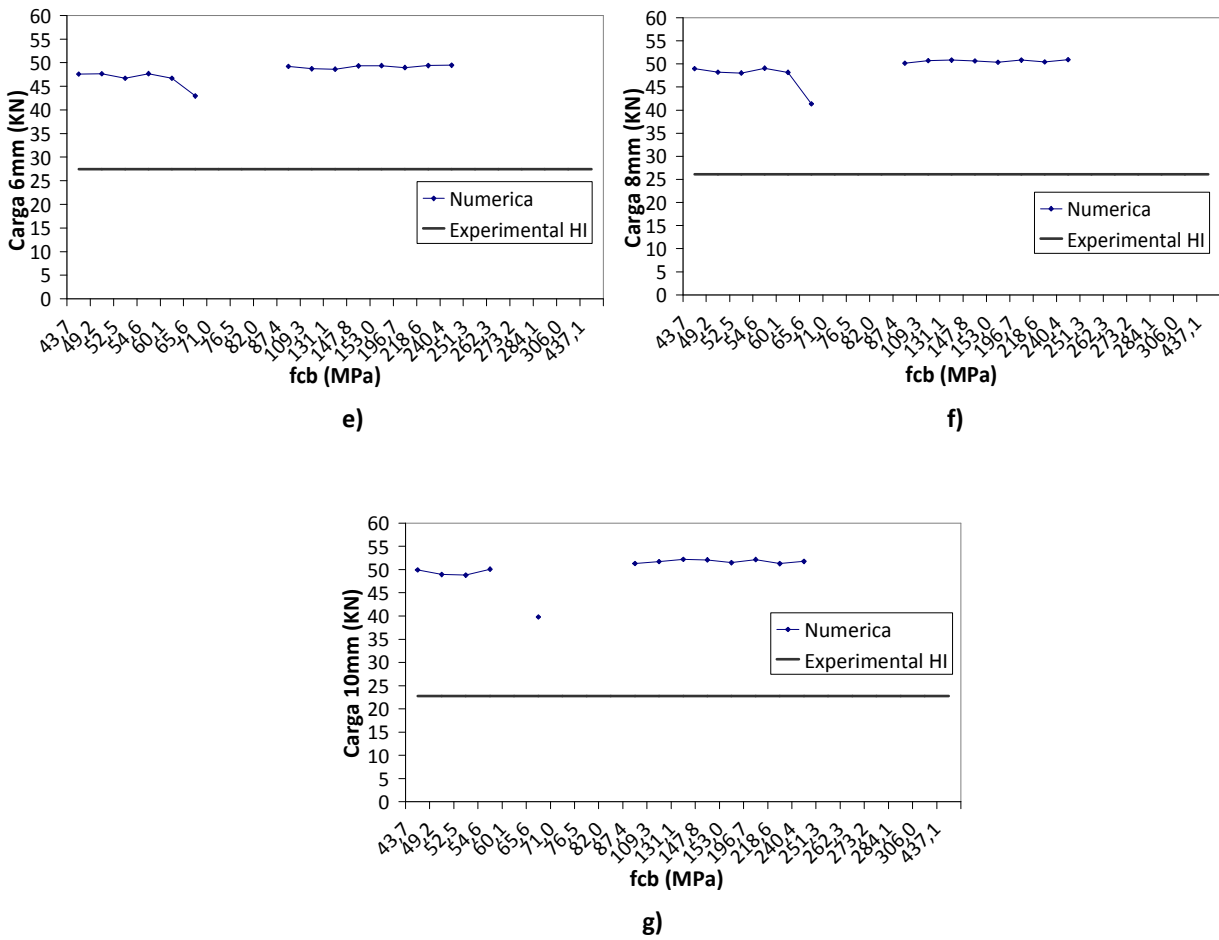


c)



d)





**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.



# **ANEJO D**

**RANKING DE COMBINACIONES NUMÉRICAS,  
ESTUDIO EN CONJUNTO,  
VALORES DE MEDIA CORREGIDA  $D_c$**



## **ANEJO D**

### **RANKING DE COMBINACIONES NUMÉRICAS, ESTUDIO EN CONJUNTO, VALORES DE MEDIA CORREGIDA Dc**

Las Tablas D. 1 a D. 4 reflejan el procedimiento realizado para el cálculo de la media corregida Dc numérica y con ello la obtención de las combinaciones numéricas más ajustadas para los elementos EN14651, ASTM1018, Placa 1 y Placa 2. Además, se muestra el ranking resultante del proceso de selección.

La Tabla D. 5 muestra el ranking de las combinaciones numéricas resultante de la evaluación en conjunto de cuatro de los elementos analizados.

Las Tablas D.6 a D. 12 presentan los coeficientes de Kendall calculados para cada una de las combinaciones numéricas tanto para los cuatro elementos analizados como para grupos de elementos. Las combinaciones se organizan en forma de ranking de acuerdo con los valores obtenidos.

Las Tablas D. 13 a D. 16 muestran el cálculo de las medias corregidas Dc experimentales de cada una de las probetas para cada uno de los elementos analizados.



Tabla D. 1. Obtención de las mejores combinaciones numéricas, EN14651.

	Tramo 0-0,5			Tramo 0,5-1			Tramo 1-1,5			Tramo 1,5-2,5			Tramo 2,5-3,5			Criterio de selección			
	A <sub>Acum</sub> 0-0,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-0,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0,5-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-1,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1,5-2,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-3,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2,5-3,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
EXP	10,51	10,51		24,14	13,63		37,86	13,72		63,07	25,21		84,26	21,19					
107	11,04	11,04	5,07	24,54	13,50	0,99	37,72	13,18	3,92	64,13	26,41	4,76	87,07	22,94	8,26	0,81	0,81	0,81	1
36	10,74	10,74	2,17	23,98	13,24	2,88	37,62	13,64	0,58	63,72	26,11	3,55	90,25	26,52	25,17	0,89	0,89	0,89	2
97	10,18	10,18	3,15	23,18	13,00	4,61	36,62	13,44	2,05	62,21	25,59	1,53	88,21	26,00	22,69	0,99	0,99	0,99	3
117	11,06	11,06	5,21	24,25	13,20	3,18	36,87	12,61	8,07	63,19	26,32	4,41	85,41	22,22	4,86	1,05	1,05	1,05	4
136	10,51	10,51	0,04													0,01	0,00	1,10	5
132	10,66	10,66	1,42	23,94	13,28	2,54	37,82	13,88	1,16	66,28	28,46	12,87	92,71	26,43	24,74	1,14	1,14	1,14	6
194	10,18	10,18	3,14	22,79	12,61	7,46	36,16	13,37	2,56	61,34	25,18	0,12	87,93	26,58	25,46	1,17	1,17	1,17	7
130	10,48	10,48	0,29	23,61	13,13	3,63	37,32	13,71	0,10	65,57	28,25	12,07	94,30	28,73	35,59	1,28	1,28	1,28	8
15	11,22	11,22	6,72	25,05	13,83	1,46	37,60	12,56	8,48	63,89	26,29	4,29	88,81	24,92	17,58	1,31	1,31	1,31	9
109	10,21	10,21	2,90	22,98	12,78	6,25	36,01	13,02	5,09	61,93	25,92	2,82	88,65	26,72	26,12	1,32	1,32	1,32	10
14	10,70	10,70	1,83	23,77	13,07	4,14	35,88	12,11	11,70	61,23	25,35	0,55	86,88	25,65	21,07	1,32	1,32	1,32	11
50	10,70	10,70	1,83	23,77	13,07	4,14	35,88	12,11	11,70	61,23	25,35	0,55	86,88	25,65	21,07	1,32	1,32	1,32	12
134	10,64	10,64	1,28	23,77	13,12	3,73	35,85	12,08	11,96	61,33	25,49	1,09	87,84	26,50	25,08	1,38	1,38	1,38	13
189	11,21	11,21	6,68	25,17	13,96	2,42	39,60	14,43	5,20	66,12	26,51	5,17	93,24	27,12	28,00	1,43	1,43	1,43	14
67	9,90	9,90	5,82	22,72	12,83	5,90	36,53	13,81	0,66	64,39	27,85	10,49	91,40	27,01	27,49	1,48	1,48	1,48	15
13	10,67	10,67	1,56	23,66	12,98	4,76	36,09	12,44	9,34	62,16	26,07	3,41	89,74	27,58	30,14	1,49	1,49	1,49	16
32	10,57	10,57	0,59	23,07	12,50	8,27	34,79	11,72	14,59	59,82	25,03	0,72	85,54	25,72	21,36	1,62	1,62	1,62	17
118	11,06	11,06	5,22	24,77	13,71	0,58	38,95	14,19	3,39	68,25	29,30	16,21	97,14	28,89	36,34	1,67	1,67	1,67	18
4	10,50	10,50	0,05													0,01	0,00	1,68	19
160	9,97	9,97	5,16	22,68	12,71	6,72	34,67	11,99	12,63	59,62	24,95	1,02	85,59	25,97	22,55	1,71	1,71	1,71	20
192	10,22	10,22	2,75	22,59	12,37	9,27	34,69	12,10	11,82	60,21	25,53	1,26	86,54	26,33	24,26	1,71	1,71	1,71	21
190	11,46	11,46	9,08	25,83	14,36	5,38	39,25	13,42	2,18	67,38	28,13	11,57	95,86	28,48	34,41	1,87	1,87	1,87	22
119	9,43	9,43	10,24	21,75	12,31	9,66	34,30	12,55	8,51	58,59	24,29	3,64	83,78	25,19	18,87	1,91	1,91	1,91	23
40	9,20	9,20	12,50	20,99	11,80	13,44	34,05	13,05	4,88	60,06	26,01	3,18	84,42	24,37	14,99	1,94	1,94	1,94	24
63	9,23	9,23	12,19	21,11	11,88	12,86	34,11	13,00	5,21	60,54	26,43	4,83	85,70	25,16	18,76	2,03	2,03	2,03	25
108	11,06	11,06	5,25	24,87	13,81	1,33	39,28	14,41	5,00	69,29	30,01	19,04	101,21	31,93	50,67	2,16	2,16	2,16	26
65	9,34	9,34	11,10	21,70	12,36	9,33	34,65	12,94	5,65	61,97	27,33	8,40	90,35	28,37	33,91	2,23	2,23	2,23	27
106	11,04	11,04	5,04	23,89	12,85	5,71	36,42	12,53	8,66	61,39	24,96	0,98				1,25	1,00	2,44	28
191	11,41	11,41	8,52	25,97	14,57	6,86	41,04	15,07	9,83	69,96	28,92	14,73	99,91	29,95	41,32	2,53	2,53	2,53	29
16	10,29	10,29	2,14	22,84	12,56	7,87	35,46	12,62	8,04	61,82	26,37	4,58				1,30	1,04	2,54	30
69	10,03	10,03	4,58	22,97	12,94	5,04	36,96	13,99	1,97	66,37	29,41	16,65				1,35	1,08	2,63	31
52	11,42	11,42	8,67	25,58	14,16	3,91	39,13	13,55	1,26	67,71	28,58	13,38				1,37	1,09	2,67	32
28	10,72	10,72	1,96	23,06	12,34	9,47	35,35	12,30	10,36	60,50	25,15	0,25				1,37	1,10	2,68	33
176	11,09	11,09	5,54	23,79	12,70	6,83	36,29	12,50	8,91	62,17	25,88	2,67				1,43	1,14	2,79	34
127	9,97	9,97	5,16	22,73	12,76	6,39	34,98	12,25	10,70	60,79	25,81	2,38				1,48	1,18	2,89	35
171	11,04	11,04	5,00	23,47	12,43	8,77	35,84	12,37	9,84	61,53	25,69	1,90				1,55	1,24	3,02	36
104	11,44	11,44	8,86	24,38	12,94	5,05	36,96	12,58	8,30	63,33	26,36	4,56				1,56	1,25	3,04	37
170	11,04	11,04	5,09	23,47	12,42	8,85	35,83	12,37	9,87	61,56	25,72	2,04				1,56	1,25	3,06	38
20	10,70	10,70	1,83	22,71	12,01	11,88	34,85	12,14	11,52	59,93	25,08	0,53				1,60	1,28	3,12	39
153	10,70	10,70	1,83	22,71	12,01	11,88	34,85	12,14	11,52	59,93	25,08	0,53				1,60	1,28	3,12	40
37	10,73	10,73	2,07	22,92	12,19	10,57	34,87	11,95	12,90	59,17	24,30	3,61				1,73	1,39	3,38	41
147	8,76	8,76	16,66	20,71	11,96	12,29	33,58	12,87	6,23	58,68	25,10	0,42				2,21	1,77	4,33	42
53	11,39	11,39	8,33	24,90	13,52	0,82	38,23	13,33	2,87							1,00	0,60	4,64	43
110	10,13	10,13	3,60	21,13	11,00	19,28	29,50	8,37	39,03	45,68	16,18	35,82	61,46	15,78	25,51	4,68	4,68	4,68	44
66	9,88	9,88	6,00	22,69	12,81	5,98	36,38	13,69	0,25							1,02	0,61	4,72	45

COMBINACIONES NUMÉRICAS

	Tramo 0-0,5			Tramo 0,5-1			Tramo 1-1,5			Tramo 1,5-2,5			Tramo 2,5-3,5			Criterio de selección			
	A <sub>Acum</sub> 0-0,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-0,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0,5-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-1,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1,5-2,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-3,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2,5-3,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
EXP	10,51	10,51		24,14	13,63		37,86	13,72		63,07	25,21		84,26	21,19					
95	10,53	10,53	0,15												0,04	0,01	4,83	46	
184	11,14	11,14	5,99	24,20	13,06	4,21	37,45	13,26	3,36						1,13	0,68	5,23	47	
41	9,61	9,61	8,61	21,58	11,97	12,16	33,07	11,49	16,23	55,46	22,38	11,21			2,73	2,19	5,34	48	
82	11,11	11,11	5,73	24,24	13,13	3,67	37,18	12,94	5,71						1,26	0,76	5,83	49	
111	10,04	10,04	4,43	23,35	13,31	2,36	35,92	12,57	8,38						1,26	0,76	5,86	50	
177	11,08	11,08	5,43	24,19	13,11	3,80	37,06	12,87	6,20						1,29	0,77	5,95	51	
94	11,50	11,50	9,44	24,96	13,46	1,28	37,93	12,97	5,46						1,35	0,81	6,24	52	
105	11,39	11,39	8,38	24,62	13,23	2,97	37,64	13,03	5,05						1,37	0,82	6,32	53	
129	10,58	10,58	0,64	23,37	12,79	6,18	35,62	12,26	10,68						1,46	0,87	6,75	54	
86	10,63	10,63	1,16	23,38	12,75	6,47	35,70	12,33	10,17						1,48	0,89	6,87	55	
60	11,05	11,05	5,13	23,96	12,91	5,29	36,66	12,70	7,44						1,49	0,89	6,89	56	
46	12,81	12,81	21,92	28,63	15,82	16,06	43,35	14,71	7,24	73,88	30,54	21,13			3,62	2,90	7,07	57	
93	11,43	11,43	8,72	24,48	13,05	4,24	37,41	12,94	5,72						1,56	0,93	7,21	58	
135	10,44	10,44	0,62	22,93	12,48	8,41	35,18	12,25	10,71						1,65	0,99	7,62	59	
42	11,19	11,19	6,47	24,15	12,96	4,91	36,72	12,57	8,41						1,65	0,99	7,63	60	
169	11,21	11,21	6,64	24,16	12,95	5,00	36,75	12,60	8,17						1,65	0,99	7,64	61	
179	10,71	10,71	1,92	23,27	12,55	7,90	35,59	12,33	10,15						1,66	1,00	7,70	62	
115	9,10	9,10	13,45	21,89	12,79	6,14	35,56	13,67	0,39						1,66	1,00	7,71	63	
43	11,18	11,18	6,42	24,07	12,89	5,45	36,65	12,57	8,35						1,68	1,01	7,80	64	
168	11,20	11,20	6,54	24,14	12,94	5,05	36,62	12,48	9,06						1,72	1,03	7,97	65	
187	11,21	11,21	6,62	23,81	12,60	7,52	36,61	12,80	6,74						1,74	1,04	8,06	66	
2	10,49	10,49	0,24	22,68	12,20	10,50	35,00	12,32	10,21						1,75	1,05	8,08	67	
23	10,64	10,64	1,21	22,96	12,32	9,61	35,25	12,29	10,39						1,77	1,06	8,18	68	
84	10,63	10,63	1,13	22,83	12,21	10,45	35,22	12,39	9,70						1,77	1,06	8,21	69	
180	10,71	10,71	1,86	22,90	12,20	10,52	35,39	12,49	8,99						1,78	1,07	8,24	70	
193	10,18	10,18	3,10	22,77	12,59	7,65	35,03	12,26	10,63						1,78	1,07	8,25	71	
70	10,59	10,59	0,79	22,92	12,33	9,56	35,12	12,20	11,06						1,78	1,07	8,26	72	
34	7,21	7,21	31,41	13,87	6,66	51,13	20,91	7,04	48,66	35,02	14,11	44,03	49,55	14,53	31,44	8,51	8,51	8,51	73
44	11,21	11,21	6,61	23,91	12,70	6,81	36,34	12,43	9,41						1,90	1,14	8,81	74	
137	10,64	10,64	1,21	22,85	12,21	10,39	34,96	12,11	11,74						1,95	1,17	9,01	75	
146	10,64	10,64	1,21	22,85	12,21	10,39	34,96	12,11	11,74						1,95	1,17	9,01	76	
183	11,10	11,10	5,63	23,69	12,59	7,65	36,01	12,32	10,19						1,96	1,17	9,05	77	
173	10,68	10,68	1,64	23,08	12,40	9,05	34,99	11,91	13,19						1,99	1,19	9,21	78	
175	10,70	10,70	1,81	22,92	12,22	10,34	34,90	11,98	12,68						2,07	1,24	9,58	79	
17	10,30	10,30	2,01	22,33	12,03	11,74	34,50	12,17	11,31						2,09	1,25	9,67	80	
72	10,60	10,60	0,83	22,59	11,99	12,04	34,59	12,00	12,52						2,12	1,27	9,79	81	
51	10,71	10,71	1,89	22,75	12,04	11,69	34,82	12,07	12,00						2,13	1,28	9,87	82	
19	10,63	10,63	1,12	22,83	12,20	10,50	34,61	11,78	14,11						2,14	1,29	9,93	83	
11	10,54	10,54	0,33												0,08	0,02	10,34	84	
101	10,71	10,71	1,92	22,70	11,99	12,03	34,62	11,92	13,10						2,25	1,35	10,44	85	
128	10,09	10,09	4,00	22,41	12,32	9,61	34,28	11,87	13,49						2,26	1,36	10,46	86	
116	11,03	11,03	4,95	24,72	13,69	0,47									0,68	0,27	10,59	87	
114	9,18	9,18	12,61	21,84	12,65	7,17	34,13	12,29	10,42						2,52	1,51	11,65	88	
165	11,03	11,03	4,95	23,69	12,66	7,09	34,76	11,06	19,36						2,62	1,57	12,11	89	
121	9,37	9,37	10,84	21,44	12,07	11,43	33,84	12,40	9,64						2,66	1,60	12,31	90	

COMBINACIONES NUMÉRICAS



	Tramo 0-0,5			Tramo 0,5-1			Tramo 1-1,5			Tramo 1,5-2,5			Tramo 2,5-3,5			Criterio de selección			
	A <sub>Acum</sub> 0-0,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-0,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0,5-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-1,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1,5-2,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-3,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2,5-3,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
EXP	10,51	10,51		24,14	13,63		37,86	13,72		63,07	25,21		84,26	21,19					
125	13,43	13,43	27,81	30,28	16,85	23,63	48,14	17,86	30,14	82,41	34,28	35,96				6,45	5,16	12,59	91
163	9,24	9,24	12,10	21,33	12,09	11,30	33,52	12,19	11,18							2,88	1,73	13,34	92
33	10,56	10,56	0,43													0,11	0,02	13,46	93
38	9,60	9,60	8,66	21,60	12,00	11,96	33,17	11,57	15,65							3,02	1,81	14,00	94
145	10,52	10,52	0,10	23,16	12,64	7,24										0,92	0,37	14,33	95
155	9,48	9,48	9,75	21,00	11,52	15,50	32,90	11,89	13,30							3,21	1,93	14,87	96
74	9,41	9,41	10,50	20,88	11,47	15,83	32,72	11,84	13,71							3,34	2,00	15,45	97
178	11,10	11,10	5,62	24,41	13,31	2,33										0,99	0,40	15,52	98
56	10,69	10,69	1,71	23,43	12,74	6,55										1,03	0,41	16,14	99
167	11,17	11,17	6,25	24,51	13,34	2,12										1,05	0,42	16,35	100
47	12,54	12,54	19,27	28,51	15,97	17,20	43,15	14,64	6,68							3,60	2,16	16,65	101
103	11,24	11,24	6,90	24,62	13,39	1,77										1,08	0,43	16,94	102
77	12,82	12,82	21,94	28,38	15,56	14,19	43,27	14,89	8,52							3,72	2,23	17,23	103
49	10,67	10,67	1,51	23,30	12,63	7,36										1,11	0,44	17,33	104
166	10,94	10,94	4,09	22,97	12,03	11,72	32,69	9,72	29,18							3,75	2,25	17,36	105
78	12,81	12,81	21,93	28,60	15,79	15,84	43,36	14,76	7,59							3,78	2,27	17,50	106
18	10,85	10,85	3,25	23,66	12,81	6,05										1,16	0,46	18,16	107
24	11,10	11,10	5,63	24,20	13,10	3,89										1,19	0,48	18,58	108
100	10,12	10,12	3,73	22,95	12,84	5,83										1,19	0,48	18,67	109
68	10,03	10,03	4,58	22,97	12,94	5,04										1,20	0,48	18,78	110
8	10,45	10,45	0,56	22,82	12,37	9,22										1,22	0,49	19,11	111
182	11,04	11,04	5,07	24,02	12,98	4,79										1,23	0,49	19,25	112
83	11,14	11,14	5,99	24,23	13,09	3,95										1,24	0,50	19,40	113
80	11,12	11,12	5,83	24,15	13,03	4,43										1,28	0,51	20,03	114
71	10,58	10,58	0,66													0,16	0,03	20,51	115
150	11,21	11,21	6,67	24,24	13,03	4,39										1,38	0,55	21,60	116
141	10,71	10,71	1,93	23,09	12,37	9,22										1,39	0,56	21,76	117
142	10,71	10,71	1,93	23,09	12,37	9,22										1,39	0,56	21,76	118
21	11,19	11,19	6,44	24,16	12,97	4,85										1,41	0,56	22,05	119
174	10,70	10,70	1,81	23,00	12,30	9,76										1,45	0,58	22,59	120
140	10,59	10,59	0,73													0,18	0,04	22,80	121
1	10,51	10,51	0,03	22,56	12,04	11,64										1,46	0,58	22,80	122
55	11,41	11,41	8,58	24,62	13,20	3,13										1,46	0,59	22,88	123
27	11,18	11,18	6,41	24,09	12,91	5,31										1,47	0,59	22,90	124
81	11,13	11,13	5,88	23,93	12,80	6,07										1,49	0,60	23,35	125
144	10,62	10,62	1,08	22,73	12,10	11,20										1,53	0,61	23,98	126
25	10,58	10,58	0,67	22,57	11,99	12,02										1,59	0,63	24,78	127
148	11,17	11,17	6,30	23,91	12,74	6,54										1,61	0,64	25,09	128
186	11,12	11,12	5,82	23,74	12,62	7,43										1,66	0,66	25,88	129
9	11,22	11,22	6,75	23,94	12,72	6,68										1,68	0,67	26,22	130
88	11,36	11,36	8,09	24,21	12,85	5,73										1,73	0,69	26,98	131
138	10,63	10,63	1,10	22,50	11,88	12,85										1,74	0,70	27,25	132
143	10,63	10,63	1,10	22,50	11,88	12,85										1,74	0,70	27,25	133
133	10,34	10,34	1,65	22,29	11,95	12,32										1,75	0,70	27,27	134
164	11,06	11,06	5,25	23,46	12,40	9,02										1,78	0,71	27,87	135

	Tramo 0-0,5			Tramo 0,5-1			Tramo 1-1,5			Tramo 1,5-2,5			Tramo 2,5-3,5			Criterio de selección			
	A <sub>Acum</sub> 0-0,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-0,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0,5-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-1,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1,5-2,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-3,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2,5-3,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
EXP	10,51	10,51		24,14	13,63		37,86	13,72		63,07	25,21		84,26	21,19					
139	10,63	10,63	1,10	22,37	11,74	13,83									1,87	0,75	29,16	136	
92	11,52	11,52	9,63	25,92	14,40	5,62									1,91	0,76	29,79	137	
185	11,22	11,22	6,72	23,67	12,45	8,66									1,92	0,77	30,03	138	
22	10,62	10,62	1,00												0,25	0,05	31,35	139	
6	11,22	11,22	6,76	23,49	12,27	10,01									2,10	0,84	32,74	140	
5	10,62	10,62	1,06												0,27	0,05	33,25	141	
59	10,97	10,97	4,37	22,84	11,87	12,93									2,16	0,87	33,79	142	
87	11,23	11,23	6,87	23,43	12,19	10,53									2,17	0,87	33,98	143	
7	10,63	10,63	1,12												0,28	0,06	35,00	144	
12	10,82	10,82	2,98	22,28	11,45	15,96									2,37	0,95	36,99	145	
159	10,63	10,63	1,19												0,30	0,06	37,14	146	
113	9,08	9,08	13,63	21,87	12,79	6,17									2,47	0,99	38,66	147	
64	9,34	9,34	11,10	21,70	12,36	9,33									2,55	1,02	39,90	148	
26	10,65	10,65	1,33												0,33	0,07	41,66	149	
98	10,05	10,05	4,41	21,17	11,13	18,36									2,85	1,14	44,46	150	
31	10,35	10,35	1,49												0,37	0,07	46,57	151	
162	9,24	9,24	12,06	21,13	11,89	12,77									3,10	1,24	48,51	152	
45	12,70	12,70	20,83	26,93	14,23	4,41									3,16	1,26	49,30	153	
29	10,68	10,68	1,59												0,40	0,08	49,67	154	
75	9,26	9,26	11,90	20,93	11,67	14,38									3,28	1,31	51,33	155	
76	9,53	9,53	9,37	20,82	11,30	17,12									3,31	1,32	51,74	156	
58	10,68	10,68	1,66												0,41	0,08	51,77	157	
154	10,69	10,69	1,67												0,42	0,08	52,27	158	
158	9,38	9,38	10,72	20,76	11,38	16,53									3,41	1,36	53,22	159	
151	9,04	9,04	14,02	20,76	11,72	14,02									3,50	1,40	54,75	160	
131	10,33	10,33	1,75												0,44	0,09	54,81	161	
181	10,71	10,71	1,86												0,47	0,09	58,27	162	
10	10,28	10,28	2,15												0,54	0,11	67,20	163	
61	10,50	10,50	0,09	19,43	8,93	34,48									4,32	1,73	67,53	164	
161	9,01	9,01	14,31	19,68	10,67	21,70									4,50	1,80	70,33	165	
48	12,80	12,80	21,80	28,44	15,64	14,76									4,57	1,83	71,40	166	
122	13,32	13,32	26,77	28,41	15,09	10,70									4,68	1,87	73,19	167	
112	9,02	9,02	14,20	19,40	10,38	23,86									4,76	1,90	74,34	168	
79	12,82	12,82	21,93	28,65	15,83	16,15									4,76	1,90	74,39	169	
96	9,97	9,97	5,10	18,42	8,45	38,00									5,39	2,15	84,18	170	
126	10,23	10,23	2,71												0,68	0,14	84,58	171	
123	13,45	13,45	27,94	30,10	16,66	22,21									6,27	2,51	97,96	172	
124	13,42	13,42	27,72	30,15	16,72	22,70									6,30	2,52	98,46	173	
57	10,07	10,07	4,18												1,04	0,21	130,60	174	
152	7,19	7,19	31,57	15,11	7,91	41,93									9,19	3,68	143,56	175	
62	11,02	11,02	4,85												1,21	0,24	151,54	176	
172	11,02	11,02	4,85												1,21	0,24	151,69	177	
89	6,90	6,90	34,40	14,16	7,26	46,72									10,14	4,06	158,43	178	
149	11,21	11,21	6,64												1,66	0,33	207,46	179	
90	11,24	11,24	6,94												1,73	0,35	216,79	180	

COMBINACIONES NUMÉRICAS

	Tramo 0-0,5			Tramo 0,5-1			Tramo 1-1,5			Tramo 1,5-2,5			Tramo 2,5-3,5			Criterio de selección			
	A <sub>Acum</sub> 0-0,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-0,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0,5-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-1,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1,5-2,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-3,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2,5-3,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
EXP	10,51	10,51		24,14	13,63		37,86	13,72		63,07	25,21		84,26	21,19					
3	11,27	11,27	7,22													1,80	0,36	225,51	181
99	9,72	9,72	7,56													1,89	0,38	236,23	182
54	11,37	11,37	8,15													2,04	0,41	254,60	183
102	11,40	11,40	8,46													2,11	0,42	264,23	184
188	11,43	11,43	8,71													2,18	0,44	272,31	185
73	9,42	9,42	10,37													2,59	0,52	323,92	186
156	9,16	9,16	12,81													3,20	0,64	400,32	187
120	8,80	8,80	16,25													4,06	0,81	507,76	188
35	7,30	7,30	30,50													7,63	1,53	953,19	189
30	6,88	6,88	34,50													8,62	1,72	1078,01	190
157	4,57	4,57	56,51													14,13	2,83	1765,96	191
39	NO CONVERGE																		192
85	NO CONVERGE																		193
91	NO CONVERGE																		194

COMB N U M É R I C A S

Tabla D. 2. Obtención de las mejores combinaciones numéricas, ASTM1018.

	Tramo 0-0,5			Tramo 0,5-1			Tramo 1-1,5			Tramo 1,5-2			Tramo 2-2,5			Criterio de selección			
	A <sub>Acum</sub> 0-0,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-0,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0,5-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-1,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1,5-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-2,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
EXP	11,97	11,97		24,93	12,96		36,73	11,80		47,60	10,87		57,56	9,96					
93	11,43	11,43	4,58	25,11	13,68	5,60	38,17	13,06	10,67	47,85	9,68	10,87	57,51	9,66	3,06	1,31	1,31	1,31	1
43	10,97	10,97	8,41	24,80	13,83	6,75	37,12	12,32	4,40	48,74	11,62	6,90	59,22	10,49	5,26	1,35	1,35	1,35	2
91	11,37	11,37	5,07	24,95	13,58	4,81	38,06	13,11	11,10	50,02	11,96	10,11	61,10	11,07	11,16	1,47	1,47	1,47	3
27	10,97	10,97	8,37	24,81	13,84	6,81	37,79	12,98	9,94	49,67	11,89	9,40	59,79	10,12	1,56	1,54	1,54	1,54	4
29	10,35	10,35	13,54	24,16	13,81	6,59	36,34	12,18	3,17	46,90	10,56	2,79	57,73	10,82	8,64	1,63	1,63	1,63	5
145	10,15	10,15	15,21	23,68	13,53	4,42	36,00	12,32	4,39	47,65	11,64	7,16	57,80	10,15	1,92	1,64	1,64	1,64	6
95	10,12	10,12	15,53	23,92	13,80	6,52	34,81	10,90	7,67	45,37	10,55	2,89	56,02	10,65	6,94	1,92	1,92	1,92	7
144	10,17	10,17	15,05	23,89	13,72	5,88	36,83	12,93	9,59	47,77	10,95	0,75	58,62	10,84	8,84	1,92	1,92	1,92	8
138	10,17	10,17	15,05	23,90	13,73	5,96	36,26	12,36	4,75	46,50	10,24	5,78	55,02	8,51	14,55	1,95	1,95	1,95	9
143	10,17	10,17	15,05	23,90	13,73	5,96	36,26	12,36	4,75	46,50	10,24	5,78	55,02	8,51	14,55	1,95	1,95	1,95	10
33	10,02	10,02	16,32	23,75	13,73	5,98	36,55	12,80	8,43	48,07	11,52	6,01	58,41	10,34	3,81	1,98	1,98	1,98	11
5	10,39	10,39	13,25	24,16	13,77	6,27	37,73	13,57	14,98	49,09	11,37	4,60	58,82	9,73	2,31	1,98	1,98	1,98	12
136	10,31	10,31	13,90	24,14	13,82	6,70	37,72	13,59	15,13	48,92	11,20	3,08	58,85	9,93	0,35	1,98	1,98	1,98	13
2	10,39	10,39	13,20	24,22	13,82	6,68	37,11	12,90	9,27	48,11	10,99	1,19	59,99	11,88	19,23	2,04	2,04	2,04	14
1	10,26	10,26	14,31	23,69	13,43	3,62	36,98	13,30	12,66	47,33	10,35	4,78	58,60	11,27	13,13	2,05	2,05	2,05	15
142	10,39	10,39	13,21	24,24	13,85	6,86	37,56	13,32	12,83	49,08	11,52	6,04	59,77	10,69	7,30	2,05	2,05	2,05	16
181	10,38	10,38	13,34	24,20	13,82	6,68	37,21	13,01	10,21	50,06	12,86	18,32	60,12	10,06	0,95	2,06	2,06	2,06	17
188	11,25	11,25	6,06	25,27	14,02	8,22	39,49	14,22	20,51	51,85	12,36	13,74	62,51	10,66	7,01	2,07	2,07	2,07	18
49	10,37	10,37	13,36	24,14	13,77	6,25	36,43	12,29	4,15	47,04	10,61	2,40	60,15	13,11	31,64	2,09	2,09	2,09	19
154	10,25	10,25	14,39	24,28	14,03	8,27	37,53	13,25	12,29	49,23	11,69	7,63	59,47	10,25	2,84	2,12	2,12	2,12	20
56	10,38	10,38	13,31	24,20	13,82	6,66	37,74	13,54	14,73	49,30	11,55	6,33	60,01	10,72	7,59	2,13	2,13	2,13	21
72	10,19	10,19	14,92	24,06	13,87	7,06	37,01	12,96	9,76	48,43	11,41	5,05	59,68	11,25	12,93	2,15	2,15	2,15	22
23	10,34	10,34	13,68	24,12	13,79	6,40	36,79	12,67	7,33	49,33	12,54	15,43	60,65	11,31	13,57	2,15	2,15	2,15	23
70	10,21	10,21	14,78	24,02	13,82	6,64	37,22	13,20	11,82	48,51	11,29	3,91	59,67	11,16	12,05	2,16	2,16	2,16	24
71	10,15	10,15	15,27	23,78	13,64	5,24	37,51	13,73	16,34	48,26	10,75	1,07	59,03	10,77	8,08	2,17	2,17	2,17	25
20	10,38	10,38	13,35	24,27	13,90	7,25	37,36	13,09	10,92	47,95	10,59	2,57	55,94	7,99	19,84	2,18	2,18	2,18	26
153	10,38	10,38	13,35	24,27	13,90	7,25	37,36	13,09	10,92	47,95	10,59	2,57	55,94	7,99	19,84	2,18	2,18	2,18	27
22	10,35	10,35	13,57	24,16	13,81	6,59	37,62	13,46	14,08	49,78	12,15	11,84	60,29	10,51	5,51	2,19	2,19	2,19	28
47	12,04	12,04	0,51	26,42	14,39	11,03	41,41	14,99	27,02	53,67	12,26	12,82	65,06	11,39	14,30	2,21	2,21	2,21	29
139	10,17	10,17	15,05	23,90	13,72	5,92	36,98	13,09	10,88	48,03	11,04	1,64	59,98	11,95	19,99	2,22	2,22	2,22	30
137	10,38	10,38	13,29	24,13	13,75	6,09	37,71	13,58	15,10	49,02	11,31	4,11	60,58	11,55	15,97	2,24	2,24	2,24	31
146	10,38	10,38	13,29	24,13	13,75	6,09	37,71	13,58	15,10	49,02	11,31	4,11	60,58	11,55	15,97	2,24	2,24	2,24	32
173	10,32	10,32	13,85	24,09	13,78	6,33	37,07	12,98	9,98	48,76	11,69	7,59	60,81	12,05	20,93	2,26	2,26	2,26	33
25	10,38	10,38	13,34	24,04	13,66	5,47	37,89	13,85	17,35	49,83	11,94	9,86	58,96	9,13	8,36	2,27	2,27	2,27	34
101	10,25	10,25	14,44	24,23	13,99	7,97	37,49	13,25	12,27	48,44	10,95	0,79	60,14	11,71	17,52	2,27	2,27	2,27	35
178	10,85	10,85	9,42	24,44	13,59	4,88	38,52	14,08	19,30	48,74	10,22	5,90	61,11	12,37	24,15	2,28	2,28	2,28	36
161	8,66	8,66	27,68	21,64	12,98	0,19	33,13	11,49	2,68	43,35	10,22	5,91	53,93	10,58	6,18	2,30	2,30	2,30	37
19	10,29	10,29	14,03	24,15	13,86	6,94	38,48	14,33	21,41	49,64	11,16	2,74	59,91	10,27	3,06	2,30	2,30	2,30	38
174	10,24	10,24	14,44	24,23	13,99	7,94	37,85	13,62	15,40	48,13	10,28	5,39	57,05	8,92	10,44	2,34	2,34	2,34	39
58	10,25	10,25	14,39	24,16	13,91	7,35	37,90	13,74	16,38	49,70	11,80	8,63	60,38	10,68	7,17	2,35	2,35	2,35	40
179	10,39	10,39	13,21	24,24	13,84	6,85	37,66	13,42	13,70	50,81	13,15	21,06	61,42	10,61	6,49	2,37	2,37	2,37	41
21	10,95	10,95	8,52	24,67	13,71	5,85	39,03	14,36	21,65	51,11	12,08	11,21	63,03	11,92	19,67	2,37	2,37	2,37	42
12	11,03	11,03	7,88	24,52	13,48	4,07	35,86	11,34	3,91	47,07	11,21	3,19			1,22	0,98	2,38	43	
158	8,20	8,20	31,50	21,31	13,11	1,20	32,98	11,67	1,15	44,27	11,29	3,90	54,18	9,91	0,50	2,40	2,40	2,40	44
4	10,41	10,41	13,09	24,19	13,79	6,41	38,29	14,09	19,40	48,65	10,36	4,64	60,35	11,70	17,48	2,46	2,46	2,46	45

	Tramo 0-0,5			Tramo 0,5-1			Tramo 1-1,5			Tramo 1,5-2			Tramo 2-2,5			Criterio de selección			
	A <sub>Acum</sub> 0-0,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-0,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0,5-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-1,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1,5-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-2,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
EXP	11,97	11,97		24,93	12,96		36,73	11,80		47,60	10,87		57,56	9,96					
84	10,29	10,29	14,03	24,20	13,91	7,34	38,43	14,23	20,52	50,39	11,96	10,07	59,93	9,54	4,21	2,46	2,46	2,46	46
51	10,24	10,24	14,44	24,23	13,99	7,95	37,45	13,22	12,03	49,48	12,03	10,70	57,44	7,96	20,10	2,51	2,51	2,51	47
112	8,90	8,90	25,66	21,28	12,38	4,45	33,16	11,88	0,62	45,16	12,00	10,42	56,44	11,29	13,29	2,52	2,52	2,52	48
163	8,69	8,69	27,46	21,74	13,06	0,78	34,52	12,77	8,21	44,41	9,90	8,92	54,67	10,26	2,99	2,53	2,53	2,53	49
129	10,20	10,20	14,80	23,92	13,72	5,89	38,20	14,28	21,01	50,70	12,50	15,03	60,32	9,61	3,51	2,54	2,54	2,54	50
45	12,03	12,03	0,47	26,33	14,30	10,35	41,13	14,80	25,39	50,59	9,46	12,95	56,90	6,31	36,64	2,56	2,56	2,56	51
54	11,16	11,16	6,83	25,09	13,94	7,58	37,22	12,13	2,76	48,59	11,37	4,67				1,33	1,06	2,59	52
140	10,13	10,13	15,42	23,87	13,74	6,04	37,80	13,93	18,03	50,05	12,26	12,79	61,19	11,14	11,80	2,59	2,59	2,59	53
141	10,13	10,13	15,42	23,87	13,74	6,04	37,80	13,93	18,03	50,05	12,26	12,79	61,19	11,14	11,80	2,59	2,59	2,59	54
175	10,25	10,25	14,39	24,25	13,99	8,01	37,98	13,73	16,33	50,35	12,37	13,86	61,69	11,34	13,83	2,61	2,61	2,61	55
90	11,05	11,05	7,72	24,70	13,65	5,38	38,98	14,27	20,94	52,22	13,24	21,84	64,93	12,71	27,58	2,64	2,64	2,64	56
155	8,37	8,37	30,08	21,42	13,04	0,67	34,11	12,69	7,54	45,83	11,72	7,90	56,04	10,21	2,48	2,65	2,65	2,65	57
83	10,74	10,74	10,29	24,61	13,86	7,00	38,27	13,66	15,78	51,02	12,75	17,36	64,21	13,19	32,37	2,70	2,70	2,70	58
86	10,29	10,29	14,03	24,13	13,84	6,80	38,56	14,43	22,26	50,37	11,80	8,64	61,92	11,56	16,01	2,71	2,71	2,71	59
113	9,12	9,12	23,83	22,20	13,08	0,92	34,53	12,33	4,51	46,13	11,60	6,74	59,57	13,44	34,91	2,73	2,73	2,73	60
94	11,36	11,36	5,16	25,19	13,83	6,76	39,44	14,26	20,78	53,37	13,93	28,19	66,68	13,31	33,61	2,77	2,77	2,77	61
88	11,05	11,05	7,72	24,69	13,64	5,31	38,98	14,29	21,04	52,34	13,36	22,96	65,62	13,28	33,34	2,77	2,77	2,77	62
87	11,00	11,00	8,10	24,36	13,36	3,11	35,48	11,12	5,82	45,35	9,87	9,18				1,42	1,14	2,78	63
28	10,23	10,23	14,54	24,27	14,04	8,35	38,92	14,65	24,13	50,52	11,60	6,73	61,77	11,25	12,90	2,79	2,79	2,79	64
76	8,31	8,31	30,60	21,43	13,12	1,28	34,02	12,59	6,66	45,11	11,09	2,02	56,50	11,40	14,39	2,80	2,80	2,80	65
11	10,10	10,10	15,64	21,72	11,61	10,36	31,44	9,72	17,63	40,92	9,48	12,75	49,44	8,52	14,48	2,86	2,86	2,86	66
26	10,21	10,21	14,77	24,10	13,90	7,26	36,71	12,61	6,83	44,05	7,34	32,49	51,20	7,15	28,23	2,88	2,88	2,88	67
110	9,72	9,72	18,86	23,14	13,43	3,62	35,59	12,45	5,51	42,91	7,32	32,67	50,24	7,33	26,40	2,90	2,90	2,90	68
32	10,24	10,24	14,45	23,91	13,67	5,48	38,33	14,41	22,13	51,69	13,36	22,95	63,05	11,37	14,10	2,91	2,91	2,91	69
156	8,26	8,26	31,05	20,89	12,63	2,53	31,43	10,54	10,68	41,34	9,91	8,82	51,25	9,92	0,45	2,91	2,91	2,91	70
48	12,04	12,04	0,53	26,30	14,27	10,11	41,09	14,78	25,23	56,58	15,50	42,62	69,12	12,54	25,91	2,92	2,92	2,92	71
128	9,66	9,66	19,31	23,20	13,54	4,50	37,57	14,37	21,72	50,05	12,48	14,85	61,46	11,41	14,54	3,03	3,03	3,03	72
53	11,25	11,25	6,06	25,26	14,01	8,15	39,62	14,36	21,66	52,41	12,79	17,68	67,28	14,88	49,32	3,04	3,04	3,04	73
78	12,04	12,04	0,53	26,25	14,21	9,70	41,17	14,92	26,38	56,40	15,23	40,16	70,27	13,87	39,20	3,17	3,17	3,17	74
14	10,41	10,41	13,08	24,26	13,85	6,93	39,01	14,75	24,98	52,40	13,39	23,24	64,60	12,20	22,48	3,18	3,18	3,18	75
50	10,41	10,41	13,08	24,26	13,85	6,93	39,01	14,75	24,98	52,40	13,39	23,24	64,60	12,20	22,48	3,18	3,18	3,18	76
186	10,90	10,90	9,00	24,57	13,68	5,55	36,07	11,50	2,58	45,36	9,29	14,53				1,63	1,30	3,18	77
180	10,24	10,24	14,44	24,23	13,99	7,95	38,27	14,04	18,92	50,65	12,38	13,96	64,37	13,72	37,74	3,20	3,20	3,20	78
134	10,15	10,15	15,22	24,17	14,02	8,21	38,18	14,01	18,70	51,17	12,99	19,52	64,09	12,93	29,75	3,21	3,21	3,21	79
135	10,24	10,24	14,49	24,23	13,99	7,97	38,33	14,10	19,45	52,18	13,85	27,45	64,55	12,38	24,23	3,22	3,22	3,22	80
46	12,04	12,04	0,53	26,25	14,21	9,66	41,17	14,92	26,44	56,57	15,40	41,71	70,66	14,09	41,46	3,24	3,24	3,24	81
8	10,39	10,39	13,25	24,16	13,77	6,29	38,13	13,98	18,41	50,32	12,19	12,16	65,36	15,04	50,99	3,24	3,24	3,24	82
79	12,04	12,04	0,53	26,24	14,21	9,64	41,18	14,94	26,57	56,42	15,23	40,21	70,76	14,34	43,96	3,27	3,27	3,27	83
77	12,04	12,04	0,53	26,25	14,21	9,66	41,18	14,93	26,51	56,42	15,25	40,31	70,82	14,40	44,52	3,28	3,28	3,28	84
13	10,23	10,23	14,55	24,03	13,80	6,50	38,81	14,78	25,22	52,59	13,78	26,82	64,54	11,95	19,94	3,29	3,29	3,29	85
185	11,00	11,00	8,17	24,86	13,86	6,97	38,77	13,91	17,87	51,89	13,12	20,74	68,11	16,22	62,80	3,31	3,31	3,31	86
126	9,44	9,44	21,18	22,68	13,24	2,21	30,79	8,10	31,33	40,29	9,50	12,53	49,19	8,89	10,72	3,31	3,31	3,31	87
147	8,43	8,43	29,58	21,52	13,08	0,99	35,38	13,87	17,49	47,48	12,09	11,31	58,79	11,31	13,53	3,32	3,32	3,32	88
166	10,75	10,75	10,23	24,33	13,58	4,78	35,13	10,81	8,43	45,57	10,44	3,93				1,71	1,37	3,35	89
148	10,89	10,89	9,04	24,66	13,77	6,30	36,95	12,29	4,11	49,26	12,31	13,26				1,72	1,38	3,36	90

	Tramo 0-0,5			Tramo 0,5-1			Tramo 1-1,5			Tramo 1,5-2			Tramo 2-2,5			Criterio de selección			
	A <sub>Acum</sub> 0-0,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-0,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0,5-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-1,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1,5-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-2,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
EXP	11,97	11,97		24,93	12,96		36,73	11,80		47,60	10,87		57,56	9,96					
127	9,62	9,62	19,65	23,30	13,68	5,60	38,10	14,79	25,32	51,18	13,08	20,42	63,16	11,98	20,30	3,48	3,48	3,48	91
109	9,57	9,57	20,08	23,13	13,56	4,63	37,93	14,80	25,39	51,35	13,43	23,57	63,34	11,99	20,36	3,53	3,53	3,53	92
103	11,16	11,16	6,81	24,71	13,55	4,58	38,63	13,92	17,97	49,32	10,69	1,65			1,82	1,46	3,56	93	
114	8,96	8,96	25,22	22,12	13,17	1,61	36,27	14,15	19,92	49,70	13,42	23,55	62,04	12,34	23,84	3,59	3,59	3,59	94
165	10,74	10,74	10,28	24,45	13,71	5,81	36,89	12,44	5,38	49,14	12,25	12,75			1,85	1,48	3,61	95	
74	8,46	8,46	29,33	21,39	12,92	0,25	34,81	13,43	13,76	49,01	14,20	30,69	60,91	11,90	19,45	3,62	3,62	3,62	96
75	8,20	8,20	31,54	21,10	12,91	0,39	33,97	12,87	9,02	42,64	8,67	20,23	49,40	6,76	32,18	3,64	3,64	3,64	97
81	10,96	10,96	8,51	24,62	13,67	5,47	37,45	12,83	8,69	49,85	12,40	14,12			1,87	1,50	3,66	98	
59	10,73	10,73	10,37	24,40	13,67	5,52	35,45	11,05	6,40	44,93	9,48	12,76			1,89	1,51	3,69	99	
37	10,40	10,40	13,12	24,16	13,75	6,16	38,53	14,37	21,78	52,67	14,14	30,14	67,76	15,09	51,49	3,73	3,73	3,73	100
111	9,62	9,62	19,62	23,19	13,56	4,68	37,41	14,22	20,52	51,04	13,63	25,47	65,02	13,97	40,24	3,74	3,74	3,74	101
61	9,57	9,57	20,10	21,06	11,49	11,31	30,56	9,50	19,50	38,84	8,28	23,82	46,21	7,38	25,95	3,75	3,75	3,75	102
192	9,85	9,85	17,77	23,73	13,89	7,18	38,05	14,32	21,30	52,25	14,20	30,71	65,66	13,40	34,56	3,76	3,76	3,76	103
102	11,26	11,26	5,93	24,79	13,53	4,42	38,98	14,19	20,20	50,52	11,54	6,22			1,96	1,57	3,83	104	
66	9,72	9,72	18,83	23,13	13,41	3,51	37,93	14,80	25,37	52,34	14,42	32,67	65,78	13,43	34,84	3,86	3,86	3,86	105
38	8,50	8,50	28,97	21,60	13,09	1,04	35,45	13,85	17,37	49,36	13,91	28,00	62,00	12,64	26,86	3,87	3,87	3,87	106
193	9,88	9,88	17,51	23,91	14,03	8,31	37,76	13,84	17,29	51,72	13,96	28,49	66,68	14,97	50,22	3,91	3,91	3,91	107
18	11,22	11,22	6,33	24,45	13,24	2,16	37,98	13,53	14,62	51,59	13,61	25,23			2,05	1,64	4,01	108	
41	9,53	9,53	20,42	22,44	12,91	0,33	36,56	14,12	19,63	50,68	14,12	29,96	66,54	15,86	59,16	4,01	4,01	4,01	109
104	11,23	11,23	6,21	24,91	13,68	5,60	38,99	14,08	19,29	50,83	11,84	8,97			2,08	1,67	4,07	110	
130	10,19	10,19	14,88	23,79	13,59	4,92	38,34	14,55	23,29	53,47	15,13	39,27	68,76	15,29	53,45	4,07	4,07	4,07	111
105	11,24	11,24	6,17	24,82	13,59	4,86	38,84	14,02	18,81	51,06	12,22	12,46			2,10	1,68	4,09	112	
151	8,33	8,33	30,42	21,29	12,95	0,02	30,06	8,78	25,64	37,66	7,60	30,09	45,86	8,20	17,66	4,11	4,11	4,11	113
160	9,58	9,58	19,97	23,17	13,59	4,85	37,65	14,48	22,66	51,26	13,61	25,30	66,78	15,52	55,77	4,17	4,17	4,17	114
40	8,88	8,88	25,87	22,02	13,15	1,48	36,51	14,48	22,69	51,67	15,17	39,58	64,56	12,89	29,35	4,17	4,17	4,17	115
176	10,74	10,74	10,27	24,68	13,93	7,52	37,72	13,05	10,53	49,69	11,97	10,15			2,15	1,72	4,20	116	
17	10,45	10,45	12,76	24,18	13,73	5,98	39,11	14,94	26,55	54,28	15,16	39,55	70,10	15,82	58,82	4,22	4,22	4,22	117
96	9,24	9,24	22,84	19,23	9,99	22,89	28,72	9,49	19,60	37,39	8,67	20,20	45,87	8,48	14,88	4,23	4,23	4,23	118
97	9,88	9,88	17,47	23,58	13,70	5,70	38,62	15,05	27,49	53,37	14,74	35,69	67,88	14,51	45,67	4,23	4,23	4,23	119
36	10,34	10,34	13,67	24,18	13,85	6,86	38,97	14,79	25,32	54,37	15,39	41,68	69,95	15,59	56,44	4,28	4,28	4,28	120
82	10,74	10,74	10,29	24,61	13,86	6,99	37,90	13,30	12,68	49,83	11,93	9,75			2,22	1,77	4,33	121	
169	11,00	11,00	8,17	24,86	13,86	6,98	38,32	13,46	14,03	50,76	12,45	14,57			2,22	1,77	4,33	122	
80	10,74	10,74	10,29	24,60	13,86	6,98	37,87	13,27	12,39	49,89	12,02	10,63			2,22	1,78	4,34	123	
150	11,00	11,00	8,17	24,86	13,86	6,97	38,35	13,50	14,35	50,82	12,46	14,69			2,24	1,79	4,37	124	
6	10,75	10,75	10,24	24,60	13,85	6,91	37,60	13,00	10,16	50,22	12,62	16,15			2,24	1,79	4,37	125	
177	10,74	10,74	10,27	24,66	13,92	7,43	37,68	13,01	10,25	50,17	12,50	15,00			2,25	1,80	4,39	126	
121	8,52	8,52	28,89	21,81	13,30	2,63	35,82	14,00	18,64	49,62	13,80	27,01	64,38	14,77	48,23	4,40	4,40	4,40	127
162	8,47	8,47	29,29	21,78	13,31	2,76	34,77	12,99	10,09	48,80	14,03	29,13	64,90	16,09	61,55	4,41	4,41	4,41	128
187	11,00	11,00	8,17	24,86	13,86	6,98	38,26	13,40	13,53	51,02	12,76	17,46			2,26	1,81	4,42	129	
184	10,74	10,74	10,29	24,60	13,86	6,98	38,04	13,43	13,82	49,94	11,90	9,50			2,27	1,81	4,42	130	
3	11,00	11,00	8,16	24,86	13,86	6,98	38,36	13,50	14,39	50,99	12,63	16,26			2,28	1,82	4,45	131	
171	10,75	10,75	10,25	24,64	13,89	7,22	38,20	13,56	14,88	49,88	11,68	7,49			2,28	1,82	4,45	132	
24	10,97	10,97	8,41	24,83	13,86	7,00	38,63	13,80	16,95	50,64	12,01	10,51			2,28	1,83	4,46	133	
67	9,59	9,59	19,91	23,19	13,60	4,94	37,81	14,62	23,91	53,39	15,57	43,33	68,46	15,07	51,29	4,49	4,49	4,49	134
168	11,00	11,00	8,17	24,86	13,86	6,97	38,41	13,56	14,87	51,06	12,64	16,37			2,30	1,84	4,50	135	

COMBINACIONES NUMÉRICAS

	Tramo 0-0,5			Tramo 0,5-1			Tramo 1-1,5			Tramo 1,5-2			Tramo 2-2,5			Criterio de selección			
	A <sub>Acum</sub> 0-0,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-0,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0,5-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-1,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1,5-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-2,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
EXP	11,97	11,97		24,93	12,96		36,73	11,80		47,60	10,87		57,56	9,96					
159	10,12	10,12	15,47	23,94	13,82	6,64	38,64	14,70	24,54	54,28	15,64	43,94	70,45	16,17	62,31	4,52	4,52	4,52	136
119	8,66	8,66	27,65	21,61	12,95	0,07	36,43	14,82	25,59	50,51	14,08	29,58	65,42	14,91	49,62	4,55	4,55	4,55	137
170	10,75	10,75	10,25	24,61	13,87	7,03	38,11	13,50	14,39	50,17	12,05	10,93				2,33	1,86	4,55	138
133	10,03	10,03	16,21	23,70	13,67	5,47	35,22	11,52	2,37	44,07	8,85	18,54				2,34	1,87	4,57	139
9	11,00	11,00	8,16	24,85	13,86	6,95	38,50	13,65	15,63	51,20	12,70	16,84				2,35	1,88	4,59	140
31	9,46	9,46	20,98	18,17	8,71	32,77	27,00	8,83	25,22	35,84	8,84	18,66	44,87	9,04	9,30	4,68	4,68	4,68	141
182	10,90	10,90	8,95	24,66	13,76	6,18	38,40	13,74	16,38	51,05	12,65	16,45				2,40	1,92	4,69	142
63	8,76	8,76	26,88	21,99	13,24	2,16	36,60	14,61	23,78	52,02	15,41	41,86	66,93	14,91	49,69	4,77	4,77	4,77	143
60	10,75	10,75	10,25	24,62	13,87	7,09	38,54	13,92	17,91	50,34	11,80	8,60				2,45	1,96	4,79	144
62	10,75	10,75	10,26	24,64	13,90	7,27	39,06	14,41	22,12	49,96	10,90	0,31				2,47	1,97	4,82	145
44	11,00	11,00	8,17	24,86	13,86	6,97	38,77	13,92	17,90	51,51	12,74	17,21				2,48	1,98	4,83	146
149	11,00	11,00	8,16	24,86	13,86	6,96	38,95	14,10	19,43	51,45	12,50	15,05				2,50	2,00	4,88	147
172	10,75	10,75	10,26	24,65	13,90	7,27	38,73	14,08	19,30	50,44	11,72	7,86				2,51	2,01	4,91	148
164	10,75	10,75	10,24	24,61	13,87	7,03	38,38	13,77	16,64	50,83	12,45	14,60				2,53	2,03	4,95	149
55	11,25	11,25	6,06	25,26	14,01	8,14	39,53	14,27	20,93	52,40	12,87	18,46				2,55	2,04	4,97	150
183	10,74	10,74	10,28	24,57	13,83	6,71	38,22	13,65	15,61	51,10	12,88	18,58				2,56	2,05	5,01	151
167	11,00	11,00	8,17	24,86	13,86	6,98	38,91	14,05	19,05	51,78	12,87	18,45				2,56	2,05	5,01	152
92	11,49	11,49	4,08	25,15	13,66	5,46	39,37	14,22	20,46	54,14	14,77	35,95				2,62	2,10	5,12	153
10	10,16	10,16	15,19	23,21	13,05	0,75	32,67	9,46	19,86	42,36	9,69	10,81				2,64	2,11	5,15	154
117	10,75	10,75	10,24	24,65	13,90	7,31	39,04	14,39	21,89	50,90	11,86	9,13				2,68	2,14	5,23	155
64	8,59	8,59	28,24	21,71	13,12	1,23	36,68	14,97	26,85	52,23	15,55	43,14	68,44	16,21	62,68	5,23	5,23	5,23	156
65	8,59	8,59	28,24	21,71	13,12	1,23	36,68	14,97	26,85	52,23	15,55	43,14	68,44	16,21	62,68	5,23	5,23	5,23	157
106	10,75	10,75	10,25	24,53	13,78	6,34	39,02	14,49	22,80	51,04	12,02	10,59				2,70	2,16	5,27	158
116	10,75	10,75	10,25	24,62	13,87	7,09	38,97	14,35	21,58	51,31	12,34	13,59				2,76	2,21	5,39	159
42	11,00	11,00	8,17	24,86	13,86	6,99	38,93	14,07	19,19	52,75	13,83	27,25				2,79	2,23	5,45	160
57	8,54	8,54	28,69	16,79	8,25	36,35	25,31	8,53	27,74	34,66	9,35	13,95	42,64	7,98	19,90	5,61	5,61	5,61	161
7	10,44	10,44	12,86	24,17	13,74	6,04	38,35	14,17	20,09	51,08	12,74	17,21				2,94	2,35	5,74	162
15	11,00	11,00	8,12	24,83	13,83	6,70	39,33	14,51	22,90	53,09	13,76	26,61				2,94	2,35	5,74	163
190	11,25	11,25	6,09	25,24	13,99	8,00	39,84	14,60	23,74	54,38	14,53	33,75				3,06	2,45	5,98	164
52	11,24	11,24	6,10	25,24	14,00	8,04	39,83	14,59	23,64	54,43	14,59	34,29				3,08	2,46	6,01	165
16	10,33	10,33	13,77	23,72	13,40	3,41	37,75	14,03	18,85	52,06	14,30	31,65				3,15	2,52	6,16	166
191	11,24	11,24	6,14	25,23	13,99	7,97	39,93	14,70	24,53	55,00	15,07	38,73				3,23	2,58	6,31	167
194	9,57	9,57	20,09	22,83	13,26	2,35	36,77	13,94	18,10	49,67	12,90	18,74				3,28	2,62	6,40	168
120	7,13	7,13	40,46	15,60	8,47	34,64	24,08	8,48	28,13	32,63	8,55	21,34	41,15	8,52	14,51	6,41	6,41	6,41	169
118	10,74	10,74	10,35	24,42	13,69	5,63	38,93	14,51	22,91	53,66	14,74	35,62				3,29	2,63	6,43	170
189	11,24	11,24	6,10	25,31	14,07	8,57	39,89	14,58	23,55	55,38	15,49	42,54				3,31	2,65	6,46	171
107	10,73	10,73	10,38	24,39	13,66	5,41	38,87	14,48	22,70	53,83	14,95	37,62				3,32	2,66	6,49	172
122	12,40	12,40	3,56	27,07	14,67	13,21	42,80	15,73	33,27	56,17	13,37	23,06				3,38	2,70	6,60	173
108	10,75	10,75	10,19	24,60	13,85	6,86	39,13	14,53	23,15	54,06	14,92	37,36				3,41	2,73	6,66	174
131	10,02	10,02	16,29	22,00	11,98	7,56	31,49	9,49	19,63	39,70	8,21	24,44				3,49	2,79	6,82	175
115	9,09	9,09	24,06	22,13	13,04	0,64	36,33	14,20	20,29	51,17	14,84	36,61				4,08	3,26	7,96	176
132	10,02	10,02	16,30	24,06	14,04	8,35	38,95	14,88	26,11	54,39	15,44	42,12				4,31	3,45	8,41	177
123	12,46	12,46	4,01	27,39	14,93	15,24	43,14	15,75	33,47	59,85	16,71	53,78				4,32	3,46	8,44	178
34	5,74	5,74	52,10	13,08	7,35	43,28	20,37	7,28	38,31	27,76	7,40	31,94	35,38	7,62	23,55	8,45	8,45	8,45	179
68	9,62	9,62	19,63	23,37	13,75	6,09	38,06	14,69	24,44	53,79	15,74	44,82				4,44	3,55	8,67	180

COMBINACIONES NUMÉRICAS

	Tramo 0-0,5			Tramo 0,5-1			Tramo 1-1,5			Tramo 1,5-2			Tramo 2-2,5			Criterio de selección			
	A <sub>Acum</sub> 0-0,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-0,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0,5-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-1,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1,5-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-2,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
EXP	11,97	11,97		24,93	12,96		36,73	11,80		47,60	10,87		57,56	9,96					
69	9,62	9,62	19,63	23,37	13,75	6,09	38,06	14,69	24,44	53,79	15,74	44,82				4,44	3,55	8,67	181
124	12,59	12,59	5,17	27,38	14,79	14,12	43,57	16,19	37,16	60,28	16,71	53,81				4,54	3,63	8,86	182
125	12,41	12,41	3,67	27,56	15,15	16,92	43,77	16,21	37,31	60,70	16,93	55,80				4,64	3,71	9,06	183
98	9,41	9,41	21,41	21,14	11,72	9,51	27,82	6,68	43,40	35,77	7,95	26,83				5,31	4,25	10,37	184
73	8,15	8,15	31,96	18,84	10,69	17,46	27,03	8,19	30,64	35,56	8,54	21,44				5,96	4,76	11,63	185
99	8,68	8,68	27,53	17,68	9,00	30,53	26,51	8,83	25,21	35,09	8,59	20,96				6,10	4,88	11,92	186
157	5,86	5,86	51,10	10,94	5,08	60,79	13,07	2,13	81,96	15,16	2,10	80,69	16,93	1,77	82,25	13,15	13,15	13,15	187
100	21,65	21,65	80,80	18,24	-3,41	126,34	15,91	-2,33	119,74	17,67	1,76	83,77				23,05	18,44	45,02	188
39	3,69	3,69	69,22	7,85	4,16	67,87	12,91	5,06	57,14							17,54	10,52	81,21	189
85	NO TIENE VALOR																		190
89	NO TIENE VALOR																		191
30	NO CONVERGE																		192
35	NO CONVERGE																		193
152	NO CONVERGE																		194

COMBINUMÉRICAS



Tabla D. 3. Obtención de las mejores combinaciones numéricas, Placa 1.

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterio de selección			
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
EXP	15,13	15,13		38,45	23,32		83,98	45,53		128,64	44,66		171,48	42,84		212,87	41,38					
96	14,96	14,96	1,09	34,70	19,74	15,37	79,65	44,96	1,26	133,76	54,11	21,14	192,03	58,27	36,01	253,59	61,56	48,76	2,14	2,14	2,14	1
25	14,81	14,81	2,07	35,16	20,35	12,75	80,41	45,25	0,61	134,84	54,42	21,85	196,40	61,56	43,69	261,82	65,43	58,10	2,21	2,21	2,21	2
26	14,79	14,79	2,21	34,72	19,93	14,53	80,15	45,42	0,23	134,19	54,04	20,99	195,33	61,15	42,73	261,21	65,87	59,18	2,25	2,25	2,25	3
29	14,78	14,78	2,26	34,89	20,11	13,77	80,13	45,24	0,65	134,90	54,77	22,62	195,22	60,32	40,80	261,53	66,32	60,25	2,29	2,29	2,29	4
13	15,06	15,06	0,45	33,82	18,76	19,54	78,78	44,96	1,26	131,92	53,14	18,99	192,06	60,14	40,38	256,16	64,09	54,88	2,30	2,30	2,30	5
95	14,54	14,54	3,89	34,54	20,00	14,24	80,22	45,69	0,34	134,34	54,12	21,16	195,62	61,28	43,04	260,55	64,93	56,91	2,30	2,30	2,30	6
140	14,54	14,54	3,90	34,20	19,67	15,66	78,91	44,71	1,80	132,07	53,15	19,01	191,71	59,64	39,21	256,41	64,70	56,35	2,31	2,31	2,31	7
14	15,07	15,07	0,38	33,91	18,84	19,21	79,29	45,38	0,32	132,90	53,61	20,02	192,73	59,83	39,66	258,25	65,52	58,33	2,31	2,31	2,31	8
50	15,07	15,07	0,38	33,91	18,84	19,21	79,29	45,38	0,32	132,90	53,61	20,02	192,73	59,83	39,66	258,25	65,52	58,33	2,31	2,31	2,31	9
28	15,07	15,07	0,38	34,73	19,66	15,69	80,48	45,75	0,47	135,34	54,86	22,83	197,50	62,16	45,10	264,13	66,62	61,00	2,33	2,33	2,33	10
37	15,07	15,07	0,39	33,87	18,80	19,39	79,19	45,33	0,45	133,13	53,94	20,76	192,93	59,80	39,59	257,99	65,06	57,22	2,34	2,34	2,34	11
36	15,07	15,07	0,39	33,94	18,87	19,06	79,45	45,51	0,05	133,56	54,11	21,15	193,90	60,33	40,83	260,00	66,10	59,73	2,36	2,36	2,36	12
16	15,09	15,09	0,25	33,96	18,87	19,10	78,55	44,60	2,05	133,03	54,47	21,96	192,86	59,83	39,66	257,16	64,30	55,37	2,40	2,40	2,40	13
134	14,84	14,84	1,87	33,54	18,70	19,82	78,31	44,77	1,66	132,15	53,83	20,52	191,59	59,44	38,75	255,26	63,67	53,86	2,42	2,42	2,42	14
131	14,19	14,19	6,22	34,49	20,31	12,92	78,29	43,80	3,81	132,30	54,01	20,92	192,09	59,80	39,58	257,32	65,23	57,63	2,43	2,43	2,43	15
10	14,80	14,80	2,17	33,55	18,75	19,60	78,89	45,34	0,42	132,88	53,99	20,87	193,97	61,10	42,61	258,85	64,87	56,77	2,44	2,44	2,44	16
159	14,85	14,85	1,83	34,15	19,30	17,25	78,04	43,90	3,59	132,98	54,94	23,00	194,10	61,12	42,67	260,84	66,74	61,27	2,55	2,55	2,55	17
129	14,77	14,77	2,34	33,43	18,66	19,98	78,36	44,93	1,32	132,76	54,40	21,79	194,28	61,52	43,60	260,48	66,20	59,98	2,56	2,56	2,56	18
32	14,77	14,77	2,34	33,40	18,62	20,14	78,42	45,03	1,10	133,15	54,73	22,53	194,50	61,35	43,20	260,20	65,70	58,76	2,57	2,57	2,57	19
132	14,80	14,80	2,17	34,11	19,31	17,18	79,73	45,62	0,19	135,86	56,13	25,67	198,76	62,90	46,82	267,35	68,59	65,75	2,61	2,61	2,61	20
17	15,03	15,03	0,61	34,14	19,11	18,05	80,41	46,27	1,62	136,48	56,07	25,53	200,49	64,01	49,42	267,59	67,10	62,15	2,61	2,61	2,61	21
193	13,70	13,70	9,44	31,87	18,17	22,09	73,30	41,43	9,01	122,97	49,67	11,22	179,57	56,60	32,13	241,44	61,87	49,50	2,67	2,67	2,67	22
68	13,70	13,70	9,42	32,14	18,44	20,94	73,94	41,80	8,19	124,42	50,48	13,03	182,15	57,73	34,75	245,45	63,30	52,96	2,70	2,70	2,70	23
69	13,70	13,70	9,42	32,14	18,44	20,94	73,94	41,80	8,19	124,42	50,48	13,03	182,15	57,73	34,75	245,45	63,30	52,96	2,70	2,70	2,70	24
98	13,60	13,60	10,08	32,28	18,68	19,89	73,31	41,03	9,89	124,24	50,93	14,02	180,91	56,67	32,29	243,52	62,61	51,29	2,74	2,74	2,74	25
130	13,67	13,67	9,62	32,88	19,21	17,63	77,49	44,61	2,03	131,87	54,38	21,75	194,06	62,19	45,17	259,78	65,72	58,82	2,79	2,79	2,79	26
164	15,80	15,80	4,46	38,61	22,81	2,19	90,47	51,86	13,91	149,49	59,02	32,14	215,12	65,63	53,20	283,48	68,36	65,18	2,80	2,80	2,80	27
126	13,65	13,65	9,74	32,25	18,60	20,26	74,03	41,78	8,24	125,89	51,86	16,12	184,02	58,12	35,67	247,22	63,21	52,74	2,80	2,80	2,80	28
97	13,75	13,75	9,11	31,25	17,51	24,93	71,83	40,57	10,89	121,55	49,73	11,34	177,79	56,24	31,27	240,12	62,33	50,61	2,84	2,84	2,84	29
192	13,85	13,85	8,44	31,53	17,68	24,19	73,89	42,36	6,97	125,00	51,11	14,43	184,92	59,92	39,86	249,40	64,48	55,82	2,87	2,87	2,87	30
67	13,70	13,70	9,46	30,92	17,22	26,16	72,43	41,51	8,83	122,54	50,11	12,20	179,23	56,69	32,32	242,15	62,92	52,05	2,89	2,89	2,89	31
99	13,59	13,59	10,18	30,71	17,13	26,57	71,12	40,40	11,26	121,26	50,15	12,27	176,49	55,23	28,92	235,37	58,88	42,29	2,91	2,91	2,91	32
194	13,82	13,82	8,67	31,72	17,91	23,22	74,23	42,51	6,65	126,38	52,15	16,77	186,46	60,08	40,25	251,32	64,86	56,73	2,92	2,92	2,92	33
66	13,70	13,70	9,46	31,23	17,53	24,82	71,72	40,50	11,06	122,63	50,91	13,98	178,82	56,19	31,15	239,88	61,06	47,55	2,92	2,92	2,92	34
118	15,94	15,94	5,36	38,23	22,29	4,40	89,82	51,59	13,30	149,09	59,27	32,70	213,86	64,77	51,19	283,29	69,43	67,79	2,93	2,93	2,93	35
165	15,96	15,96	5,53	38,38	22,42	3,85	90,12	51,74	13,63	149,73	59,61	33,46	214,46	64,73	51,09	282,99	68,53	65,61	2,93	2,93	2,93	36
107	15,94	15,94	5,40	38,29	22,35	4,18	90,09	51,81	13,78	149,53	59,43	33,07	214,42	64,90	51,48	282,80	68,38	65,24	2,93	2,93	2,93	37
166	15,85	15,85	4,76	37,76	21,92	6,01	89,49	51,72	13,59	148,45	58,97	32,02	213,55	65,10	51,96	282,22	68,67	65,95	2,95	2,95	2,95	38
109	13,70	13,70	9,46	30,93	17,24	26,09	72,02	41,09	9,75	122,57	50,55	13,17	180,41	57,84	35,02	242,43	62,02	49,87	2,95	2,95	2,95	39
177	16,03	16,03	5,99	39,15	23,12	0,88	91,54	52,39	15,07	151,81	60,27	34,95	217,31	65,50	52,89	286,61	69,29	67,45	2,96	2,96	2,96	40
161	11,83	11,83	21,80	30,32	18,49	20,71	66,84	36,52	19,79	110,68	43,84	1,85	162,82	52,14	21,70	219,44	56,63	36,84	2,98	2,98	2,98	41
119	11,49	11,49	24,04	29,67	18,18	22,05	65,72	36,05	20,82	109,96	44,24	0,95	162,76	52,80	23,24	220,11	57,35	38,59	3,16	3,16	3,16	42
162	11,33	11,33	25,06	29,29	17,95	23,01	66,47	37,18	18,34	110,84	44,37	0,66	163,32	52,48	22,49	222,18	58,87	42,25	3,18	3,18	3,18	43
121	11,33	11,33	25,07	29,26	17,93	23,12	66,36	37,10	18,52	110,87	44,51	0,34	164,04	53,17	24,11	222,43	58,39	41,09	3,18	3,18	3,18	44
178	16,58	16,58	9,60	39,13	22,56	3,28	91,32	52,19	14,62	151,87	60,55	35,57	217,11	65,23	52,27	285,45	68,34	65,15	3,19	3,19	3,19	45

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterio de selección			
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
EXP	15,13	15,13		38,45	23,32		83,98	45,53		128,64	44,66		171,48	42,84		212,87	41,38					
63	11,49	11,49	24,01	29,34	17,85	23,46	65,57	36,23	20,43	110,51	44,94	0,62	162,33	51,82	20,96	221,33	59,00	42,57	3,21	3,21	3,21	46
38	11,33	11,33	25,07	29,27	17,93	23,11	66,17	36,91	18,94	110,54	44,36	0,68	163,23	52,70	23,01	222,49	59,26	43,19	3,21	3,21	3,21	47
40	11,49	11,49	24,04	29,41	17,92	23,16	65,46	36,05	20,82	109,76	44,30	0,81	162,59	52,83	23,31	220,66	58,07	40,33	3,22	3,22	3,22	48
156	11,11	11,11	26,58	29,84	18,73	19,69	65,14	35,30	22,46	109,06	43,92	1,68	160,67	51,62	20,48	219,18	58,51	41,38	3,25	3,25	3,25	49
41	11,49	11,49	24,05	29,07	17,58	24,62	65,04	35,97	20,99	109,95	44,91	0,55	162,27	52,32	22,13	220,02	57,75	39,56	3,26	3,26	3,26	50
120	11,95	11,95	20,99	28,33	16,38	29,75	64,27	35,93	21,08	108,09	43,82	1,88	158,61	50,52	17,93	212,66	54,05	30,62	3,28	3,28	3,28	51
73	11,76	11,76	22,26	29,03	17,27	25,95	65,00	35,98	20,99	108,51	43,51	2,58	160,12	51,60	20,45	217,72	57,60	39,20	3,29	3,29	3,29	52
151	11,58	11,58	23,44	28,76	17,18	26,33	64,45	35,69	21,61	107,99	43,54	2,52	157,87	49,88	16,42	214,90	57,03	37,81	3,33	3,33	3,33	53
108	16,90	16,90	11,76	37,50	20,60	11,67	87,76	50,26	10,39	147,12	59,35	32,89	210,72	63,60	48,46	277,73	67,01	61,93	3,34	3,34	3,34	54
12	16,80	16,80	11,04	39,79	22,99	1,42	93,66	53,87	18,31	155,18	61,52	37,74	219,88	64,70	51,03	288,35	68,47	65,46	3,36	3,36	3,36	55
15	16,40	16,40	8,44	39,28	22,87	1,92	93,63	54,35	19,38	154,89	61,26	37,15	222,47	67,58	57,75	292,25	69,78	68,62	3,37	3,37	3,37	56
64	11,64	11,64	23,06	28,61	16,97	27,24	66,03	37,43	17,80	111,68	45,65	2,21	165,26	53,58	25,06	226,60	61,34	48,22	3,37	3,37	3,37	57
65	11,64	11,64	23,06	28,61	16,97	27,24	66,03	37,43	17,80	111,68	45,65	2,21	165,26	53,58	25,06	226,60	61,34	48,22	3,37	3,37	3,37	58
147	11,11	11,11	26,57	28,90	17,79	23,71	64,54	35,65	21,71	107,68	43,14	3,41	159,27	51,59	20,41	216,14	56,87	37,43	3,41	3,41	3,41	59
117	16,84	16,84	11,35	38,09	21,25	8,88	89,88	51,79	13,74	149,33	59,45	33,11	214,36	65,03	51,80	284,68	70,32	69,92	3,42	3,42	3,42	60
87	16,95	16,95	12,04	40,70	23,76	1,87	95,43	54,73	20,20	156,31	60,87	36,29	222,32	66,02	54,10	289,70	67,38	62,82	3,44	3,44	3,44	61
176	17,05	17,05	12,70	37,88	20,83	10,67	89,43	51,55	13,21	148,57	59,14	32,42	212,91	64,33	50,17	280,73	67,83	63,91	3,45	3,45	3,45	62
82	17,05	17,05	12,70	37,91	20,86	10,56	89,44	51,54	13,19	148,66	59,22	32,58	212,95	64,29	50,06	280,88	67,93	64,15	3,45	3,45	3,45	63
24	17,07	17,07	12,84	40,43	23,36	0,18	94,16	53,73	18,00	156,34	62,18	39,22	223,47	67,13	56,69	292,86	69,40	67,70	3,49	3,49	3,49	64
148	17,15	17,15	13,41	39,79	22,64	2,93	93,70	53,91	18,40	154,77	61,06	36,72	220,23	65,47	52,82	289,39	69,15	67,11	3,52	3,52	3,52	65
49	15,06	15,06	0,45	35,05	19,99	14,29	80,76	45,71	0,40	135,48	54,73	22,53	197,29	61,81	44,28				2,10	1,75	3,62	66
168	17,22	17,22	13,87	39,91	22,68	2,74	94,08	54,17	18,97	156,00	61,93	38,65	222,52	66,52	55,28	293,40	70,87	71,27	3,67	3,67	3,67	67
185	17,22	17,22	13,87	39,94	22,72	2,59	94,09	54,14	18,92	156,19	62,10	39,04	222,73	66,55	55,33	293,62	70,89	71,30	3,67	3,67	3,67	68
42	17,22	17,22	13,87	39,91	22,68	2,74	94,14	54,23	19,12	156,13	61,99	38,79	222,69	66,56	55,36	293,39	70,70	70,84	3,67	3,67	3,67	69
90	17,25	17,25	14,02	40,26	23,02	1,31	95,88	55,61	22,14	157,55	61,68	38,10	223,60	66,04	54,16	294,16	70,56	70,52	3,69	3,69	3,69	70
88	17,25	17,25	14,02	40,22	22,97	1,50	94,73	54,52	19,73	157,74	63,00	41,06	224,05	66,32	54,80	293,51	69,46	67,85	3,70	3,70	3,70	71
169	17,22	17,22	13,87	39,91	22,68	2,74	94,80	54,90	20,57	156,49	61,69	38,11	223,27	66,78	55,89	294,20	70,92	71,38	3,71	3,71	3,71	72
18	17,16	17,16	13,46	39,97	22,81	2,20	94,18	54,21	19,07	157,23	63,05	41,17	223,42	66,19	54,50	294,50	71,08	71,76	3,71	3,71	3,71	73
21	17,22	17,22	13,87	39,91	22,68	2,73	94,80	54,89	20,56	156,62	61,82	38,42	223,50	66,88	56,10	294,33	70,83	71,16	3,72	3,72	3,72	74
167	17,23	17,23	13,92	39,84	22,61	3,03	94,89	55,05	20,90	156,84	61,95	38,70	223,81	66,97	56,33	294,09	70,27	69,82	3,74	3,74	3,74	75
31	14,20	14,20	6,12	34,90	20,70	11,24	78,36	43,46	4,54	131,25	52,89	18,41	191,02	59,77	39,52				2,18	1,82	3,77	76
57	14,50	14,50	4,11	34,60	20,10	13,83	77,68	43,08	5,38	131,09	53,41	19,58	188,59	57,50	34,23				2,24	1,86	3,87	77
115	11,28	11,28	25,40	26,58	15,30	34,41	66,85	40,27	11,55	116,62	49,77	11,43	173,31	56,68	32,31	235,26	61,96	49,72	3,94	3,94	3,94	78
114	11,30	11,30	25,27	26,31	15,00	35,66	66,84	40,53	10,98	116,55	49,71	11,29	173,04	56,49	31,86	234,65	61,61	48,87	3,95	3,95	3,95	79
133	14,26	14,26	5,74	33,77	19,51	16,34	78,02	44,25	2,82	131,01	53,00	18,66	190,46	59,44	38,75				2,35	1,96	4,06	80
103	16,82	16,82	11,17	42,20	25,39	8,86	99,59	57,38	26,03	162,23	62,64	40,25	228,48	66,25	54,65	298,41	69,93	68,99	4,07	4,07	4,07	81
188	16,89	16,89	11,66	42,24	25,35	8,69	98,33	56,09	23,19	161,92	63,59	42,36	229,84	67,93	58,56	300,60	70,75	70,97	4,11	4,11	4,11	82
55	17,29	17,29	14,31	41,59	24,30	4,21	98,96	57,36	25,98	162,11	63,15	41,39	229,84	67,73	58,10	301,78	71,94	73,85	4,12	4,12	4,12	83
53	17,29	17,29	14,31	41,57	24,27	4,09	98,99	57,43	26,13	162,17	63,18	41,46	229,90	67,73	58,10	301,88	71,97	73,92	4,12	4,12	4,12	84
52	17,29	17,29	14,30	41,61	24,32	4,29	99,27	57,66	26,64	162,53	63,26	41,64	230,46	67,93	58,56	301,27	70,81	71,10	4,13	4,13	4,13	85
191	17,30	17,30	14,35	41,61	24,31	4,26	98,28	56,67	24,47	162,68	64,40	44,18	230,39	67,71	58,06	301,47	71,08	71,76	4,15	4,15	4,15	86
189	17,32	17,32	14,52	41,71	24,38	4,55	99,27	57,56	26,42	162,60	63,33	41,79	230,38	67,78	58,22	301,39	71,01	71,59	4,15	4,15	4,15	87
190	17,31	17,31	14,44	41,62	24,31	4,25	98,31	56,69	24,51	162,86	64,55	44,53	231,01	68,15	59,07	302,13	71,12	71,86	4,17	4,17	4,17	88
102	17,33	17,33	14,59	41,78	24,44	4,82	98,90	57,13	25,46	163,60	64,70	44,86	231,46	67,86	58,40	302,15	70,69	70,81	4,23	4,23	4,23	89
105	17,32	17,32	14,52	41,91	24,58	5,42	100,03	58,13	27,66	163,74	63,71	42,64	232,22	68,47	59,83	303,08	70,86	71,23	4,27	4,27	4,27	90

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterio de selección			
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
EXP	15,13	15,13		38,45	23,32		83,98	45,53		128,64	44,66		171,48	42,84		212,87	41,38					
104	17,34	17,34	14,66	41,98	24,63	5,62	99,00	57,03	25,25	163,98	64,98	45,49	232,30	68,31	59,46	303,75	71,45	72,66	4,30	4,30	4,30	91
127	13,70	13,70	9,44	32,15	18,45	20,88	74,33	42,18	7,35	125,03	50,69	13,50	183,36	58,33	36,16				2,71	2,26	4,69	92
92	17,40	17,40	15,04	44,44	27,04	15,96	102,82	58,38	28,22	167,31	64,48	44,38	235,61	68,31	59,44	304,10	68,49	65,51	4,75	4,75	4,75	93
91	17,35	17,35	14,71	44,83	27,47	17,81	104,57	59,75	31,22	170,52	65,95	47,65	241,30	70,78	65,22	312,80	71,50	72,77	5,13	5,13	5,13	94
163	11,33	11,33	25,06	29,73	18,40	21,11	66,43	36,70	19,40	110,90	44,47	0,44	163,66	52,76	23,15				3,33	2,78	5,76	95
116	16,82	16,82	11,20	38,17	21,35	8,44	89,92	51,75	13,66	148,86	58,93	31,95	215,06	66,20	54,53				3,35	2,79	5,79	96
149	17,40	17,40	15,04	40,01	22,61	3,06	94,03	54,02	18,65	155,50	61,47	37,62	222,86	67,37	57,25				3,73	3,11	6,44	97
187	17,22	17,22	13,87	39,95	22,73	2,54	94,89	54,94	20,66	156,60	61,71	38,17	223,40	66,79	55,91				3,73	3,11	6,45	98
158	11,16	11,16	26,22	28,78	17,62	24,46	64,46	35,69	21,62	107,27	42,81	4,16	157,42	50,15	17,07				3,74	3,11	6,46	99
75	11,16	11,16	26,22	28,78	17,62	24,46	64,54	35,76	21,46	107,19	42,65	4,52	157,65	50,47	17,81				3,75	3,13	6,48	100
44	17,22	17,22	13,87	39,89	22,67	2,79	94,83	54,94	20,66	156,65	61,82	38,41	223,42	66,77	55,85				3,75	3,13	6,49	101
150	17,22	17,22	13,87	39,89	22,67	2,79	94,83	54,94	20,67	156,66	61,83	38,44	223,41	66,75	55,80				3,76	3,13	6,49	102
155	11,16	11,16	26,22	28,74	17,58	24,63	64,36	35,62	21,77	107,18	42,82	4,13	158,46	51,28	19,70				3,78	3,15	6,52	103
76	11,16	11,16	26,22	28,74	17,58	24,63	64,34	35,61	21,79	107,01	42,67	4,47	158,11	51,10	19,27				3,79	3,15	6,54	104
9	17,40	17,40	15,03	39,84	22,44	3,76	94,55	54,71	20,16	155,96	61,41	37,49	223,07	67,11	56,64				3,81	3,18	6,59	105
1	15,09	15,09	0,22	35,07	19,98	14,33	80,68	45,61	0,18	135,17	54,48	21,98							2,02	1,34	6,81	106
45	21,26	21,26	40,58	52,38	31,12	33,43	91,41	39,03	14,28	107,64	16,23	63,65	121,29	13,65	68,14	134,53	13,24	68,01	6,82	6,82	6,82	107
2	15,06	15,06	0,44	34,99	19,93	14,55	80,56	45,58	0,10	135,31	54,75	22,58							2,07	1,38	6,99	108
141	15,06	15,06	0,44	34,89	19,83	14,98	80,59	45,71	0,38	135,24	54,65	22,35							2,10	1,40	7,09	109
84	15,09	15,09	0,23	34,87	19,78	15,17	80,68	45,81	0,60	135,63	54,95	23,03							2,14	1,43	7,24	110
136	15,09	15,09	0,22	34,76	19,67	15,65	80,63	45,87	0,74	135,37	54,74	22,57							2,16	1,44	7,28	111
144	14,45	14,45	4,48	35,06	20,61	11,61	78,71	43,65	4,14	132,14	53,44	19,64							2,19	1,46	7,41	112
173	15,06	15,06	0,44	34,19	19,13	17,97	79,51	45,32	0,47	134,22	54,71	22,50							2,30	1,53	7,76	113
143	14,60	14,60	3,46	34,12	19,52	16,29	78,47	44,35	2,60	131,68	53,21	19,14							2,32	1,55	7,83	114
11	14,55	14,55	3,80	34,16	19,61	15,90	78,36	44,20	2,93	131,49	53,13	18,96							2,33	1,55	7,85	115
139	14,60	14,60	3,46	33,96	19,36	16,97	78,30	44,33	2,63	131,53	53,23	19,18							2,37	1,58	7,99	116
78	21,75	21,75	43,80	52,53	30,78	31,99	120,37	67,84	48,99	191,11	70,74	58,38	264,71	73,60	71,81	339,72	75,01	81,25	8,01	8,01	8,01	117
79	21,75	21,75	43,80	52,96	31,21	33,81	119,64	66,68	46,45	191,72	72,09	61,40	266,31	74,58	74,09	341,55	75,25	81,83	8,13	8,13	8,13	118
72	14,76	14,76	2,41	34,05	19,28	17,31	78,61	44,56	2,13	132,95	54,34	21,67							2,42	1,61	8,17	119
101	15,42	15,42	1,91	34,71	19,29	17,27	80,71	46,00	1,03	135,99	55,28	23,76							2,44	1,63	8,23	120
70	14,76	14,76	2,41	33,81	19,05	18,32	78,49	44,67	1,88	132,59	54,10	21,13							2,45	1,63	8,26	121
122	23,58	23,58	55,87	54,60	31,03	33,05	122,07	67,46	48,17	193,39	71,32	59,69	265,77	72,38	68,96	339,20	73,42	77,43	8,52	8,52	8,52	122
157	11,02	11,02	27,13	26,16	15,13	35,11	38,44	12,29	73,01	50,97	12,52	71,96	63,85	12,88	69,94	76,91	13,06	68,43	8,58	8,58	8,58	123
170	15,79	15,79	4,39	38,76	22,97	1,48	90,62	51,86	13,89	149,70	59,08	32,27							2,68	1,78	9,03	124
59	16,07	16,07	6,27	38,84	22,77	2,36	89,66	50,81	11,60	148,87	59,21	32,57							2,75	1,83	9,27	125
125	23,64	23,64	56,27	56,30	32,66	40,05	127,32	71,03	55,99	200,54	73,22	63,93	276,97	76,43	78,40	355,91	78,94	90,75	9,42	9,42	9,42	126
94	17,77	17,77	17,46	45,13	27,37	17,35	104,08	58,95	29,46	170,07	65,99	47,76	239,61	69,53	62,30				5,45	4,54	9,42	127
124	23,67	23,67	56,52	56,40	32,73	40,34	127,78	71,37	56,76	201,05	73,28	64,06	277,52	76,46	78,48	356,27	78,76	90,32	9,47	9,47	9,47	128
100	13,75	13,75	9,11	32,57	18,82	19,29	74,45	41,87	8,03	124,97	50,52	13,11							2,83	1,89	9,56	129
111	13,70	13,70	9,44	32,70	19,00	18,52	74,53	41,83	8,12	125,40	50,86	13,88							2,85	1,90	9,61	130
81	16,05	16,05	6,12	38,70	22,65	2,88	90,71	52,01	14,23	149,96	59,24	32,64							2,91	1,94	9,81	131
110	13,47	13,47	10,96	32,73	19,27	17,38	73,55	40,81	10,36	123,72	50,18	12,34							2,91	1,94	9,81	132
142	15,06	15,06	0,45	35,11	20,05	14,00	80,80	45,69	0,34										1,23	0,61	9,82	133
4	15,09	15,09	0,22	35,05	19,95	14,43	80,64	45,59	0,12										1,23	0,61	9,84	134
160	13,70	13,70	9,44	32,15	18,45	20,88	74,32	42,17	7,39	125,08	50,76	13,65							2,95	1,96	9,95	135

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterio de selección				
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking	
EXP	15,13	15,13		38,45	23,32		83,98	45,53		128,64	44,66		171,48	42,84		212,87	41,38						
174	15,06	15,06	0,45	35,04	19,98	14,33	80,69	45,66	0,28										1,25	0,62	10,00	136	
172	16,17	16,17	6,88	38,69	22,52	3,42	89,97	51,28	12,64	149,81	59,83	33,97							2,97	1,98	10,04	137	
180	15,06	15,06	0,45	35,00	19,94	14,48	80,66	45,66	0,28										1,26	0,63	10,10	138	
51	15,06	15,06	0,45	35,00	19,94	14,48	80,68	45,68	0,32										1,26	0,63	10,12	139	
179	15,06	15,06	0,45	35,00	19,94	14,48	80,69	45,68	0,33										1,27	0,63	10,12	140	
20	15,06	15,06	0,45	35,00	19,94	14,48	80,69	45,68	0,33										1,27	0,63	10,13	141	
153	15,06	15,06	0,45	35,00	19,94	14,48	80,69	45,68	0,33										1,27	0,63	10,13	142	
56	15,06	15,06	0,45	35,00	19,94	14,48	80,69	45,69	0,34										1,27	0,63	10,13	143	
181	15,06	15,06	0,45	35,00	19,94	14,48	80,69	45,69	0,34										1,27	0,63	10,13	144	
86	15,09	15,09	0,23	34,87	19,78	15,18	80,50	45,63	0,22										1,30	0,65	10,38	145	
6	15,79	15,79	4,42	39,26	23,47	0,62	90,94	51,68	13,50										1,32	0,66	10,56	146	
19	15,09	15,09	0,23	34,88	19,79	15,16	80,69	45,81	0,61										1,32	0,66	10,58	147	
137	15,09	15,09	0,23	34,76	19,67	15,66	80,25	45,49	0,09										1,33	0,67	10,64	148	
146	15,09	15,09	0,23	34,76	19,67	15,66	80,25	45,49	0,09										1,33	0,67	10,64	149	
60	15,79	15,79	4,39	38,76	22,97	1,49	90,07	51,30	12,68										1,34	0,67	10,68	150	
5	15,06	15,06	0,44	34,88	19,82	14,99	80,79	45,91	0,82										1,34	0,67	10,73	151	
58	15,06	15,06	0,44	34,74	19,68	15,60	80,23	45,49	0,09										1,34	0,67	10,75	152	
7	15,09	15,09	0,22	34,89	19,80	15,10	80,91	46,02	1,07										1,35	0,67	10,78	153	
62	15,79	15,79	4,39	38,96	23,17	0,64	91,05	52,09	14,41										1,38	0,69	11,04	154	
8	15,06	15,06	0,44	34,73	19,67	15,65	80,53	45,80	0,59										1,38	0,69	11,04	155	
171	15,79	15,79	4,39	38,76	22,97	1,49	90,40	51,63	13,40										1,38	0,69	11,07	156	
175	15,06	15,06	0,44	34,74	19,68	15,60	80,69	45,95	0,92										1,40	0,70	11,19	157	
154	15,06	15,06	0,44	34,74	19,68	15,60	80,69	45,95	0,92										1,40	0,70	11,19	158	
83	22,30	22,30	47,41	57,76	35,46	52,05	141,46	83,71	83,85	234,89	93,42	109,17	331,84	96,95	126,31	428,37	96,53	133,27	12,74	12,74	12,74	159	
27	17,19	17,19	13,65	39,79	22,60	3,09	93,89	54,10	18,81	154,80	60,91	36,38							3,81	2,54	12,84	160	
145	14,40	14,40	4,82	34,45	20,05	14,02	79,50	45,05	1,05										1,64	0,82	13,12	161	
61	15,70	15,70	3,81	37,48	21,78	6,61	88,57	51,09	12,20										1,68	0,84	13,46	162	
184	16,05	16,05	6,12	38,70	22,65	2,88	90,69	51,99	14,19										1,70	0,85	13,57	163	
22	15,09	15,09	0,23	34,04	18,94	18,77	78,78	44,74	1,73										1,70	0,85	13,58	164	
23	15,06	15,06	0,44	34,02	18,96	18,69	78,78	44,76	1,69										1,71	0,85	13,65	165	
80	16,05	16,05	6,12	38,60	22,55	3,32	90,42	51,82	13,81										1,71	0,85	13,66	166	
183	16,05	16,05	6,12	38,61	22,56	3,27	90,88	52,27	14,79										1,77	0,88	14,15	167	
33	14,49	14,49	4,18	34,44	19,95	14,47	78,46	44,02	3,32										1,78	0,89	14,20	168	
135	14,83	14,83	1,94	33,65	18,81	19,32	78,61	44,97	1,24										1,85	0,93	14,83	169	
74	11,16	11,16	26,22	28,74	17,58	24,63	64,45	35,72	21,56	106,92	42,47	4,92							4,50	3,00	15,19	170	
71	14,76	14,76	2,41	33,78	19,02	18,43	78,12	44,34	2,62										1,91	0,96	15,29	171	
46	21,75	21,75	43,80	52,96	31,21	33,82	119,67	66,71	46,52	191,81	72,14	61,51	264,93	73,13	70,69				8,91	7,42	15,39	172	
77	21,75	21,75	43,80	52,96	31,21	33,84	119,70	66,74	46,58	191,84	72,14	61,52	265,04	73,20	70,86				8,91	7,43	15,40	173	
48	21,75	21,75	43,80	52,97	31,22	33,87	119,66	66,69	46,47	191,77	72,11	61,46	266,33	74,56	74,04				8,94	7,45	15,45	174	
113	11,30	11,30	25,27	26,36	15,05	35,46	66,79	40,43	11,20	116,76	49,98	11,89							4,95	3,30	16,71	175	
43	16,61	16,61	9,84	40,14	23,52	0,87	94,02	53,88	18,34										2,11	1,06	16,92	176	
123	22,83	22,83	50,96	57,19	34,36	47,33	127,60	70,41	54,64	200,08	72,48	62,28	276,52	76,43	78,41				10,38	8,65	17,93	177	
106	16,82	16,82	11,19	38,22	21,40	8,23	89,66	51,44	12,98										2,48	1,24	19,87	178	
35	14,19	14,19	6,20	32,82	18,63	20,12	75,46	42,64	6,34										2,62	1,31	20,93	179	
182	17,05	17,05	12,69	37,89	20,85	10,60	88,94	51,05	12,11										2,75	1,37	21,99	180	

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterio de selección			
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
EXP	15,13	15,13		38,45	23,32		83,98	45,53		128,64	44,66		171,48	42,84		212,87	41,38					
3	17,08	17,08	12,93	39,67	22,59	3,12	95,07	55,39	21,66										2,78	1,39	22,25	181
128	13,70	13,70	9,44	32,69	18,99	18,56	74,37	41,68	8,45										2,90	1,45	23,17	182
54	16,53	16,53	9,30	41,53	25,00	7,20	97,59	56,06	23,13										2,92	1,46	23,33	183
186	16,80	16,80	11,04	39,79	22,99	1,42													1,56	0,52	42,06	184
34	13,65	13,65	9,73	31,24	17,58	24,60	59,25	28,01	38,48										5,43	2,71	43,41	185
30	11,39	11,39	24,73	20,36	8,97	61,53	30,11	9,76	78,58	40,46	10,35	76,83							13,16	8,77	44,42	186
112	11,62	11,62	23,20	26,77	15,15	35,02	66,95	40,18	11,76										5,64	2,82	45,09	187
138	23,14	23,14	52,96	19,32	-3,82	116,37	24,80	5,48	87,96	28,63	3,83	91,44							19,55	13,04	65,99	188
39	11,42	11,42	24,48	26,25	14,82	36,44	43,54	17,29	62,02										9,21	4,61	73,69	189
93	17,60	17,60	16,36	44,46	26,86	15,17													3,94	1,31	106,39	190
47	21,51	21,51	42,20	52,19	30,68	31,58													9,22	3,07	249,01	191
152	10,76	10,76	28,89	21,10	10,34	55,64													10,57	3,52	285,32	192
89	12,80	12,80	15,37																3,84	0,64	829,78	193
85	NO TIENE VALOR																				194	

Tabla D. 4. Obtención de las mejores combinaciones numéricas, Placa 2.

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterios de selección			
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
Experi	18,92	18,92		46,38	27,46		102,09	55,71		156,53	54,44		210,73	54,20		259,18	48,45					
96	17,99	17,99	4,89	38,38	20,38	25,77	88,10	49,72	10,76	144,70	56,61	3,98	203,70	58,99	8,84	261,80	58,10	19,93	2,01	2,01	2,01	1
161	17,08	17,08	9,73	39,88	22,80	16,98	92,09	52,22	6,27	155,36	63,27	16,21	227,71	72,36	33,50	303,40	75,69	56,22	2,61	2,61	2,61	2
151	17,73	17,73	6,28	41,83	24,10	12,24	95,69	53,86	3,31	164,11	68,41	25,66	243,51	79,41	46,51	325,70	82,19	69,64	2,71	2,71	2,71	3
31	19,38	19,38	2,44	46,40	27,02	1,61	110,38	63,98	14,84	184,34	73,97	35,87	263,61	79,26	46,24	346,40	82,80	70,89	2,84	2,84	2,84	4
74	17,18	17,18	9,21	43,69	26,52	3,43	93,87	50,17	9,94	163,85	69,98	28,54	245,95	82,10	51,48	331,39	85,44	76,35	2,87	2,87	2,87	5
158	18,14	18,14	4,12	40,59	22,45	18,26	97,39	56,80	1,96	167,97	70,58	29,65	248,66	80,70	48,89	331,40	82,74	70,77	2,98	2,98	2,98	6
133	19,27	19,27	1,84	45,46	26,19	4,63	110,69	65,24	17,10	185,61	74,92	37,62	264,45	78,83	45,45	344,10	79,65	64,40	3,01	3,01	3,01	7
10	19,84	19,84	4,84	48,06	28,23	2,80	112,28	64,21	15,26	188,64	76,36	40,27	265,89	77,25	42,53	345,72	79,83	64,78	3,06	3,06	3,06	8
155	17,47	17,47	7,65	41,07	23,60	14,05	95,60	54,53	2,12	165,33	69,73	28,09	248,15	82,82	52,80	338,01	89,86	85,46	3,06	3,06	3,06	9
75	16,92	16,92	10,56	45,50	28,58	4,06	95,39	49,89	10,44	166,42	71,03	30,47	249,89	83,48	54,01	337,41	87,52	80,63	3,09	3,09	3,09	10
98	19,29	19,29	1,96	45,09	25,80	6,05	109,05	63,96	14,80	185,44	76,39	40,31	266,45	81,01	49,47	350,12	83,67	72,69	3,19	3,19	3,19	11
131	19,80	19,80	4,65	45,82	26,02	5,26	110,92	65,11	16,87	185,69	74,77	37,34	265,21	79,52	46,71	347,61	82,40	70,08	3,19	3,19	3,19	12
38	17,20	17,20	9,12	42,45	25,25	8,04	97,73	55,28	0,77	172,03	74,30	36,48	259,14	87,11	60,73	351,85	92,71	91,34	3,22	3,22	3,22	13
11	19,89	19,89	5,12	46,85	26,96	1,81	113,35	66,50	19,37	189,92	76,56	40,64	270,50	80,58	48,68	350,14	79,64	64,37	3,23	3,23	3,23	14
121	17,87	17,87	5,56	41,91	24,04	12,47	101,05	59,15	6,17	172,30	71,25	30,88	258,39	86,08	58,82	352,98	94,59	95,24	3,27	3,27	3,27	15
65	17,85	17,85	5,63	44,37	26,51	3,45	106,70	62,34	11,90	179,02	72,32	32,84	270,53	91,51	68,84	368,61	98,08	102,44	3,30	3,30	3,30	16
64	17,85	17,85	5,63	44,37	26,51	3,45	106,70	62,34	11,90	179,02	72,32	32,84	270,83	91,81	69,39	368,80	97,97	102,21	3,30	3,30	3,30	17
40	18,13	18,13	4,18	41,24	23,11	15,84	97,14	55,90	0,34	170,51	73,37	34,77	258,15	87,63	61,69	353,02	94,87	95,82	3,32	3,32	3,32	18
163	19,21	19,21	1,54	40,85	21,64	21,20	97,40	56,55	1,51	173,05	75,65	38,95	252,74	79,70	47,04	340,66	87,92	81,46	3,37	3,37	3,37	19
119	19,73	19,73	4,30	41,63	21,90	20,25	97,98	56,35	1,14	169,87	71,90	32,06	256,13	86,25	59,14	348,86	92,73	91,40	3,38	3,38	3,38	20
41	17,25	17,25	8,84	41,05	23,80	13,31	98,72	57,67	3,52	173,01	74,29	36,46	258,43	85,42	57,60	350,10	91,67	89,21	3,48	3,48	3,48	21
63	17,75	17,75	6,19	40,29	22,54	17,91	96,57	56,28	1,03	170,18	73,61	35,21	257,35	87,17	60,83	352,82	95,47	97,04	3,53	3,53	3,53	22
162	17,26	17,26	8,77	41,28	24,02	12,52	99,69	58,41	4,84	174,83	75,14	38,02	261,82	86,99	60,50	356,01	94,20	94,42	3,61	3,61	3,61	23
76	17,20	17,20	9,10	49,75	32,55	18,55	98,30	48,55	12,86	169,23	70,93	30,30	252,89	83,66	54,35	343,74	90,85	87,51	3,77	3,77	3,77	24
147	20,21	20,21	6,82	41,88	21,67	21,08	99,23	57,35	2,94	173,13	73,90	35,75	261,07	87,94	62,26	356,94	95,87	97,87	3,79	3,79	3,79	25
194	19,08	19,08	0,83	45,99	26,91	1,99	114,71	68,72	23,35	197,65	82,94	52,36	290,29	92,64	70,92	387,33	97,04	100,29	4,07	4,07	4,07	26
110	21,31	21,31	12,61	47,37	26,07	5,08	113,13	65,76	18,04	193,98	80,85	48,51	281,78	87,80	61,99	369,61	87,83	81,28	4,15	4,15	4,15	27
97	19,25	19,25	1,77	45,81	26,56	3,28	112,62	66,80	19,91	195,97	83,35	53,11	289,92	93,95	73,34	390,67	100,75	107,94	4,16	4,16	4,16	28
109	19,46	19,46	2,85	45,76	26,30	4,21	112,52	66,76	19,84	197,06	84,54	55,29	289,38	92,32	70,32	387,89	98,51	103,32	4,25	4,25	4,25	29
127	19,29	19,29	1,96	47,23	27,94	1,75	115,53	68,30	22,59	201,09	85,57	57,18	294,35	93,26	72,07	392,63	98,27	102,84	4,27	4,27	4,27	30
128	19,89	19,89	5,15	47,00	27,11	1,28	116,28	69,28	24,35	200,95	84,67	55,52	292,09	91,14	68,16	386,84	94,75	95,57	4,29	4,29	4,29	31
67	19,30	19,30	2,00	44,77	25,47	7,25	113,01	68,24	22,49	196,67	83,66	53,67	290,05	93,38	72,29	387,56	97,51	101,26	4,37	4,37	4,37	32
160	20,22	20,22	6,89	46,89	26,66	2,90	115,47	68,58	23,11	199,50	84,02	54,34	293,12	93,62	72,74	391,21	98,09	102,45	4,45	4,45	4,45	33
66	19,67	19,67	3,96	45,26	25,59	6,80	113,83	68,57	23,08	197,36	83,53	53,44	291,32	93,95	73,35	392,25	100,93	108,32	4,51	4,51	4,51	34
193	20,34	20,34	7,49	46,71	26,37	3,96	115,12	68,41	22,80	199,82	84,70	55,58	293,03	93,21	71,97	390,03	97,00	100,21	4,52	4,52	4,52	35
100	20,84	20,84	10,17	47,30	26,46	3,65	115,25	67,95	21,97	201,23	85,98	57,94	289,58	88,35	63,01	387,49	97,91	102,08	4,61	4,61	4,61	36
101	20,84	20,84	10,17	47,30	26,46	3,65	115,25	67,95	21,97	201,23	85,98	57,94	289,58	88,35	63,01	387,49	97,91	102,08	4,61	4,61	4,61	37
145	21,27	21,27	12,43	50,03	28,76	4,74	120,79	70,76	27,01	204,97	84,18	54,63	295,48	90,51	66,99	385,26	89,78	85,31	4,71	4,71	4,71	38
113	16,34	16,34	13,62	41,06	24,71	10,00	107,98	66,92	20,13	191,96	83,98	54,26	282,90	90,94	67,79	375,46	92,55	91,03	4,79	4,79	4,79	39
156	17,25	17,25	8,85	40,96	23,71	13,65	94,08	53,12	4,64	162,22	68,14	25,16	241,09	78,88	45,53				2,77	2,31	4,79	40
192	20,59	20,59	8,85	45,90	25,31	7,83	114,10	68,20	22,42	198,18	84,08	54,44	293,66	95,47	76,15	395,61	101,96	110,44	4,81	4,81	4,81	41
111	21,50	21,50	13,64	47,30	25,80	6,05	115,47	68,17	22,37	200,07	84,60	55,40	293,56	93,49	72,49	388,47	94,90	95,88	4,82	4,82	4,82	42
140	20,87	20,87	10,31	49,99	29,12	6,05	123,61	73,62	32,15	208,49	84,87	55,90	296,85	88,36	63,03	385,87	89,02	83,73	4,84	4,84	4,84	43
130	20,02	20,02	5,83	47,51	27,49	0,11	120,45	72,94	30,92	208,06	87,61	60,93	304,24	96,18	77,45	404,92	100,68	107,81	4,85	4,85	4,85	44
71	21,66	21,66	14,48	49,30	27,64	0,64	121,79	72,50	30,13	207,67	85,88	57,74	298,50	90,84	67,60	391,47	92,97	91,89	4,89	4,89	4,89	45

	Experi	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterios de selección			
		A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
33	18,92	18,92		46,38	27,46		102,09	55,71		156,53	54,44		210,73	54,20		259,18	48,45						
139	21,01	21,01	11,04	49,60	28,59	4,11	123,08	73,49	31,91	209,18	86,09	58,15	300,83	91,65	69,10	395,73	94,90	95,86	5,01	5,01	5,01	46	
132	21,28	21,28	12,49	49,26	27,97	1,87	123,31	74,05	32,92	210,12	86,81	59,46	301,15	91,03	67,95	396,73	95,58	97,28	5,05	5,05	5,05	47	
114	20,06	20,06	6,03	48,39	28,33	3,17	121,85	73,46	31,86	210,16	88,31	62,22	306,11	95,95	77,02	407,13	101,02	108,51	5,07	5,07	5,07	48	
138	15,96	15,96	15,63	39,82	23,85	13,13	107,45	67,63	21,40	191,82	84,37	54,97	283,50	91,68	69,15	378,39	94,89	95,85	5,12	5,12	5,12	49	
143	21,46	21,46	13,43	49,97	28,51	3,81	122,61	72,64	30,40	210,65	88,04	61,72	302,86	92,21	70,13	399,39	96,53	99,23	5,20	5,20	5,20	50	
144	21,46	21,46	13,43	49,97	28,51	3,81	122,61	72,64	30,40	210,65	88,04	61,72	302,86	92,21	70,13	399,39	96,53	99,23	5,20	5,20	5,20	51	
32	21,41	21,41	13,16	50,12	28,71	4,55	123,04	72,92	30,89	210,30	87,26	60,28	303,44	93,14	71,84	400,00	96,57	99,31	5,20	5,20	5,20	52	
68	23,01	23,01	11,05	49,60	28,59	4,10	122,98	73,39	31,73	210,47	87,49	60,71	306,85	96,37	77,81	406,70	99,85	106,10	5,25	5,25	5,25	53	
69	19,91	19,91	5,23	55,55	35,64	29,80	117,85	62,30	11,82	202,86	85,01	56,15	298,51	95,65	76,48	399,44	100,93	108,32	5,27	5,27	5,27	54	
129	19,91	19,91	5,23	55,55	35,64	29,80	117,85	62,30	11,82	202,86	85,01	56,15	298,51	95,65	76,48	399,85	101,34	109,16	5,27	5,27	5,27	55	
37	20,68	20,68	9,32	49,24	28,56	3,99	122,92	73,68	32,26	212,63	89,70	64,77	307,60	94,98	75,23	406,91	99,31	104,97	5,29	5,29	5,29	56	
36	20,21	20,21	6,81	49,43	29,22	6,40	124,52	75,10	34,80	214,44	89,92	65,17	303,83	91,39	68,61	403,59	97,76	101,77	5,30	5,30	5,30	57	
29	20,32	20,32	7,39	49,28	28,96	5,46	123,46	74,18	33,15	213,05	89,59	64,57	309,45	96,40	77,85	410,56	101,12	108,71	5,35	5,35	5,35	58	
58	21,20	21,20	12,08	50,59	29,38	7,00	125,57	74,98	34,60	213,02	87,44	60,62	305,46	92,45	70,57	400,43	94,96	96,00	5,36	5,36	5,36	59	
26	21,02	21,02	11,09	50,69	29,67	8,07	125,93	75,24	35,06	214,66	88,73	62,99	310,13	95,47	76,14	405,51	95,38	96,87	5,51	5,51	5,51	60	
134	23,63	23,63	24,91	50,56	26,93	1,93	125,16	74,60	33,91	211,27	86,11	58,17	301,43	90,16	66,34	395,42	94,00	94,00	5,52	5,52	5,52	61	
180	20,78	20,78	9,84	51,43	30,65	11,61	125,84	74,42	33,58	214,33	88,48	62,53	310,04	95,72	76,60	408,74	98,70	103,71	5,60	5,60	5,60	62	
19	21,65	21,65	14,41	51,13	29,49	7,38	126,92	75,79	36,04	215,35	88,42	62,42	308,21	92,86	71,34	405,40	97,19	100,60	5,62	5,62	5,62	63	
56	21,67	21,67	14,52	51,03	29,36	6,92	126,96	75,93	36,30	215,47	88,51	62,58	308,92	93,45	72,41	406,40	97,48	101,20	5,64	5,64	5,64	64	
175	21,42	21,42	13,21	51,03	29,61	7,82	126,89	75,87	36,18	216,15	89,26	63,96	309,92	93,77	73,01	406,02	96,10	98,35	5,64	5,64	5,64	65	
8	22,05	22,05	16,53	50,97	28,92	5,32	126,72	75,76	35,98	215,59	88,86	63,23	309,06	93,47	72,45	405,66	96,60	99,38	5,65	5,65	5,65	66	
4	21,76	21,76	14,99	51,01	29,25	6,52	128,25	77,24	38,65	216,46	88,21	62,03	311,27	94,81	74,92	407,52	96,25	98,67	5,70	5,70	5,70	67	
72	22,38	22,38	18,29	51,01	28,63	4,25	127,14	76,13	36,66	215,46	88,32	62,23	309,57	94,11	73,63	407,51	97,94	102,15	5,70	5,70	5,70	68	
142	23,46	23,46	23,99	49,33	25,87	5,80	121,44	72,11	29,44	209,74	88,30	62,20	302,28	92,54	70,73	398,19	95,91	97,96	5,70	5,70	5,70	69	
166	21,76	21,76	15,02	51,52	29,76	8,37	127,13	75,61	35,72	216,24	89,11	63,69	310,09	93,85	73,15	405,91	95,82	97,78	5,71	5,71	5,71	70	
14	22,63	22,63	19,63	54,85	32,21	17,30	130,79	75,94	36,32	215,01	84,22	54,71	300,59	85,58	57,90	387,29	86,69	78,94	5,71	5,71	5,71	71	
50	21,40	21,40	13,10	50,69	29,29	6,66	125,73	75,04	34,69	216,31	90,59	66,40	312,91	96,60	78,22	411,93	99,02	104,38	5,71	5,71	5,71	72	
141	21,40	21,40	13,10	50,69	29,29	6,66	125,73	75,04	34,69	216,31	90,59	66,40	312,91	96,60	78,22	411,93	99,02	104,38	5,71	5,71	5,71	73	
173	23,07	23,07	21,92	51,11	28,04	2,11	126,70	75,60	35,70	215,96	89,26	63,95	310,49	94,53	74,41	405,12	94,63	95,31	5,74	5,74	5,74	74	
86	23,55	23,55	24,47	51,15	27,60	0,52	126,62	75,47	35,47	215,59	88,97	63,43	309,55	93,95	73,35	403,86	94,31	94,66	5,74	5,74	5,74	75	
154	21,30	21,30	12,58	51,36	30,06	9,46	127,36	76,00	36,42	217,19	89,83	65,02	310,42	93,23	72,01	407,74	97,32	100,87	5,74	5,74	5,74	76	
13	22,92	22,92	21,15	50,24	27,32	0,50	126,22	75,98	36,39	216,10	89,88	65,09	310,99	94,89	75,07	407,97	96,98	100,16	5,74	5,74	5,74	77	
28	21,33	21,33	12,76	51,21	29,87	8,79	128,12	76,92	38,07	216,68	88,56	62,68	312,72	96,04	77,19	412,43	99,71	105,80	5,78	5,78	5,78	78	
2	21,89	21,89	15,71	50,60	28,71	4,54	126,33	75,73	35,93	219,36	93,03	70,89	307,94	88,58	63,43	405,72	97,78	101,82	5,78	5,78	5,78	79	
49	22,21	22,21	17,41	51,18	28,97	5,50	127,73	76,55	37,41	216,60	88,87	63,24	311,07	94,46	74,29	409,20	98,13	102,54	5,78	5,78	5,78	80	
137	21,31	21,31	12,65	53,01	31,69	15,42	127,24	74,24	33,25	216,15	88,91	63,31	309,48	93,33	72,20	405,70	96,22	98,59	5,81	5,81	5,81	81	
146	22,90	22,90	21,04	51,44	28,54	3,94	127,38	75,94	36,31	216,62	89,24	63,92	310,01	93,39	72,30	406,81	96,80	99,79	5,82	5,82	5,82	82	
174	22,90	22,90	21,04	51,44	28,54	3,94	127,38	75,94	36,31	216,62	89,24	63,92	310,01	93,39	72,30	406,81	96,80	99,79	5,82	5,82	5,82	83	
51	23,89	23,89	26,29	51,34	27,44	0,06	127,08	75,74	35,96	216,12	89,04	63,55	311,15	95,03	75,34	406,21	95,06	96,19	5,84	5,84	5,84	84	
136	21,52	21,52	13,76	52,55	31,03	13,00	129,14	76,59	37,48	217,23	88,09	61,81	311,18	93,95	73,34	408,47	97,29	100,81	5,88	5,88	5,88	85	
159	21,45	21,45	13,37	52,49	31,04	13,03	128,00	75,51	35,54	217,48	89,48	64,36	312,66	95,18	75,61	408,64	95,98	98,10	5,88	5,88	5,88	86	
179	21,92	21,92	15,84	53,14	31,23	13,72	124,70	71,56	28,45	213,98	89,28	63,99	310,53	96,55	78,14	413,51	102,97	112,54	5,90	5,90	5,90	87	
7	24,42	24,42	29,09	52,13	27,71	0,90	127,43	75,30	35,16	216,33	88,90	63,30	310,04	93,71	72,89	405,87	95,84	97,81	5,95	5,95	5,95	88	
16	24,22	24,22	27,99	51,24	27,03	1,58	126,28	75,04	34,69	216,27	89,99	65,30	310,88	94,61	74,56	407,02	96,14	98,43	6,01	6,01	6,01	89	
	21,96	21,96	16,04	53,29	31,33	14,10	128,33	75,05	34,71	217,34	89,01	63,50	312,59	95,25	75,73	411,03	98,44	103,18	6,02	6,02	6,02	90	

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterios de selección			
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
Experi	18,92	18,92		46,38	27,46		102,09	55,71		156,53	54,44		210,73	54,20		259,18	48,45					
181	22,60	22,60	19,45	51,94	29,34	6,84	128,80	76,87	37,98	222,09	93,28	71,35	309,01	86,92	60,37	405,78	96,77	99,73	6,07	6,07	6,07	91
17	22,92	22,92	21,16	52,54	29,62	7,85	129,66	77,12	38,43	220,03	90,37	65,99	315,69	95,67	76,51	415,38	99,69	105,75	6,21	6,21	6,21	92
20	24,83	24,83	31,22	51,29	26,46	3,62	127,47	76,18	36,74	217,88	90,41	66,07	309,41	91,53	68,87	405,47	96,06	98,27	6,27	6,27	6,27	93
153	24,83	24,83	31,22	51,29	26,46	3,62	127,47	76,18	36,74	217,88	90,41	66,07	309,41	91,53	68,87	405,47	96,06	98,27	6,27	6,27	6,27	94
23	24,98	24,98	32,04	51,12	26,14	4,82	128,38	77,26	38,68	216,43	88,06	61,75	309,97	93,54	72,58	404,10	94,13	94,28	6,27	6,27	6,27	95
84	24,98	24,98	32,05	51,10	26,12	4,90	127,05	75,95	36,34	215,90	88,84	63,20	311,87	95,98	77,08	407,64	95,77	97,67	6,31	6,31	6,31	96
1	25,18	25,18	33,08	51,25	26,07	5,06	128,14	76,89	38,02	216,43	88,29	62,18	309,62	93,19	71,94	407,88	98,26	102,81	6,39	6,39	6,39	97
87	24,19	24,19	27,83	57,78	33,60	22,34	137,20	79,42	42,56	221,04	83,84	54,00	306,07	85,03	56,89	389,55	83,48	72,31	6,39	6,39	6,39	98
126	21,65	21,65	14,45	44,40	22,75	17,15	105,65	61,24	9,93	178,94	73,29	34,63	255,61	76,67	41,46				3,78	3,15	6,53	99
115	23,98	23,98	26,76	42,11	18,13	33,99	109,22	67,11	20,47	194,54	85,32	56,72	287,16	92,61	70,87	386,33	99,18	104,70	6,57	6,57	6,57	100
112	16,75	16,75	11,48	41,68	24,93	9,22	105,80	64,13	15,11	184,86	79,06	45,22	269,41	84,55	56,00				4,01	3,34	6,93	101
59	23,53	23,53	24,37	59,34	35,81	30,39	139,49	80,15	43,87	229,41	89,92	65,18	320,92	91,51	68,83	415,12	94,20	94,43	7,28	7,28	7,28	102
5	27,60	27,60	45,87	50,68	23,08	15,94	127,72	77,04	38,29	216,63	88,91	63,32	308,90	92,27	70,23	406,59	97,69	101,63	7,39	7,39	7,39	103
118	22,86	22,86	20,80	55,77	32,92	19,88	139,24	83,47	49,82	234,12	94,87	74,27	333,32	99,20	83,03	436,16	102,84	112,27	7,46	7,46	7,46	104
165	22,52	22,52	19,04	56,82	34,30	24,91	140,29	83,47	49,82	234,46	94,17	72,98	330,97	96,51	78,06	430,98	100,01	106,41	7,46	7,46	7,46	105
62	23,07	23,07	21,94	57,61	34,54	25,77	140,98	83,37	49,65	233,07	92,09	69,16	330,90	97,82	80,49	430,27	99,37	105,11	7,50	7,50	7,50	106
60	23,25	23,25	22,89	57,94	34,69	26,32	143,07	85,14	52,82	235,07	91,99	68,98	331,32	96,25	77,58	429,66	98,34	102,97	7,62	7,62	7,62	107
107	22,07	22,07	16,65	57,56	35,49	29,25	140,23	82,67	48,39	235,41	95,18	74,83	335,18	99,77	84,08	437,69	102,51	111,58	7,65	7,65	7,65	108
70	28,50	28,50	50,63	49,32	20,82	24,19	123,13	73,82	32,50	210,77	87,64	60,98	303,69	92,93	71,45	400,28	96,59	99,36	7,66	7,66	7,66	109
117	23,16	23,16	22,39	57,50	34,35	25,07	141,65	84,15	51,04	236,55	94,90	74,32	335,01	98,46	81,67	435,10	100,09	106,58	7,73	7,73	7,73	110
178	23,80	23,80	25,78	59,06	35,26	28,42	142,72	83,66	50,17	234,64	91,92	68,84	330,74	96,10	77,31	429,20	98,46	103,22	7,73	7,73	7,73	111
83	23,75	23,75	25,53	58,56	34,81	26,75	142,88	84,32	51,36	235,77	92,89	70,63	333,13	97,37	79,64	430,48	97,35	100,93	7,75	7,75	7,75	112
164	23,96	23,96	26,63	58,60	34,64	26,16	142,48	83,88	50,56	235,21	92,73	70,33	333,82	98,62	81,95	433,46	99,64	105,65	7,79	7,79	7,79	113
177	23,37	23,37	23,53	58,38	35,01	27,48	143,87	85,49	53,46	236,99	93,12	71,05	338,46	101,47	87,22	433,21	94,75	95,56	7,80	7,80	7,80	114
172	23,67	23,67	25,09	58,41	34,74	26,51	143,50	85,09	52,73	237,13	93,64	72,01	335,24	98,11	81,01	432,94	97,70	101,65	7,83	7,83	7,83	115
82	23,71	23,71	25,30	59,05	35,34	28,70	144,17	85,12	52,80	236,73	92,56	70,03	334,44	97,71	80,27	430,66	96,22	98,59	7,83	7,83	7,83	116
170	23,75	23,75	25,54	58,87	35,12	27,88	143,04	84,17	51,09	236,72	93,67	72,07	333,47	96,76	78,52	433,52	100,05	106,50	7,87	7,87	7,87	117
184	23,79	23,79	25,75	59,23	35,44	29,06	143,60	84,37	51,44	237,20	93,60	71,93	333,45	96,25	77,59	430,91	97,46	101,15	7,89	7,89	7,89	118
186	24,37	24,37	28,79	60,76	36,39	32,53	145,53	84,77	52,16	235,63	90,11	65,51	329,62	93,99	73,41	425,57	95,95	98,03	7,91	7,91	7,91	119
80	23,67	23,67	25,13	59,42	35,75	30,19	143,64	84,21	51,16	236,74	93,10	71,01	334,37	97,64	80,15	433,58	99,20	104,76	7,92	7,92	7,92	120
81	24,48	24,48	29,41	58,55	34,06	24,05	144,52	85,97	54,32	237,59	93,07	70,96	334,15	96,56	78,15	432,97	98,82	103,97	7,92	7,92	7,92	121
183	24,19	24,19	27,84	58,75	34,56	25,87	143,71	84,96	52,50	237,80	94,09	72,83	338,18	100,38	85,21	433,72	95,54	97,20	7,94	7,94	7,94	122
148	23,83	23,83	25,93	60,45	36,62	33,36	146,19	85,74	53,90	237,18	90,99	67,15	331,02	93,84	73,13	427,68	96,67	99,52	7,94	7,94	7,94	123
176	24,01	24,01	26,92	59,45	35,44	29,05	146,08	86,63	55,51	237,62	91,54	68,14	335,71	98,09	80,97	432,92	97,21	100,64	7,97	7,97	7,97	124
182	24,16	24,16	27,68	59,28	35,12	27,90	144,04	84,76	52,14	238,94	94,90	74,32	335,57	96,63	78,29	435,15	99,58	105,53	8,06	8,06	8,06	125
116	23,03	23,03	21,71	59,42	36,39	32,51	142,82	83,41	49,72	238,44	95,62	75,65	337,17	98,72	82,14	441,00	103,84	114,32	8,08	8,08	8,08	126
103	26,27	26,27	38,85	62,91	36,63	33,41	146,99	84,09	50,94	237,94	90,94	67,05	327,59	89,65	65,41	418,50	90,91	87,63	8,22	8,22	8,22	127
104	26,27	26,27	38,85	62,91	36,63	33,41	146,99	84,09	50,94	237,94	90,94	67,05	327,59	89,65	65,41	418,50	90,91	87,63	8,22	8,22	8,22	128
27	24,50	24,50	29,50	62,08	37,58	36,85	147,89	85,81	54,03	239,30	91,41	67,91	335,06	95,75	76,67	433,30	98,25	102,78	8,32	8,32	8,32	129
108	25,32	25,32	33,83	59,01	33,68	22,66	145,21	86,21	54,74	240,06	94,84	74,22	341,93	101,87	87,95	446,90	104,97	116,66	8,36	8,36	8,36	130
43	24,48	24,48	29,37	63,12	38,64	40,72	147,66	84,54	51,75	241,37	93,71	72,14	334,79	93,42	72,35	430,16	95,38	96,86	8,46	8,46	8,46	131
122	30,82	30,82	62,89	68,65	37,83	37,77	148,54	79,89	43,41	231,55	83,01	52,47	315,98	84,43	55,78	400,41	84,43	74,26	8,47	8,47	8,47	132
185	24,96	24,96	31,91	61,55	36,59	33,26	148,75	87,19	56,51	242,00	93,26	71,30	340,68	98,67	82,06	437,96	97,29	100,80	8,50	8,50	8,50	133
169	24,01	24,01	26,89	61,64	37,64	37,06	149,30	87,65	57,34	243,80	94,50	73,59	340,44	96,64	78,30	437,58	97,14	100,50	8,52	8,52	8,52	134
24	24,88	24,88	31,48	61,26	36,38	32,49	148,45	87,19	56,51	243,02	94,57	73,71	339,12	96,10	77,31	438,54	99,42	105,20	8,53	8,53	8,53	135



	Experi	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterios de selección			
		A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)	Ranking
21	18,92	18,92		46,38	27,46		102,09	55,71		156,53	54,44		210,73	54,20		259,18	48,45						
149	24,44	24,44	29,16	61,21	36,78	33,93	149,32	88,10	58,15	243,66	94,34	73,29	340,31	96,65	78,32	439,16	98,85	104,02	8,53	8,53	8,53	136	
42	24,66	24,66	30,32	61,52	36,86	34,24	149,07	87,55	57,14	242,94	93,88	72,44	339,29	96,35	77,77	440,04	100,75	107,94	8,56	8,56	8,56	137	
167	23,81	23,81	25,87	61,61	37,79	37,64	149,54	87,93	57,84	244,22	94,67	73,90	341,87	97,65	80,17	442,24	100,37	107,16	8,60	8,60	8,60	138	
93	24,62	24,62	30,12	61,82	37,20	35,46	149,45	87,63	57,30	243,55	94,10	72,85	341,27	97,72	80,30	441,26	99,99	106,38	8,63	8,63	8,63	139	
6	27,23	27,23	43,93	65,53	38,30	39,47	151,04	85,51	53,49	240,05	89,01	63,49	330,66	90,62	67,19	419,85	89,18	84,07	8,64	8,64	8,64	140	
187	24,28	24,28	28,30	62,14	37,87	37,90	149,55	87,41	56,90	244,28	94,73	74,01	340,94	96,65	78,33	440,47	99,54	105,44	8,65	8,65	8,65	141	
3	24,09	24,09	27,30	61,83	37,75	37,47	150,05	88,21	58,34	244,83	94,79	74,11	342,64	97,80	80,45	442,49	99,85	106,10	8,67	8,67	8,67	142	
150	25,00	25,00	32,12	61,87	36,87	34,27	150,62	88,75	59,31	244,09	93,47	71,69	341,05	96,96	78,89	440,55	99,50	105,37	8,67	8,67	8,67	143	
168	24,19	24,19	27,83	62,21	38,02	38,47	150,11	87,90	57,78	243,88	93,77	72,24	342,60	98,72	82,14	443,25	100,66	107,75	8,68	8,68	8,68	144	
9	24,08	24,08	27,27	62,00	37,92	38,10	150,22	88,21	58,35	245,68	95,46	75,36	342,22	96,55	78,13	442,86	100,64	107,71	8,73	8,73	8,73	145	
19	24,55	24,55	29,77	62,95	38,40	39,84	150,53	87,58	57,20	244,37	93,84	72,37	341,59	97,22	79,38	441,04	99,45	105,26	8,76	8,76	8,76	146	
44	24,36	24,36	28,73	61,35	36,99	34,71	149,19	87,84	57,68	245,43	96,24	76,78	346,98	101,55	87,36	449,52	102,54	111,64	8,78	8,78	8,78	147	
54	25,02	25,02	32,23	63,09	38,07	38,63	149,88	86,79	55,79	244,74	94,87	74,26	341,94	97,20	79,33	441,49	99,55	105,46	8,83	8,83	8,83	148	
88	25,36	25,36	34,02	65,13	39,78	44,85	152,93	87,80	57,60	245,01	92,08	69,14	340,39	95,38	75,98	436,55	96,15	98,46	8,96	8,96	8,96	149	
12	25,14	25,14	32,88	63,20	38,06	38,60	152,61	89,42	60,50	247,44	94,82	74,18	345,29	97,85	80,54	443,69	98,40	103,10	9,00	9,00	9,00	150	
18	22,28	22,28	17,79	52,88	30,60	11,43	127,38	74,49	33,72	208,48	81,10	48,98	286,90	78,42	44,68				5,22	4,35	9,01	151	
18	25,67	25,67	35,66	63,28	37,61	36,98	151,92	88,63	59,10	246,44	94,52	73,63	346,01	99,57	83,71	446,71	100,71	107,85	9,05	9,05	9,05	152	
90	25,04	25,04	32,36	64,07	39,03	42,12	151,50	87,43	56,94	247,07	95,57	75,55	345,76	98,69	82,09	445,22	99,46	105,29	9,08	9,08	9,08	153	
191	24,87	24,87	31,47	64,23	39,36	43,32	155,03	90,80	62,98	251,40	96,38	77,03	351,83	100,43	85,29	454,84	103,01	112,62	9,43	9,43	9,43	154	
55	26,27	26,27	38,85	66,01	39,74	44,73	156,62	90,60	62,63	250,38	93,77	72,24	347,98	97,59	80,06	447,09	99,11	104,56	9,52	9,52	9,52	155	
53	26,07	26,07	37,81	65,61	39,53	43,97	156,53	90,93	63,21	251,57	95,04	74,57	349,80	98,23	81,24	447,95	98,14	102,57	9,53	9,53	9,53	156	
102	25,23	25,23	33,34	65,33	40,11	46,05	156,80	91,47	64,19	253,91	97,11	78,38	354,04	100,12	84,73	454,71	100,67	107,79	9,66	9,66	9,66	157	
188	26,41	26,41	39,60	66,51	40,10	46,04	157,82	91,31	63,90	251,93	94,11	72,87	349,05	97,11	79,18	448,72	99,67	105,72	9,67	9,67	9,67	158	
25	21,41	21,41	13,16	51,70	30,29	10,31	126,85	75,15	34,89	213,24	86,39	58,68	305,01	91,78	69,33				5,61	4,67	9,69	159	
190	25,62	25,62	35,40	65,13	39,52	43,90	156,28	91,15	63,61	254,28	98,00	80,02	354,36	100,08	84,65	455,58	101,22	108,91	9,70	9,70	9,70	160	
135	21,20	21,20	12,07	50,35	29,15	6,15	125,89	75,53	35,58	215,19	89,30	64,04	308,97	93,78	73,03				5,63	4,69	9,72	161	
189	25,12	25,12	32,76	65,76	40,64	47,99	155,38	89,63	60,88	253,68	98,30	80,57	354,52	100,83	86,04	458,36	103,84	114,32	9,75	9,75	9,75	162	
52	25,76	25,76	36,13	65,98	40,22	46,48	157,32	91,34	63,95	254,60	97,28	78,70	354,21	99,60	83,77	455,97	101,76	110,04	9,81	9,81	9,81	163	
105	25,70	25,70	35,82	66,87	41,17	49,92	157,86	91,00	63,34	255,33	97,46	79,03	353,21	97,88	80,60	449,81	96,60	99,38	9,82	9,82	9,82	164	
106	25,70	25,70	35,82	66,87	41,17	49,92	157,86	91,00	63,34	255,33	97,46	79,03	353,21	97,88	80,60	449,81	96,60	99,38	9,82	9,82	9,82	165	
99	16,86	16,86	10,90	37,53	20,67	24,72	86,34	48,81	12,39	139,04	52,70	3,20							3,01	2,00	10,14	166	
92	27,89	27,89	47,43	69,54	41,65	51,67	161,83	92,28	65,65	256,19	94,36	73,33	354,25	98,06	80,93	454,68	100,43	107,28	10,33	10,33	10,33	167	
94	27,82	27,82	47,05	70,70	42,88	56,15	163,07	92,37	65,80	261,37	98,30	80,57	358,18	96,81	78,61	458,26	100,08	106,56	10,72	10,72	10,72	168	
95	27,82	27,82	47,05	70,70	42,88	56,15	163,07	92,37	65,80	261,37	98,30	80,57	358,18	96,81	78,61	458,26	100,08	106,56	10,72	10,72	10,72	169	
91	29,60	29,60	56,47	72,32	42,72	55,56	165,79	93,47	67,78	263,49	97,70	79,47	365,54	102,05	88,28	466,68	101,14	108,74	11,22	11,22	11,22	170	
22	24,90	24,90	31,60	50,80	25,90	5,69	127,73	76,94	38,10	216,51	88,78	63,08	310,22	93,71	72,89				6,64	5,53	11,48	171	
79	32,87	32,87	73,73	80,53	47,66	73,58	179,79	99,26	78,17	278,24	98,45	80,84	380,36	102,12	88,42	483,67	103,31	113,23	13,12	13,12	13,12	172	
48	32,93	32,93	74,05	80,89	47,97	74,67	178,63	97,73	75,43	279,37	100,74	85,06	382,49	103,12	90,26	484,20	101,71	109,94	13,21	13,21	13,21	173	
78	33,93	33,93	79,34	80,30	46,37	68,87	178,69	98,39	76,61	279,42	100,73	85,03	381,74	102,32	88,79	485,06	103,32	113,25	13,25	13,25	13,25	174	
77	33,77	33,77	78,49	80,46	46,69	70,02	179,19	98,74	77,23	279,06	99,87	83,45	381,21	102,14	88,46	485,86	104,66	116,01	13,25	13,25	13,25	175	
46	32,90	32,90	73,87	81,05	48,16	75,37	179,16	98,11	76,10	279,35	100,19	84,03	383,24	103,89	91,68	486,32	103,09	112,77	13,26	13,26	13,26	176	
47	34,30	34,30	81,28	81,49	47,19	71,84	180,00	98,52	76,84	281,79	101,78	86,96	380,84	99,05	82,75	483,29	102,45	111,47	13,46	13,46	13,46	177	
124	35,59	35,59	88,11	83,52	47,93	74,54	181,75	98,23	76,32	284,30	102,55	88,38	387,60	103,30	90,59	489,62	102,01	110,55	13,94	13,94	13,94	178	
123	36,39	36,39	92,32	83,20	46,81	70,48	182,42	99,22	78,09	284,52	102,11	87,56	385,80	101,28	86,86	489,18	103,38	113,37	13,97	13,97	13,97	179	
125	35,11	35,11	85,55	82,79	47,68	73,64	181,94	99,15	77,97	285,16	103,22	89,61	389,26	104,11	92,08	497,00	107,73	122,36	14,01	14,01	14,01	180	



**Tabla D. 5.** Ranking de las combinaciones numéricas, resultante del estudio en conjunto.

Elem. Comb.	EN14651	ASTM1018	PLACA 1	PLACA 2	SRI	orden
32	17	69	19	53	158	1
14	11	75	8	72	166	2
134	13	79	14	62	168	3
50	12	76	9	73	170	4
109	10	92	39	29	170	5
129	54	50	18	56	178	6
97	3	119	29	28	179	7
13	16	85	5	78	184	8
28	33	64	10	79	186	9
130	8	111	26	44	189	10
36	2	120	12	58	192	11
192	21	103	30	41	195	12
40	24	115	48	18	205	13
37	41	100	11	57	209	14
67	15	134	31	32	212	15
147	42	88	59	25	214	16
136	5	13	111	86	215	17
66	45	105	34	34	218	18
29	154	5	4	59	222	19
119	23	137	42	20	222	20
140	121	53	7	43	224	21
41	48	109	50	21	228	22
95	46	7	6	169	228	23
194	7	168	33	26	234	24
193	71	107	22	35	235	25
63	25	143	46	22	236	26
161	165	37	41	2	245	27
127	35	91	92	30	248	28
132	6	177	20	48	251	29
163	92	49	95	19	255	30
65	27	157	58	16	258	31
38	94	106	47	13	260	32
155	96	57	103	9	265	33
4	19	45	134	68	266	34
2	67	14	108	80	269	35
49	104	19	66	81	270	36
110	44	68	132	27	271	37
121	90	127	44	15	276	38
101	85	35	120	37	277	39
11	84	66	115	14	279	40
26	149	67	3	61	280	41
96	170	118	1	1	290	42
178	98	36	45	111	290	43
69	31	181	24	55	291	44
72	81	22	119	69	291	45
144	126	8	112	52	298	46
16	30	166	13	90	299	47
20	39	26	141	93	299	48
173	78	33	113	75	299	49
145	95	6	161	38	300	50
160	20	114	135	33	302	51

Elem. Comb.	EN14651	ASTM1018	PLACA 1	PLACA 2	SRI	orden
153	40	27	142	94	303	52
166	105	89	38	71	303	53
143	133	10	114	51	308	54
158	159	44	99	6	308	55
17	80	117	21	92	310	56
114	88	94	79	49	310	57
33	93	11	168	46	318	58
107	1	172	37	108	318	59
84	69	46	110	96	321	60
25	127	34	2	159	322	61
111	50	101	130	42	323	62
165	89	95	36	105	325	63
70	72	24	121	109	326	64
118	18	170	35	104	327	65
56	99	21	143	65	328	66
117	4	155	60	110	329	67
139	136	30	116	47	329	68
151	160	113	53	3	329	69
177	51	126	40	114	331	70
179	62	41	140	88	331	71
19	83	38	147	64	332	72
86	55	59	145	76	335	73
137	75	31	148	82	336	74
176	34	116	62	124	336	75
142	118	16	133	70	337	76
1	122	15	106	97	340	77
146	76	32	149	83	340	78
10	163	154	16	8	341	79
156	187	70	49	40	346	80
162	152	128	43	23	346	81
76	156	65	104	24	349	82
82	49	121	63	116	349	83
180	70	78	138	63	349	84
23	68	23	165	95	351	85
51	82	47	139	85	353	86
141	117	54	109	74	354	87
53	43	73	84	156	356	88
71	115	25	171	45	356	89
175	79	55	157	66	357	90
133	134	139	80	7	360	91
75	155	97	100	10	362	92
131	161	175	15	12	363	93
87	143	63	61	98	365	94
104	37	110	91	128	366	95
68	110	180	23	54	367	96
74	97	96	170	5	368	97
98	150	184	25	11	370	98
21	119	42	74	136	371	99
128	86	72	182	31	371	100
31	151	141	76	4	372	101
43	64	2	176	131	373	102
15	9	163	56	147	375	103
64	148	156	57	17	378	104
138	132	9	188	50	379	105

Elem. Comb.	EN14651	ASTM1018	PLACA 1	PLACA 2	SRI	orden
174	120	39	136	84	379	106
108	26	174	54	130	384	107
126	171	87	28	99	385	108
159	146	136	17	87	386	109
93	58	1	190	140	389	110
169	61	122	72	134	389	111
12	145	43	55	151	394	112
103	102	93	81	127	403	113
148	128	90	65	123	406	114
5	141	12	151	103	407	115
94	52	61	127	168	408	116
58	157	40	152	60	409	117
168	65	135	67	145	412	118
154	158	20	158	77	413	119
88	131	62	71	150	414	120
181	162	17	144	91	414	121
8	111	82	155	67	415	122
27	124	4	160	129	417	123
115	63	176	78	100	417	124
170	38	138	124	117	417	125
105	53	112	90	164	419	126
113	147	60	175	39	421	127
164	135	149	27	113	424	128
185	138	86	68	133	425	129
42	60	160	69	138	427	130
189	14	171	87	162	434	131
190	22	164	88	160	434	132
187	66	129	98	142	435	133
191	29	167	86	154	436	134
18	107	108	73	152	440	135
24	108	133	64	135	440	136
83	113	58	159	112	442	137
188	185	18	82	158	443	138
52	32	165	85	163	445	139
60	56	144	150	107	457	140
184	47	130	163	118	458	141
90	180	56	70	153	459	142
91	194	3	94	170	461	143
100	109	188	129	36	462	144
167	100	152	75	139	466	145
59	142	99	125	102	468	146
116	87	159	96	126	468	147
44	74	146	101	148	469	148
135	59	80	169	161	469	149
78	106	74	117	174	471	150
81	125	98	131	121	475	151
46	57	81	172	176	486	152
150	116	124	102	144	486	153
45	153	51	107	182	493	154
47	101	29	191	177	498	155
22	139	28	164	171	502	156
112	168	48	187	101	504	157
171	36	132	156	181	505	158
186	129	77	184	119	509	159

Elem. Comb.	EN14651	ASTM1018	PLACA 1	PLACA 2	SRI	orden
55	123	150	83	155	511	160
183	77	151	167	122	517	161
9	130	140	105	146	521	162
80	114	123	166	120	523	163
106	28	158	178	165	529	164
102	184	104	89	157	534	165
77	103	84	173	175	535	166
79	169	83	118	172	542	167
7	144	162	153	89	548	168
92	137	153	93	167	550	169
6	140	125	146	141	552	170
182	112	142	180	125	559	171
149	179	147	97	137	560	172
99	182	186	32	166	566	173
54	183	52	183	149	567	174
172	177	148	137	115	577	175
125	91	183	126	180	580	176
62	176	145	154	106	581	177
48	166	71	174	173	584	178
122	167	173	122	132	594	179
57	174	161	77	189	601	180
120	188	169	51	193	601	181
73	186	185	52	191	614	182
61	164	102	162	190	618	183
34	73	179	185	184	621	184
3	181	131	181	143	636	185
124	173	182	128	178	661	186
157	191	187	123	183	684	187
123	172	178	177	179	706	188
35	189	191	179	188	747	189
89	178	193	193	186	750	190
30	190	190	186	187	753	191
39	192	189	189	185	755	192
152	175	194	192	194	755	193
85	193	192	194	192	771	194

Tabla D. 6. Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para los cuatro elementos.

Elem. Comb.	EN14651	ASTM1018	PLACA 1	PLACA 2	SRI	(SRI-SR)^2	Ranking
32	17	69	19	53	158	53824	1
14	11	75	8	72	166	50176	2
134	13	79	14	62	168	49284	3
50	12	76	9	73	170	48400	4
109	10	92	39	29	170	48400	5
129	54	50	18	56	178	44944	6
97	3	119	29	28	179	44521	7
13	16	85	5	78	184	42436	8
28	33	64	10	79	186	41616	9
130	8	111	26	44	189	40401	10
36	2	120	12	58	192	39204	11
192	21	103	30	41	195	38025	12
40	24	115	48	18	205	34225	13
37	41	100	11	57	209	32761	14
67	15	134	31	32	212	31684	15
147	42	88	59	25	214	30976	16
136	5	13	111	86	215	30625	17
66	45	105	34	34	218	29584	18
29	154	5	4	59	222	28224	19
119	23	137	42	20	222	28224	20
140	121	53	7	43	224	27556	21
41	48	109	50	21	228	26244	22
95	46	7	6	169	228	26244	23
194	7	168	33	26	234	24336	24
193	71	107	22	35	235	24025	25
63	25	143	46	22	236	23716	26
161	165	37	41	2	245	21025	27
127	35	91	92	30	248	20164	28
132	6	177	20	48	251	19321	29
163	92	49	95	19	255	18225	30
65	27	157	58	16	258	17424	31
38	94	106	47	13	260	16900	32
155	96	57	103	9	265	15625	33
4	19	45	134	68	266	15376	34
2	67	14	108	80	269	14641	35
49	104	19	66	81	270	14400	36
110	44	68	132	27	271	14161	37
121	90	127	44	15	276	12996	38
101	85	35	120	37	277	12769	39
11	84	66	115	14	279	12321	40
26	149	67	3	61	280	12100	41
96	170	118	1	1	290	10000	42
178	98	36	45	111	290	10000	43
69	31	181	24	55	291	9801	44
72	81	22	119	69	291	9801	45
144	126	8	112	52	298	8464	46
16	30	166	13	90	299	8281	47
20	39	26	141	93	299	8281	48
173	78	33	113	75	299	8281	49
145	95	6	161	38	300	8100	50
160	20	114	135	33	302	7744	51

Elem. Comb.	EN14651	ASTM1018	PLACA 1	PLACA 2	SRI	(SRI-SR)^2	Ranking
153	40	27	142	94	303	7569	52
166	105	89	38	71	303	7569	53
143	133	10	114	51	308	6724	54
158	159	44	99	6	308	6724	55
17	80	117	21	92	310	6400	56
114	88	94	79	49	310	6400	57
33	93	11	168	46	318	5184	58
107	1	172	37	108	318	5184	59
84	69	46	110	96	321	4761	60
25	127	34	2	159	322	4624	61
111	50	101	130	42	323	4489	62
165	89	95	36	105	325	4225	63
70	72	24	121	109	326	4096	64
118	18	170	35	104	327	3969	65
56	99	21	143	65	328	3844	66
117	4	155	60	110	329	3721	67
139	136	30	116	47	329	3721	68
151	160	113	53	3	329	3721	69
177	51	126	40	114	331	3481	70
179	62	41	140	88	331	3481	71
19	83	38	147	64	332	3364	72
86	55	59	145	76	335	3025	73
137	75	31	148	82	336	2916	74
176	34	116	62	124	336	2916	75
142	118	16	133	70	337	2809	76
1	122	15	106	97	340	2500	77
146	76	32	149	83	340	2500	78
10	163	154	16	8	341	2401	79
156	187	70	49	40	346	1936	80
162	152	128	43	23	346	1936	81
76	156	65	104	24	349	1681	82
82	49	121	63	116	349	1681	83
180	70	78	138	63	349	1681	84
23	68	23	165	95	351	1521	85
51	82	47	139	85	353	1369	86
141	117	54	109	74	354	1296	87
53	43	73	84	156	356	1156	88
71	115	25	171	45	356	1156	89
175	79	55	157	66	357	1089	90
133	134	139	80	7	360	900	91
75	155	97	100	10	362	784	92
131	161	175	15	12	363	729	93
87	143	63	61	98	365	625	94
104	37	110	91	128	366	576	95
68	110	180	23	54	367	529	96
74	97	96	170	5	368	484	97
98	150	184	25	11	370	400	98
21	119	42	74	136	371	361	99
128	86	72	182	31	371	361	100
31	151	141	76	4	372	324	101
43	64	2	176	131	373	289	102
15	9	163	56	147	375	225	103
64	148	156	57	17	378	144	104
138	132	9	188	50	379	121	105



Elem. Comb.	EN14651	ASTM1018	PLACA 1	PLACA 2	SRI	(SRI-SR)^2	Ranking
174	120	39	136	84	379	121	106
108	26	174	54	130	384	36	107
126	171	87	28	99	385	25	108
159	146	136	17	87	386	16	109
93	58	1	190	140	389	1	110
169	61	122	72	134	389	1	111
12	145	43	55	151	394	16	112
103	102	93	81	127	403	169	113
148	128	90	65	123	406	256	114
5	141	12	151	103	407	289	115
94	52	61	127	168	408	324	116
58	157	40	152	60	409	361	117
168	65	135	67	145	412	484	118
154	158	20	158	77	413	529	119
88	131	62	71	150	414	576	120
181	162	17	144	91	414	576	121
8	111	82	155	67	415	625	122
27	124	4	160	129	417	729	123
115	63	176	78	100	417	729	124
170	38	138	124	117	417	729	125
105	53	112	90	164	419	841	126
113	147	60	175	39	421	961	127
164	135	149	27	113	424	1156	128
185	138	86	68	133	425	1225	129
42	60	160	69	138	427	1369	130
189	14	171	87	162	434	1936	131
190	22	164	88	160	434	1936	132
187	66	129	98	142	435	2025	133
191	29	167	86	154	436	2116	134
18	107	108	73	152	440	2500	135
24	108	133	64	135	440	2500	136
83	113	58	159	112	442	2704	137
188	185	18	82	158	443	2809	138
52	32	165	85	163	445	3025	139
60	56	144	150	107	457	4489	140
184	47	130	163	118	458	4624	141
90	180	56	70	153	459	4761	142
91	194	3	94	170	461	5041	143
100	109	188	129	36	462	5184	144
167	100	152	75	139	466	5776	145
59	142	99	125	102	468	6084	146
116	87	159	96	126	468	6084	147
44	74	146	101	148	469	6241	148
135	59	80	169	161	469	6241	149
78	106	74	117	174	471	6561	150
81	125	98	131	121	475	7225	151
46	57	81	172	176	486	9216	152
150	116	124	102	144	486	9216	153
45	153	51	107	182	493	10609	154
47	101	29	191	177	498	11664	155
22	139	28	164	171	502	12544	156
112	168	48	187	101	504	12996	157
171	36	132	156	181	505	13225	158
186	129	77	184	119	509	14161	159

Elem. Comb.	EN14651	ASTM1018	PLACA 1	PLACA 2	SRI	(SRI-SR)^2	Ranking
55	123	150	83	155	511	14641	160
183	77	151	167	122	517	16129	161
9	130	140	105	146	521	17161	162
80	114	123	166	120	523	17689	163
106	28	158	178	165	529	19321	164
102	184	104	89	157	534	20736	165
77	103	84	173	175	535	21025	166
79	169	83	118	172	542	23104	167
7	144	162	153	89	548	24964	168
92	137	153	93	167	550	25600	169
6	140	125	146	141	552	26244	170
182	112	142	180	125	559	28561	171
149	179	147	97	137	560	28900	172
99	182	186	32	166	566	30976	173
54	183	52	183	149	567	31329	174
172	177	148	137	115	577	34969	175
125	91	183	126	180	580	36100	176
62	176	145	154	106	581	36481	177
48	166	71	174	173	584	37636	178
122	167	173	122	132	594	41616	179
57	174	161	77	189	601	44521	180
120	188	169	51	193	601	44521	181
73	186	185	52	191	614	50176	182
61	164	102	162	190	618	51984	183
34	73	179	185	184	621	53361	184
3	181	131	181	143	636	60516	185
124	173	182	128	178	661	73441	186
157	191	187	123	183	684	86436	187
123	172	178	177	179	706	99856	188
35	189	191	179	188	747	127449	189
89	178	193	193	186	750	129600	190
30	190	190	186	187	753	131769	191
39	192	189	189	185	755	133225	192
152	175	194	192	194	755	133225	193
85	193	192	194	192	771	145161	194

390	3505588
Promedio	Sumatoria

SR	390
S	3505588
k	4
n	194
W	<b>0,36</b>

**Tabla D. 7.** Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para las probetas prismáticas EN14651 y ASTM1018.

Elem. Comb.	EN14651	ASTM1018	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
136	5	13	18	31329	1
95	46	7	53	20164	2
93	58	1	59	18496	3
4	19	45	64	17161	4
20	39	26	65	16900	5
43	64	2	66	16641	6
153	40	27	67	16384	7
2	67	14	81	12996	8
32	17	69	86	11881	9
14	11	75	86	11881	10
50	12	76	88	11449	11
23	68	23	91	10816	12
134	13	79	92	10609	13
70	72	24	96	9801	14
28	33	64	97	9604	15
13	16	85	101	8836	16
145	95	6	101	8836	17
109	10	92	102	8649	18
72	81	22	103	8464	19
179	62	41	103	8464	20
129	54	50	104	8281	21
33	93	11	104	8281	22
137	75	31	106	7921	23
146	76	32	108	7569	24
173	78	33	111	7056	25
110	44	68	112	6889	26
94	52	61	113	6724	27
86	55	59	114	6561	28
84	69	46	115	6400	29
53	43	73	116	6241	30
130	8	111	119	5776	31
101	85	35	120	5625	32
56	99	21	120	5625	33
19	83	38	121	5476	34
97	3	119	122	5329	35
36	2	120	122	5329	36
49	104	19	123	5184	37
192	21	103	124	5041	38
127	35	91	126	4761	39
27	124	4	128	4489	40
51	82	47	129	4356	41
147	42	88	130	4225	42
47	101	29	130	4225	43
178	98	36	134	3721	44
144	126	8	134	3721	45
160	20	114	134	3721	46
142	118	16	134	3721	47
175	79	55	134	3721	48
1	122	15	137	3364	49
46	57	81	138	3249	50
40	24	115	139	3136	51
135	59	80	139	3136	52

Elem. Comb.	EN14651	ASTM1018	SRI	(SRI-SR)^2	Ranking
71	115	25	140	3025	53
37	41	100	141	2916	54
163	92	49	141	2916	55
138	132	9	141	2916	56
143	133	10	143	2704	57
104	37	110	147	2304	58
180	70	78	148	2209	59
67	15	134	149	2116	60
66	45	105	150	2025	61
11	84	66	150	2025	62
176	34	116	150	2025	63
111	50	101	151	1936	64
155	96	57	153	1764	65
5	141	12	153	1764	66
41	48	109	157	1444	67
128	86	72	158	1369	68
29	154	5	159	1296	69
117	4	155	159	1296	70
174	120	39	159	1296	71
119	23	137	160	1225	72
25	127	34	161	1156	73
21	119	42	161	1156	74
105	53	112	165	900	75
139	136	30	166	841	76
22	139	28	167	784	77
63	25	143	168	729	78
171	36	132	168	729	79
82	49	121	170	625	80
141	117	54	171	576	81
83	113	58	171	576	82
15	9	163	172	529	83
107	1	172	173	484	84
140	121	53	174	441	85
194	7	168	175	400	86
170	38	138	176	361	87
177	51	126	177	324	88
184	47	130	177	324	89
193	71	107	178	289	90
154	158	20	178	289	91
181	162	17	179	256	92
78	106	74	180	225	93
114	88	94	182	169	94
132	6	177	183	144	95
169	61	122	183	144	96
65	27	157	184	121	97
165	89	95	184	121	98
189	14	171	185	100	99
190	22	164	186	81	100
106	28	158	186	81	101
77	103	84	187	64	102
118	18	170	188	49	103
12	145	43	188	49	104
74	97	96	193	4	105
88	131	62	193	4	106

Elem. Comb.	EN14651	ASTM1018	SRI	(SRI-SR)^2	Ranking
8	111	82	193	4	107
166	105	89	194	1	108
103	102	93	195	0	109
187	66	129	195	0	110
16	30	166	196	1	111
191	29	167	196	1	112
17	80	117	197	4	113
58	157	40	197	4	114
52	32	165	197	4	115
91	194	3	197	4	116
38	94	106	200	25	117
108	26	174	200	25	118
168	65	135	200	25	119
60	56	144	200	25	120
161	165	37	202	49	121
158	159	44	203	64	122
188	185	18	203	64	123
45	153	51	204	81	124
87	143	63	206	121	125
186	129	77	206	121	126
113	147	60	207	144	127
69	31	181	212	289	128
18	107	108	215	400	129
26	149	67	216	441	130
112	168	48	216	441	131
121	90	127	217	484	132
148	128	90	218	529	133
42	60	160	220	625	134
44	74	146	220	625	135
76	156	65	221	676	136
81	125	98	223	784	137
185	138	86	224	841	138
183	77	151	228	1089	139
54	183	52	235	1600	140
90	180	56	236	1681	141
80	114	123	237	1764	142
48	166	71	237	1764	143
115	63	176	239	1936	144
150	116	124	240	2025	145
24	108	133	241	2116	146
59	142	99	241	2116	147
116	87	159	246	2601	148
75	155	97	252	3249	149
167	100	152	252	3249	150
79	169	83	252	3249	151
34	73	179	252	3249	152
182	112	142	254	3481	153
156	187	70	257	3844	154
126	171	87	258	3969	155
6	140	125	265	4900	156
61	164	102	266	5041	157
9	130	140	270	5625	158
151	160	113	273	6084	159
133	134	139	273	6084	160

Elem. Comb.	EN14651	ASTM1018	SRI	(SRI-SR)^2	Ranking
55	123	150	273	6084	161
125	91	183	274	6241	162
162	152	128	280	7225	163
159	146	136	282	7569	164
164	135	149	284	7921	165
96	170	118	288	8649	166
102	184	104	288	8649	167
68	110	180	290	9025	168
92	137	153	290	9025	169
31	151	141	292	9409	170
100	109	188	297	10404	171
64	148	156	304	11881	172
7	144	162	306	12321	173
3	181	131	312	13689	174
10	163	154	317	14884	175
62	176	145	321	15876	176
172	177	148	325	16900	177
149	179	147	326	17161	178
98	150	184	334	19321	179
57	174	161	335	19600	180
131	161	175	336	19881	181
122	167	173	340	21025	182
123	172	178	350	24025	183
124	173	182	355	25600	184
120	188	169	357	26244	185
99	182	186	368	29929	186
152	175	194	369	30276	187
73	186	185	371	30976	188
89	178	193	371	30976	189
157	191	187	378	33489	190
35	189	191	380	34225	191
30	190	190	380	34225	192
39	192	189	381	34596	193
85	193	192	385	36100	194

	195	1212930
Promedio		Sumatoria

SR	195
S	1212930
k	2
n	194
W	<b>0,50</b>

**Tabla D. 8.** Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para las Placas 1 y 2.

Elem. Comb.	PLACA 1	PLACA 2	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
96	1	1	2	37249	1
10	16	8	24	29241	2
131	15	12	27	28224	3
98	25	11	36	25281	4
161	41	2	43	23104	5
140	7	43	50	21025	6
151	53	3	56	19321	7
97	29	28	57	19044	8
193	22	35	57	19044	9
194	33	26	59	18496	10
121	44	15	59	18496	11
38	47	13	60	18225	12
119	42	20	62	17689	13
67	31	32	63	17424	14
29	4	59	63	17424	15
26	3	61	64	17161	16
40	48	18	66	16641	17
162	43	23	66	16641	18
109	39	29	68	16129	19
37	11	57	68	16129	20
66	34	34	68	16129	21
63	46	22	68	16129	22
132	20	48	68	16129	23
130	26	44	70	15625	24
36	12	58	70	15625	25
192	30	41	71	15376	26
41	50	21	71	15376	27
32	19	53	72	15129	28
129	18	56	74	14641	29
65	58	16	74	14641	30
64	57	17	74	14641	31
134	14	62	76	14161	32
68	23	54	77	13924	33
69	24	55	79	13456	34
14	8	72	80	13225	35
31	76	4	80	13225	36
50	9	73	82	12769	37
13	5	78	83	12544	38
147	59	25	84	12321	39
133	80	7	87	11664	40
28	10	79	89	11236	41
156	49	40	89	11236	42
16	13	90	103	8464	43
159	17	87	104	8281	44
158	99	6	105	8100	45
166	38	71	109	7396	46
75	100	10	110	7225	47
155	103	9	112	6889	48
17	21	92	113	6724	49
163	95	19	114	6561	50
127	92	30	122	5329	51
126	28	99	127	4624	52

Elem. Comb.	PLACA 1	PLACA 2	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
114	79	49	128	4489	53
76	104	24	128	4489	54
11	115	14	129	4356	55
118	35	104	139	3136	56
164	27	113	140	3025	57
165	36	105	141	2916	58
107	37	108	145	2500	59
49	66	81	147	2304	60
177	40	114	154	1681	61
178	45	111	156	1521	62
101	120	37	157	1444	63
110	132	27	159	1296	64
87	61	98	159	1296	65
25	2	159	161	1156	66
139	116	47	163	1024	67
144	112	52	164	961	68
143	114	51	165	900	69
100	129	36	165	900	70
160	135	33	168	729	71
117	60	110	170	625	72
111	130	42	172	529	73
95	6	169	175	400	74
74	170	5	175	400	75
115	78	100	178	289	76
82	63	116	179	256	77
141	109	74	183	144	78
108	54	130	184	121	79
176	62	124	186	81	80
2	108	80	188	49	81
72	119	69	188	49	82
173	113	75	188	49	83
148	65	123	188	49	84
136	111	86	197	4	85
99	32	166	198	9	86
145	161	38	199	16	87
24	64	135	199	16	88
180	138	63	201	36	89
185	68	133	201	36	90
4	134	68	202	49	91
142	133	70	203	64	92
1	106	97	203	64	93
15	56	147	203	64	94
84	110	96	206	121	95
169	72	134	206	121	96
12	55	151	206	121	97
42	69	138	207	144	98
56	143	65	208	169	99
103	81	127	208	169	100
21	74	136	210	225	101
19	147	64	211	256	102
58	152	60	212	289	103
168	67	145	212	289	104
128	182	31	213	324	105
33	168	46	214	361	106



Elem. Comb.	PLACA 1	PLACA 2	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
113	175	39	214	361	107
167	75	139	214	361	108
71	171	45	216	441	109
104	91	128	219	576	110
174	136	84	220	625	111
86	145	76	221	676	112
88	71	150	221	676	113
8	155	67	222	729	114
116	96	126	222	729	115
175	157	66	223	784	116
90	70	153	223	784	117
51	139	85	224	841	118
18	73	152	225	900	119
59	125	102	227	1024	120
179	140	88	228	1089	121
70	121	109	230	1225	122
137	148	82	230	1225	123
146	149	83	232	1369	124
20	141	93	234	1521	125
149	97	137	234	1521	126
154	158	77	235	1600	127
181	144	91	235	1600	128
153	142	94	236	1681	129
138	188	50	238	1849	130
55	83	155	238	1849	131
53	84	156	240	2025	132
187	98	142	240	2025	133
191	86	154	240	2025	134
188	82	158	240	2025	135
170	124	117	241	2116	136
7	153	89	242	2209	137
73	52	191	243	2304	138
120	51	193	244	2401	139
150	102	144	246	2601	140
102	89	157	246	2601	141
190	88	160	248	2809	142
52	85	163	248	2809	143
189	87	162	249	2916	144
44	101	148	249	2916	145
9	105	146	251	3136	146
81	131	121	252	3249	147
172	137	115	252	3249	148
5	151	103	254	3481	149
105	90	164	254	3481	150
122	122	132	254	3481	151
60	150	107	257	3844	152
23	165	95	260	4225	153
92	93	167	260	4225	154
62	154	106	260	4225	155
91	94	170	264	4761	156
57	77	189	266	5041	157
83	159	112	271	5776	158
184	163	118	281	7396	159
80	166	120	286	8281	160

Elem. Comb.	PLACA 1	PLACA 2	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
6	146	141	287	8464	161
112	187	101	288	8649	162
27	160	129	289	8836	163
45	107	182	289	8836	164
183	167	122	289	8836	165
79	118	172	290	9025	166
78	117	174	291	9216	167
94	127	168	295	10000	168
186	184	119	303	11664	169
182	180	125	305	12100	170
125	126	180	306	12321	171
124	128	178	306	12321	172
157	123	183	306	12321	173
43	176	131	307	12544	174
3	181	143	324	16641	175
93	190	140	330	18225	176
135	169	161	330	18225	177
54	183	149	332	18769	178
22	164	171	335	19600	179
171	156	181	337	20164	180
106	178	165	343	21904	181
48	174	173	347	23104	182
46	172	176	348	23409	183
77	173	175	348	23409	184
61	162	190	352	24649	185
123	177	179	356	25921	186
35	179	188	367	29584	187
47	191	177	368	29929	188
34	185	184	369	30276	189
30	186	187	373	31684	190
39	189	185	374	32041	191
89	193	186	379	33856	192
152	192	194	386	36481	193
85	194	192	386	36481	194

	195	1624048
Promedio		Sumatoria

SR	195
S	1624048
k	2
n	194
W	<b>0,67</b>

**Tabla D. 9.** Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para la ASTM1018 y Placa 1.

Elem. Comb.	ASTM1018	PLACA 1	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
29	5	4	9	34596	1
95	7	6	13	33124	2
25	34	2	36	25281	3
140	53	7	60	18225	4
129	50	18	68	16129	5
26	67	3	70	15625	6
28	64	10	74	14641	7
161	37	41	78	13689	8
178	36	45	81	12996	9
14	75	8	83	12544	10
50	76	9	85	12100	11
49	19	66	85	12100	12
32	69	19	88	11449	13
13	85	5	90	11025	14
134	79	14	93	10404	15
91	3	94	97	9604	16
12	43	55	98	9409	17
188	18	82	100	9025	18
37	100	11	111	7056	19
126	87	28	115	6400	20
21	42	74	116	6241	21
96	118	1	119	5776	22
156	70	49	119	5776	23
144	8	112	120	5625	24
1	15	106	121	5476	25
2	14	108	122	5329	26
136	13	111	124	5041	27
143	10	114	124	5041	28
87	63	61	124	5041	29
90	56	70	126	4761	30
166	89	38	127	4624	31
193	107	22	129	4356	32
109	92	39	131	4096	33
165	95	36	131	4096	34
36	120	12	132	3969	35
192	103	30	133	3844	36
88	62	71	133	3844	37
130	111	26	137	3364	38
17	117	21	138	3249	39
66	105	34	139	3136	40
72	22	119	141	2916	41
158	44	99	143	2704	42
163	49	95	144	2601	43
70	24	121	145	2500	44
173	33	113	146	2401	45
139	30	116	146	2401	46
147	88	59	147	2304	47
97	119	29	148	2209	48
142	16	133	149	2116	49
38	106	47	153	1764	50
159	136	17	153	1764	51
185	86	68	154	1681	52

Elem. Comb.	ASTM1018	PLACA 1	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
101	35	120	155	1600	53
148	90	65	155	1600	54
84	46	110	156	1521	55
53	73	84	157	1444	56
45	51	107	158	1369	57
41	109	50	159	1296	58
155	57	103	160	1225	59
181	17	144	161	1156	60
40	115	48	163	1024	61
141	54	109	163	1024	62
5	12	151	163	1024	63
56	21	143	164	961	64
27	4	160	164	961	65
67	134	31	165	900	66
151	113	53	166	841	67
177	126	40	166	841	68
20	26	141	167	784	69
145	6	161	167	784	70
153	27	142	169	676	71
76	65	104	169	676	72
10	154	16	170	625	73
121	127	44	171	576	74
162	128	43	171	576	75
114	94	79	173	484	76
103	93	81	174	441	77
174	39	136	175	400	78
164	149	27	176	361	79
176	116	62	178	289	80
43	2	176	178	289	81
154	20	158	178	289	82
119	137	42	179	256	83
4	45	134	179	256	84
16	166	13	179	256	85
33	11	168	179	256	86
137	31	148	179	256	87
11	66	115	181	196	88
179	41	140	181	196	89
146	32	149	181	196	90
18	108	73	181	196	91
127	91	92	183	144	92
82	121	63	184	121	93
19	38	147	185	100	94
51	47	139	186	81	95
23	23	165	188	49	96
94	61	127	188	49	97
63	143	46	189	36	98
131	175	15	190	25	99
93	1	190	191	16	100
78	74	117	191	16	101
58	40	152	192	9	102
22	28	164	192	9	103
102	104	89	193	4	104
169	122	72	194	1	105
71	25	171	196	1	106

Elem. Comb.	ASTM1018	PLACA 1	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
132	177	20	197	4	107
75	97	100	197	4	108
138	9	188	197	4	109
24	133	64	197	4	110
110	68	132	200	25	111
194	168	33	201	36	112
104	110	91	201	36	113
79	83	118	201	36	114
168	135	67	202	49	115
105	112	90	202	49	116
68	180	23	203	64	117
86	59	145	204	81	118
69	181	24	205	100	119
118	170	35	205	100	120
107	172	37	209	196	121
98	184	25	209	196	122
175	55	157	212	289	123
64	156	57	213	324	124
65	157	58	215	400	125
117	155	60	215	400	126
180	78	138	216	441	127
31	141	76	217	484	128
83	58	159	217	484	129
99	186	32	218	529	130
133	139	80	219	576	131
15	163	56	219	576	132
47	29	191	220	625	133
120	169	51	220	625	134
59	99	125	224	841	135
150	124	102	226	961	136
187	129	98	227	1024	137
167	152	75	227	1024	138
108	174	54	228	1089	139
42	160	69	229	1156	140
81	98	131	229	1156	141
111	101	130	231	1296	142
55	150	83	233	1444	143
113	60	175	235	1600	144
112	48	187	235	1600	145
54	52	183	235	1600	146
8	82	155	237	1764	147
73	185	52	237	1764	148
57	161	77	238	1849	149
149	147	97	244	2401	150
9	140	105	245	2500	151
48	71	174	245	2500	152
92	153	93	246	2601	153
44	146	101	247	2704	154
160	114	135	249	2916	155
135	80	169	249	2916	156
52	165	85	250	3025	157
190	164	88	252	3249	158
191	167	86	253	3364	159
46	81	172	253	3364	160

Elem. Comb.	ASTM1018	PLACA 1	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
128	72	182	254	3481	161
115	176	78	254	3481	162
116	159	96	255	3600	163
77	84	173	257	3844	164
189	171	87	258	3969	165
186	77	184	261	4356	166
170	138	124	262	4489	167
61	102	162	264	4761	168
74	96	170	266	5041	169
6	125	146	271	5776	170
172	148	137	285	8100	171
171	132	156	288	8649	172
80	123	166	289	8836	173
184	130	163	293	9604	174
60	144	150	294	9801	175
122	173	122	295	10000	176
62	145	154	299	10816	177
125	183	126	309	12996	178
124	182	128	310	13225	179
157	187	123	310	13225	180
3	131	181	312	13689	181
7	162	153	315	14400	182
100	188	129	317	14884	183
183	151	167	318	15129	184
182	142	180	322	16129	185
106	158	178	336	19881	186
123	178	177	355	25600	187
34	179	185	364	28561	188
35	191	179	370	30625	189
30	190	186	376	32761	190
39	189	189	378	33489	191
89	193	193	386	36481	192
152	194	192	386	36481	193
85	192	194	386	36481	194

	195	1005316
Promedio		Sumatoria

SR	195
S	1005316
k	2
n	194
W	<b>0,41</b>

**Tabla D. 10.** Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para la ASTM1018 y Placa 2.

Elem. Comb.	ASTM1018	PLACA 2	S <sub>Ri</sub>	(S <sub>Ri</sub> -SR) <sup>2</sup>	Ranking
161	37	2	39	24336	1
145	6	38	44	22801	2
158	44	6	50	21025	3
33	11	46	57	19044	4
138	9	50	59	18496	5
144	8	52	60	18225	6
143	10	51	61	17956	7
29	5	59	64	17161	8
155	57	9	66	16641	9
163	49	19	68	16129	10
71	25	45	70	15625	11
101	35	37	72	15129	12
139	30	47	77	13924	13
11	66	14	80	13225	14
56	21	65	86	11881	15
142	16	70	86	11881	16
76	65	24	89	11236	17
72	22	69	91	10816	18
2	14	80	94	10201	19
110	68	27	95	10000	20
140	53	43	96	9801	21
154	20	77	97	9604	22
136	13	86	99	9216	23
113	60	39	99	9216	24
49	19	81	100	9025	25
58	40	60	100	9025	26
74	96	5	101	8836	27
19	38	64	102	8649	28
128	72	31	103	8464	29
129	50	56	106	7921	30
75	97	10	107	7744	31
173	33	75	108	7569	32
181	17	91	108	7569	33
156	70	40	110	7225	34
1	15	97	112	6889	35
147	88	25	113	6724	36
4	45	68	113	6724	37
137	31	82	113	6724	38
146	32	83	115	6400	39
5	12	103	115	6400	40
151	113	3	116	6241	41
23	23	95	118	5929	42
38	106	13	119	5776	43
96	118	1	119	5776	44
20	26	93	119	5776	45
109	92	29	121	5476	46
127	91	30	121	5476	47
153	27	94	121	5476	48
175	55	66	121	5476	49
32	69	53	122	5329	50
174	39	84	123	5184	51
26	67	61	128	4489	52

Elem. Comb.	ASTM1018	PLACA 2	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
141	54	74	128	4489	53
179	41	88	129	4356	54
41	109	21	130	4225	55
51	47	85	132	3969	56
40	115	18	133	3844	57
70	24	109	133	3844	58
43	2	131	133	3844	59
27	4	129	133	3844	60
86	59	76	135	3600	61
66	105	34	139	3136	62
134	79	62	141	2916	63
180	78	63	141	2916	64
93	1	140	141	2916	65
193	107	35	142	2809	66
121	127	15	142	2809	67
84	46	96	142	2809	68
28	64	79	143	2704	69
114	94	49	143	2704	70
111	101	42	143	2704	71
192	103	41	144	2601	72
31	141	4	145	2500	73
133	139	7	146	2401	74
14	75	72	147	2304	75
97	119	28	147	2304	76
178	36	111	147	2304	77
160	114	33	147	2304	78
50	76	73	149	2116	79
8	82	67	149	2116	80
112	48	101	149	2116	81
162	128	23	151	1936	82
130	111	44	155	1600	83
37	100	57	157	1444	84
119	137	20	157	1444	85
166	89	71	160	1225	86
87	63	98	161	1156	87
10	154	8	162	1089	88
13	85	78	163	1024	89
63	143	22	165	900	90
67	134	32	166	841	91
83	58	112	170	625	92
65	157	16	173	484	93
64	156	17	173	484	94
91	3	170	173	484	95
95	7	169	176	361	96
188	18	158	176	361	97
36	120	58	178	289	98
21	42	136	178	289	99
126	87	99	186	81	100
131	175	12	187	64	101
25	34	159	193	4	102
194	168	26	194	1	103
12	43	151	194	1	104
98	184	11	195	0	105
186	77	119	196	1	106



Elem. Comb.	ASTM1018	PLACA 2	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
22	28	171	199	16	107
165	95	105	200	25	108
59	99	102	201	36	109
54	52	149	201	36	110
47	29	177	206	121	111
17	117	92	209	196	112
90	56	153	209	196	113
88	62	150	212	289	114
148	90	123	213	324	115
185	86	133	219	576	116
81	98	121	219	576	117
103	93	127	220	625	118
159	136	87	223	784	119
100	188	36	224	841	120
132	177	48	225	900	121
53	73	156	229	1156	122
94	61	168	229	1156	123
45	51	182	233	1444	124
68	180	54	234	1521	125
69	181	55	236	1681	126
82	121	116	237	1764	127
104	110	128	238	1849	128
177	126	114	240	2025	129
176	116	124	240	2025	130
135	80	161	241	2116	131
80	123	120	243	2304	132
48	71	173	244	2401	133
184	130	118	248	2809	134
78	74	174	248	2809	135
60	144	107	251	3136	136
7	162	89	251	3136	137
62	145	106	251	3136	138
170	138	117	255	3600	139
79	83	172	255	3600	140
16	166	90	256	3721	141
169	122	134	256	3721	142
46	81	176	257	3844	143
77	84	175	259	4096	144
18	108	152	260	4225	145
102	104	157	261	4356	146
164	149	113	262	4489	147
172	148	115	263	4624	148
117	155	110	265	4900	149
6	125	141	266	5041	150
182	142	125	267	5184	151
24	133	135	268	5329	152
150	124	144	268	5329	153
187	129	142	271	5776	154
183	151	122	273	6084	155
118	170	104	274	6241	156
3	131	143	274	6241	157
115	176	100	276	6561	158
105	112	164	276	6561	159
107	172	108	280	7225	160

Elem. Comb.	ASTM1018	PLACA 2	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
168	135	145	280	7225	161
149	147	137	284	7921	162
116	159	126	285	8100	163
9	140	146	286	8281	164
167	152	139	291	9216	165
61	102	190	292	9409	166
44	146	148	294	9801	167
42	160	138	298	10609	168
108	174	130	304	11881	169
55	150	155	305	12100	170
122	173	132	305	12100	171
15	163	147	310	13225	172
171	132	181	313	13924	173
92	153	167	320	15625	174
191	167	154	321	15876	175
106	158	165	323	16384	176
190	164	160	324	16641	177
52	165	163	328	17689	178
189	171	162	333	19044	179
57	161	189	350	24025	180
99	186	166	352	24649	181
123	178	179	357	26244	182
124	182	178	360	27225	183
120	169	193	362	27889	184
125	183	180	363	28224	185
34	179	184	363	28224	186
157	187	183	370	30625	187
39	189	185	374	32041	188
73	185	191	376	32761	189
30	190	187	377	33124	190
35	191	188	379	33856	191
89	193	186	379	33856	192
85	192	192	384	35721	193
152	194	194	388	37249	194

	195	1489074
Promedio		Sumatoria

SR	195
S	1489074
k	2
n	194
W	<b>0,61</b>

Tabla D. 11. Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para la EN14651 y Placa 1.

Elem. Comb.	EN14651	PLACA 1	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
36	2	12	14	32761	1
14	11	8	19	30976	2
50	12	9	21	30276	3
13	16	5	21	30276	4
132	6	20	26	28561	5
134	13	14	27	28224	6
97	3	29	32	26569	7
130	8	26	34	25921	8
32	17	19	36	25281	9
107	1	37	38	24649	10
194	7	33	40	24025	11
28	33	10	43	23104	12
16	30	13	43	23104	13
67	15	31	46	22201	14
109	10	39	49	21316	15
192	21	30	51	20736	16
37	41	11	52	20449	17
95	46	6	52	20449	18
118	18	35	53	20164	19
69	31	24	55	19600	20
117	4	60	64	17161	21
119	23	42	65	16900	22
15	9	56	65	16900	23
63	25	46	71	15376	24
129	54	18	72	15129	25
40	24	48	72	15129	26
66	45	34	79	13456	27
108	26	54	80	13225	28
65	27	58	85	12100	29
177	51	40	91	10816	30
193	71	22	93	10404	31
176	34	62	96	9801	32
41	48	50	98	9409	33
147	42	59	101	8836	34
17	80	21	101	8836	35
189	14	87	101	8836	36
190	22	88	110	7225	37
82	49	63	112	6889	38
191	29	86	115	6400	39
136	5	111	116	6241	40
52	32	85	117	6084	41
165	89	36	125	4900	42
127	35	92	127	4624	43
53	43	84	127	4624	44
140	121	7	128	4489	45
104	37	91	128	4489	46
25	127	2	129	4356	47
42	60	69	129	4356	48
168	65	67	132	3969	49
68	110	23	133	3844	50
169	61	72	133	3844	51
121	90	44	134	3721	52

Elem. Comb.	EN14651	PLACA 1	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
38	94	47	141	2916	53
115	63	78	141	2916	54
178	98	45	143	2704	55
166	105	38	143	2704	56
105	53	90	143	2704	57
26	149	3	152	1849	58
4	19	134	153	1764	59
160	20	135	155	1600	60
29	154	4	158	1369	61
170	38	124	162	1089	62
164	135	27	162	1089	63
159	146	17	163	1024	64
187	66	98	164	961	65
114	88	79	167	784	66
49	104	66	170	625	67
96	170	1	171	576	68
24	108	64	172	529	69
2	67	108	175	400	70
98	150	25	175	400	71
167	100	75	175	400	72
44	74	101	175	400	73
110	44	132	176	361	74
131	161	15	176	361	75
84	69	110	179	256	76
10	163	16	179	256	77
94	52	127	179	256	78
20	39	141	180	225	79
111	50	130	180	225	80
18	107	73	180	225	81
153	40	142	182	169	82
103	102	81	183	144	83
116	87	96	183	144	84
163	92	95	187	64	85
173	78	113	191	16	86
171	36	156	192	9	87
70	72	121	193	4	88
21	119	74	193	4	89
148	128	65	193	4	90
162	152	43	195	0	91
155	96	103	199	16	92
11	84	115	199	16	93
126	171	28	199	16	94
72	81	119	200	25	95
86	55	145	200	25	96
12	145	55	200	25	97
179	62	140	202	49	98
88	131	71	202	49	99
87	143	61	204	81	100
101	85	120	205	100	101
64	148	57	205	100	102
161	165	41	206	121	103
185	138	68	206	121	104
60	56	150	206	121	105
55	123	83	206	121	106

Elem. Comb.	EN14651	PLACA 1	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
106	28	178	206	121	107
180	70	138	208	169	108
184	47	163	210	225	109
151	160	53	213	324	110
133	134	80	214	361	111
99	182	32	214	361	112
125	91	126	217	484	113
150	116	102	218	529	114
51	82	139	221	676	115
137	75	148	223	784	116
78	106	117	223	784	117
146	76	149	225	900	118
141	117	109	226	961	119
31	151	76	227	1024	120
1	122	106	228	1089	121
135	59	169	228	1089	122
46	57	172	229	1156	123
19	83	147	230	1225	124
92	137	93	230	1225	125
23	68	165	233	1444	126
9	130	105	235	1600	127
156	187	49	236	1681	128
175	79	157	236	1681	129
144	126	112	238	1849	130
100	109	129	238	1849	131
73	186	52	238	1849	132
120	188	51	239	1936	133
43	64	176	240	2025	134
56	99	143	242	2209	135
183	77	167	244	2401	136
143	133	114	247	2704	137
93	58	190	248	2809	138
90	180	70	250	3025	139
142	118	133	251	3136	140
57	174	77	251	3136	141
139	136	116	252	3249	142
75	155	100	255	3600	143
145	95	161	256	3721	144
174	120	136	256	3721	145
81	125	131	256	3721	146
158	159	99	258	3969	147
34	73	185	258	3969	148
76	156	104	260	4225	149
45	153	107	260	4225	150
33	93	168	261	4356	151
8	111	155	266	5041	152
74	97	170	267	5184	153
188	185	82	267	5184	154
59	142	125	267	5184	155
128	86	182	268	5329	156
83	113	159	272	5929	157
102	184	89	273	6084	158
77	103	173	276	6561	159
149	179	97	276	6561	160

Elem. Comb.	EN14651	PLACA 1	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
80	114	166	280	7225	161
27	124	160	284	7921	162
71	115	171	286	8281	163
6	140	146	286	8281	164
79	169	118	287	8464	165
91	194	94	288	8649	166
122	167	122	289	8836	167
5	141	151	292	9409	168
47	101	191	292	9409	169
182	112	180	292	9409	170
7	144	153	297	10404	171
124	173	128	301	11236	172
22	139	164	303	11664	173
181	162	144	306	12321	174
58	157	152	309	12996	175
186	129	184	313	13924	176
172	177	137	314	14161	177
157	191	123	314	14161	178
154	158	158	316	14641	179
138	132	188	320	15625	180
113	147	175	322	16129	181
61	164	162	326	17161	182
62	176	154	330	18225	183
48	166	174	340	21025	184
123	172	177	349	23716	185
112	168	187	355	25600	186
3	181	181	362	27889	187
54	183	183	366	29241	188
152	175	192	367	29584	189
35	189	179	368	29929	190
89	178	193	371	30976	191
30	190	186	376	32761	192
39	192	189	381	34596	193
85	193	194	387	36864	194

	195	1542870
Promedio		Sumatoria

SR	195
S	1542870
k	2
n	194
W	<b>0,63</b>

**Tabla D. 12.** Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para la EN14651 y Placa 2.

Elem. Comb.	EN14651	PLACA 2	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
97	3	28	31	26896	1
194	7	26	33	26244	2
109	10	29	39	24336	3
40	24	18	42	23409	4
119	23	20	43	23104	5
65	27	16	43	23104	6
67	15	32	47	21904	7
63	25	22	47	21904	8
130	8	44	52	20449	9
160	20	33	53	20164	10
132	6	48	54	19881	11
36	2	58	60	18225	12
192	21	41	62	17689	13
127	35	30	65	16900	14
147	42	25	67	16384	15
41	48	21	69	15876	16
32	17	53	70	15625	17
110	44	27	71	15376	18
134	13	62	75	14400	19
66	45	34	79	13456	20
14	11	72	83	12544	21
50	12	73	85	12100	22
69	31	55	86	11881	23
4	19	68	87	11664	24
136	5	86	91	10816	25
111	50	42	92	10609	26
13	16	78	94	10201	27
37	41	57	98	9409	28
11	84	14	98	9409	29
74	97	5	102	8649	30
155	96	9	105	8100	31
121	90	15	105	8100	32
193	71	35	106	7921	33
38	94	13	107	7744	34
107	1	108	109	7396	35
129	54	56	110	7225	36
163	92	19	111	7056	37
28	33	79	112	6889	38
117	4	110	114	6561	39
128	86	31	117	6084	40
16	30	90	120	5625	41
101	85	37	122	5329	42
118	18	104	122	5329	43
86	55	76	131	4096	44
20	39	93	132	3969	45
145	95	38	133	3844	46
180	70	63	133	3844	47
153	40	94	134	3721	48
114	88	49	137	3364	49
33	93	46	139	3136	50
133	134	7	141	2916	51
175	79	66	145	2500	52

Elem. Comb.	EN14651	PLACA 2	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
100	109	36	145	2500	53
2	67	80	147	2304	54
19	83	64	147	2304	55
72	81	69	150	2025	56
179	62	88	150	2025	57
173	78	75	153	1764	58
31	151	4	155	1600	59
170	38	117	155	1600	60
15	9	147	156	1521	61
108	26	130	156	1521	62
137	75	82	157	1444	63
176	34	124	158	1369	64
146	76	83	159	1296	65
71	115	45	160	1225	66
98	150	11	161	1156	67
151	160	3	163	1024	68
23	68	95	163	1024	69
115	63	100	163	1024	70
60	56	107	163	1024	71
140	121	43	164	961	72
56	99	65	164	961	73
68	110	54	164	961	74
158	159	6	165	900	75
84	69	96	165	900	76
177	51	114	165	900	77
82	49	116	165	900	78
75	155	10	165	900	79
104	37	128	165	900	80
64	148	17	165	900	81
184	47	118	165	900	82
161	165	2	167	784	83
51	82	85	167	784	84
96	170	1	171	576	85
10	163	8	171	576	86
17	80	92	172	529	87
131	161	12	173	484	88
162	152	23	175	400	89
166	105	71	176	361	90
189	14	162	176	361	91
144	126	52	178	289	92
8	111	67	178	289	93
76	156	24	180	225	94
70	72	109	181	196	95
138	132	50	182	169	96
190	22	160	182	169	97
139	136	47	183	144	98
191	29	154	183	144	99
143	133	51	184	121	100
49	104	81	185	100	101
113	147	39	186	81	102
142	118	70	188	49	103
141	117	74	191	16	104
106	28	165	193	4	105
165	89	105	194	1	106



Elem. Comb.	EN14651	PLACA 2	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
43	64	131	195	0	107
169	61	134	195	0	108
52	32	163	195	0	109
93	58	140	198	9	110
42	60	138	198	9	111
53	43	156	199	16	112
183	77	122	199	16	113
174	120	84	204	81	114
187	66	142	208	169	115
178	98	111	209	196	116
26	149	61	210	225	117
168	65	145	210	225	118
29	154	59	213	324	119
116	87	126	213	324	120
95	46	169	215	400	121
58	157	60	217	484	122
105	53	164	217	484	123
171	36	181	217	484	124
1	122	97	219	576	125
94	52	168	220	625	126
135	59	161	220	625	127
44	74	148	222	729	128
83	113	112	225	900	129
156	187	40	227	1024	130
103	102	127	229	1156	131
159	146	87	233	1444	132
46	57	176	233	1444	133
7	144	89	233	1444	134
80	114	120	234	1521	135
154	158	77	235	1600	136
182	112	125	237	1764	137
167	100	139	239	1936	138
87	143	98	241	2116	139
24	108	135	243	2304	140
5	141	103	244	2401	141
59	142	102	244	2401	142
81	125	121	246	2601	143
164	135	113	248	2809	144
186	129	119	248	2809	145
148	128	123	251	3136	146
181	162	91	253	3364	147
27	124	129	253	3364	148
21	119	136	255	3600	149
34	73	184	257	3844	150
18	107	152	259	4096	151
150	116	144	260	4225	152
112	168	101	269	5476	153
126	171	99	270	5625	154
185	138	133	271	5776	155
125	91	180	271	5776	156
9	130	146	276	6561	157
47	101	177	278	6889	158
55	123	155	278	6889	159
77	103	175	278	6889	160

Elem. Comb.	EN14651	PLACA 2	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
78	106	174	280	7225	161
88	131	150	281	7396	162
6	140	141	281	7396	163
62	176	106	282	7569	164
25	127	159	286	8281	165
172	177	115	292	9409	166
12	145	151	296	10201	167
122	167	132	299	10816	168
92	137	167	304	11881	169
22	139	171	310	13225	170
149	179	137	316	14641	171
3	181	143	324	16641	172
54	183	149	332	18769	173
90	180	153	333	19044	174
45	153	182	335	19600	175
48	166	173	339	20736	176
102	184	157	341	21316	177
79	169	172	341	21316	178
188	185	158	343	21904	179
99	182	166	348	23409	180
124	173	178	351	24336	181
123	172	179	351	24336	182
61	164	190	354	25281	183
57	174	189	363	28224	184
91	194	170	364	28561	185
89	178	186	364	28561	186
152	175	194	369	30276	187
157	191	183	374	32041	188
73	186	191	377	33124	189
35	189	188	377	33124	190
30	190	187	377	33124	191
39	192	185	377	33124	192
120	188	193	381	34596	193
85	193	192	385	36100	194

	195	1498810
Promedio		Sumatoria

SR	195
S	1498810
k	2
n	194
W	<b>0,62</b>

**Tabla D. 13.** Cálculo del coeficiente de Kendall (W) para la EN14651 y las Placas 1 y 2.

Elem. Comb.	EN14651	PLACA 1	PLACA 2	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
96	170	1	1	172	14520,25	1
161	165	41	2	208	7140,25	2
151	160	53	3	216	5852,25	3
31	151	76	4	231	3782,25	4
74	97	170	5	272	420,25	5
158	159	99	6	264	812,25	6
133	134	80	7	221	5112,25	7
10	163	16	8	187	11130,25	8
155	96	103	9	208	7140,25	9
75	155	100	10	265	756,25	10
98	150	25	11	186	11342,25	11
131	161	15	12	188	10920,25	12
38	94	47	13	154	19182,25	13
11	84	115	14	213	6320,25	14
121	90	44	15	149	20592,25	15
65	27	58	16	101	36672,25	16
64	148	57	17	222	4970,25	17
40	24	48	18	90	41006,25	18
163	92	95	19	206	7482,25	19
119	23	42	20	85	43056,25	20
41	48	50	21	119	30102,25	21
63	25	46	22	93	39800,25	22
162	152	43	23	218	5550,25	23
76	156	104	24	284	72,25	24
147	42	59	25	126	27722,25	25
194	7	33	26	66	51302,25	26
110	44	132	27	203	8010,25	27
97	3	29	28	60	54056,25	28
109	10	39	29	78	46010,25	29
127	35	92	30	157	18360,25	30
128	86	182	31	299	42,25	31
67	15	31	32	78	46010,25	32
160	20	135	33	188	10920,25	33
66	45	34	34	113	32220,25	34
193	71	22	35	128	27060,25	35
100	109	129	36	274	342,25	36
101	85	120	37	242	2550,25	37
145	95	161	38	294	2,25	38
113	147	175	39	361	4692,25	39
156	187	49	40	276	272,25	40
192	21	30	41	92	40200,25	41
111	50	130	42	222	4970,25	42
140	121	7	43	171	14762,25	43
130	8	26	44	78	46010,25	44
71	115	171	45	331	1482,25	45
33	93	168	46	307	210,25	46
139	136	116	47	299	42,25	47
132	6	20	48	74	47742,25	48
114	88	79	49	216	5852,25	49
138	132	188	50	370	6006,25	50
143	133	114	51	298	30,25	51
144	126	112	52	290	6,25	52

Elem. Comb.	EN14651	PLACA 1	PLACA 2	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
32	17	19	53	89	41412,25	53
68	110	23	54	187	11130,25	54
69	31	24	55	110	33306,25	55
129	54	18	56	128	27060,25	56
37	41	11	57	109	33672,25	57
36	2	12	58	72	48620,25	58
29	154	4	59	217	5700,25	59
58	157	152	60	369	5852,25	60
26	149	3	61	213	6320,25	61
134	13	14	62	89	41412,25	62
180	70	138	63	271	462,25	63
19	83	147	64	294	2,25	64
56	99	143	65	307	210,25	65
175	79	157	66	302	90,25	66
8	111	155	67	333	1640,25	67
4	19	134	68	221	5112,25	68
72	81	119	69	269	552,25	69
142	118	133	70	321	812,25	70
166	105	38	71	214	6162,25	71
14	11	8	72	91	40602,25	72
50	12	9	73	94	39402,25	73
141	117	109	74	300	56,25	74
173	78	113	75	266	702,25	75
86	55	145	76	276	272,25	76
154	158	158	77	393	10100,25	77
13	16	5	78	99	37442,25	78
28	33	10	79	122	29070,25	79
2	67	108	80	255	1406,25	80
49	104	66	81	251	1722,25	81
137	75	148	82	305	156,25	82
146	76	149	83	308	240,25	83
174	120	136	84	340	2256,25	84
51	82	139	85	306	182,25	85
136	5	111	86	202	8190,25	86
159	146	17	87	250	1806,25	87
179	62	140	88	290	6,25	88
7	144	153	89	386	8742,25	89
16	30	13	90	133	25440,25	90
181	162	144	91	397	10920,25	91
17	80	21	92	193	9900,25	92
20	39	141	93	273	380,25	93
153	40	142	94	276	272,25	94
23	68	165	95	328	1260,25	95
84	69	110	96	275	306,25	96
1	122	106	97	325	1056,25	97
87	143	61	98	302	90,25	98
126	171	28	99	298	30,25	99
115	63	78	100	241	2652,25	100
112	168	187	101	456	26732,25	101
59	142	125	102	369	5852,25	102
5	141	151	103	395	10506,25	103
118	18	35	104	157	18360,25	104
165	89	36	105	230	3906,25	105
62	176	154	106	436	20592,25	106

Elem. Comb.	EN14651	PLACA 1	PLACA 2	SRI	(SRI-SR)^2	Ranking
60	56	150	107	313	420,25	107
107	1	37	108	146	21462,25	108
70	72	121	109	302	90,25	109
117	4	60	110	174	14042,25	110
178	98	45	111	254	1482,25	111
83	113	159	112	384	8372,25	112
164	135	27	113	275	306,25	113
177	51	40	114	205	7656,25	114
172	177	137	115	429	18632,25	115
82	49	63	116	228	4160,25	116
170	38	124	117	279	182,25	117
184	47	163	118	328	1260,25	118
186	129	184	119	432	19460,25	119
80	114	166	120	400	11556,25	120
81	125	131	121	377	7140,25	121
183	77	167	122	366	5402,25	122
148	128	65	123	316	552,25	123
176	34	62	124	220	5256,25	124
182	112	180	125	417	15500,25	125
116	87	96	126	309	272,25	126
103	102	81	127	310	306,25	127
104	37	91	128	256	1332,25	128
27	124	160	129	413	14520,25	129
108	26	54	130	210	6806,25	130
43	64	176	131	371	6162,25	131
122	167	122	132	421	16512,25	132
185	138	68	133	339	2162,25	133
169	61	72	134	267	650,25	134
24	108	64	135	307	210,25	135
21	119	74	136	329	1332,25	136
149	179	97	137	413	14520,25	137
42	60	69	138	267	650,25	138
167	100	75	139	314	462,25	139
93	58	190	140	388	9120,25	140
6	140	146	141	427	18090,25	141
187	66	98	142	306	182,25	142
3	181	181	143	505	45156,25	143
150	116	102	144	362	4830,25	144
168	65	67	145	277	240,25	145
9	130	105	146	381	7832,25	146
15	9	56	147	212	6480,25	147
44	74	101	148	323	930,25	148
54	183	183	149	515	49506,25	149
88	131	71	150	352	3540,25	150
12	145	55	151	351	3422,25	151
18	107	73	152	332	1560,25	152
90	180	70	153	403	12210,25	153
191	29	86	154	269	552,25	154
55	123	83	155	361	4692,25	155
53	43	84	156	283	90,25	156
102	184	89	157	430	18906,25	157
188	185	82	158	425	17556,25	158
25	127	2	159	288	20,25	159
190	22	88	160	270	506,25	160

Elem. Comb.	EN14651	PLACA 1	PLACA 2	SRi	(SRi-SR)^2	Ranking
135	59	169	161	389	9312,25	161
189	14	87	162	263	870,25	162
52	32	85	163	280	156,25	163
105	53	90	164	307	210,25	164
106	28	178	165	371	6162,25	165
99	182	32	166	380	7656,25	166
92	137	93	167	397	10920,25	167
94	52	127	168	347	2970,25	168
95	46	6	169	221	5112,25	169
91	194	94	170	458	27390,25	170
22	139	164	171	474	32942,25	171
79	169	118	172	459	27722,25	172
48	166	174	173	513	48620,25	173
78	106	117	174	397	10920,25	174
77	103	173	175	451	25122,25	175
46	57	172	176	405	12656,25	176
47	101	191	177	469	31152,25	177
124	173	128	178	479	34782,25	178
123	172	177	179	528	55460,25	179
125	91	126	180	397	10920,25	180
171	36	156	181	373	6480,25	181
45	153	107	182	442	22350,25	182
157	191	123	183	497	41820,25	183
34	73	185	184	442	22350,25	184
39	192	189	185	566	74802,25	185
89	178	193	186	557	69960,25	186
30	190	186	187	563	73170,25	187
35	189	179	188	556	69432,25	188
57	174	77	189	440	21756,25	189
61	164	162	190	516	49952,25	190
73	186	52	191	429	18632,25	191
85	193	194	192	579	82082,25	192
120	188	51	193	432	19460,25	193
152	175	192	194	561	72092,25	194

292,5	2840430,5
Promedio	Sumatoria

SR	292,5
S	2840431
k	3
n	194
W	<b>0,52</b>

**Tabla D.14.** Valores de Dc experimentales para los hormigones HI, HA y HB, EN14651.

	Tramo 0-0,5			Tramo 0,5-1			Tramo 1-1,5			Tramo 1,5-2,5			Tramo 2,5-3,5			Criterio de selección		
	A <sub>Acum</sub> 0-0,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-0,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0,5-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-1,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1,5-2,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-3,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2,5-3,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)
EN14651 Media HI	10,51	10,51		24,14	13,63		37,86	13,72		63,07	25,21		84,26	21,19				
EN14651 HI1	9,74	9,74	7,33	22,35	12,61	7,48	35,28	12,93	5,76	59,80	24,52	2,74	80,90	21,10	0,42	1,12	1,12	1,12
EN14651 HI2	11,27	11,27	7,23	25,92	14,65	7,48	40,43	14,51	5,76	66,33	25,90	2,74	87,62	21,29	0,47	1,12	1,12	1,12

	Tramo 0-0,5			Tramo 0,5-1			Tramo 1-1,5			Tramo 1,5-2,5			Tramo 2,5-3,5			Criterio de selección		
	A <sub>Acum</sub> 0-0,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-0,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0,5-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-1,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1,5-2,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-3,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2,5-3,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)
EN14651 Media HA	10,79	10,79		25,03	14,24		38,91	13,88		62,18	23,27		82,11	19,93				
EN14651 HA1	11,28	11,28	4,54	26,60	15,32	7,58	41,94	15,34	10,52	67,24	25,30	8,72	88,30	21,06	5,67	1,51	1,51	1,51
EN14651 HA2	9,92	9,92	8,06	22,57	12,65	11,17	34,90	12,33	11,17	56,28	21,38	8,12	74,43	18,15	8,93	1,94	1,94	1,94
EN14651 HA3	11,16	11,16	3,43	25,93	14,77	3,72	39,88	13,95	0,50	63,02	23,14	0,56	83,61	20,59	3,31	0,47	0,47	0,47

	Tramo 0-0,5			Tramo 0,5-1			Tramo 1-1,5			Tramo 1,5-2,5			Tramo 2,5-3,5			Criterio de selección		
	A <sub>Acum</sub> 0-0,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-0,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0,5-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-1,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1,5-2,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-3,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2,5-3,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)
EN14651 Media HB	5,61	5,61		11,29	5,68		17,44	6,15		30,21	12,77		42,84	12,63				
EN14651 HB1	5,91	5,91	5,35	10,76	4,85	14,61	15,56	4,80	21,95	25,27	9,71	23,96	34,68	9,41	25,49	3,32	3,32	3,32
EN14651 HB2	5,33	5,33	4,99	11,07	5,74	1,06	17,25	6,18	0,49	29,85	12,60	1,33	42,17	12,32	2,45	0,42	0,42	0,42
EN14651 HB3	5,6	5,60	0,18	12,05	6,45	13,56	19,50	7,45	21,14	35,51	16,01	25,37	51,68	16,17	28,03	3,07	3,07	3,07

**Tabla D.15.** Valores de Dc experimentales para los hormigones HI, HA y HB, ASTM1018.

	Tramo 0-0,5			Tramo 0,5-1			Tramo 1-1,5			Tramo 1,5-2			Tramo 2-2,5			Criterio de selección		
	A <sub>Acum</sub> 0-0,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-0,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0,5-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-1,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1,5-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-2,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)
ASTM10108 Media HI	11,97	11,97		24,93	12,96		36,73	11,80		47,60	10,87		57,56	9,96				
ASTM1018HI1	10,24	10,24	14,49	21,70	11,46	11,55	31,58	9,88	16,29	40,35	8,77	19,29				3,29	2,63	6,42
ASTM1018HI2	11,45	11,45	4,38	25,78	14,33	10,60	40,27	14,49	22,77	60,65	20,38	87,56	83,96	23,31	133,98	6,18	6,18	6,18
ASTM1018HI3	13,30	13,30	11,07	27,10	13,80	6,51	41,42	14,32	21,33	48,99	7,57	30,33				3,20	2,56	6,25
ASTM1018HI4	12,90	12,90	7,73	25,15	12,25	5,45	33,65	8,50	27,98	40,40	6,75	37,88				3,36	2,69	6,57

	Tramo 0-0,5			Tramo 0,5-1			Tramo 1-1,5			Tramo 1,5-2			Tramo 2-2,5			Criterio de selección		
	A <sub>Acum</sub> 0-0,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-0,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0,5-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-1,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1,5-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-2,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)
ASTM10108 Media HA	18,89	18,89		38,71	19,82		58,29	19,58		76,19	17,90		92,08	15,89				
ASTM1018HA1	16,13	16,13	14,61	30,39	14,26	28,05	43,58	13,19	32,64	55,92	12,34	31,06	67,36	11,44	28,01	4,91	4,91	4,91
ASTM1018HA2	20,30	20,30	7,46	42,25	21,95	10,75	64,13	21,88	11,75	86,09	21,96	22,68	103,67	17,58	10,64	2,20	2,20	2,20
ASTM1018HA3	19,86	19,86	5,13	41,48	21,62	9,08	65,27	23,79	21,50	86,61	21,34	19,22	105,58	18,97	19,38	2,45	2,45	2,45
ASTM1018HA4	19,27	19,27	2,01	40,73	21,46	8,27	60,17	19,44	0,72	76,12	15,95	10,89	91,70	15,58	1,95	0,84	0,84	0,84

	Tramo 0-0,5			Tramo 0,5-1			Tramo 1-1,5			Tramo 1,5-2			Tramo 2-2,5			Criterio de selección		
	A <sub>Acum</sub> 0-0,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-0,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0,5-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-1,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-1,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1,5-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 0-2,5 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-2,5 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)
ASTM10108 Media HB	9,43	9,43		19,66	10,23		30,09	10,43		40,30	10,21		51,28	10,98				
ASTM1018HB1	8,50	8,50	9,86	17,82	9,32	8,90	27,40	9,58	8,15	36,74	9,34	8,52	46,35	9,61	12,48	1,88	1,88	1,88
ASTM1018HB2	9,96	9,96	5,62	21,58	11,62	13,59	33,03	11,45	9,78	44,63	11,60	13,61	56,89	12,26	11,66	1,97	1,97	1,97
ASTM1018HB3	9,29	9,29	1,48	18,20	8,91	12,90	27,80	9,60	7,96	37,74	9,94	2,64	48,18	10,44	4,92	1,22	1,22	1,22
ASTM1018HB4	9,98	9,98	5,83	21,02	11,04	7,92	32,12	11,10	6,42	42,08	9,96	2,45	53,68	11,60	5,65	1,22	1,22	1,22



**Tabla D.16.** Valores de Dc experimentales para los hormigones HA y HB, Placa 1.

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterio de selección		
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)
Placa 1 Media HA	15,75	15,75		39,09	23,34		89,47	50,38		140,59	51,12		190,76	50,17		238,15	47,39				
Placa 1 HA1	14,92	14,92	5,27	35,20	20,28	13,11	78,92	43,72	13,22	123,91	44,99	11,99	169,67	45,76	8,79	214,70	45,03	4,98	1,72	1,72	1,72
Placa 1 HA2	16,57	16,57	5,21	42,97	26,40	13,11	100,02	57,05	13,24	157,26	57,24	11,97	211,84	54,58	8,79	261,60	49,76	5,00	1,72	1,72	1,72

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterio de selección		
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)
Placa 1 Media HB	11,98	11,98		29,84	17,86		63,46	33,62		96,81	33,35		129,56	32,75		161,93	32,37				
Placa 1 HB1	11,73	11,73	2,09	27,32	15,59	12,71	56,19	28,87	14,13	85,14	28,95	13,19	113,73	28,59	12,70	142,24	28,51	11,92	1,73	1,73	1,73
Placa 1 HB2	12,22	12,22	2,00	32,36	20,14	12,77	70,73	38,37	14,13	108,48	37,75	13,19	145,39	36,91	12,70	181,62	36,23	11,92	1,73	1,73	1,73

**Tabla D.17.** Valores de Dc experimentales para los hormigones HA y HB, captador 2, Placa 2.

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterio de selección		
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)
Placa 2 Media HA CAPT.2	19,99	19,99		51,24	31,25		111,34	60,1		166,61	55,27		213,44	46,83		255,55	42,11				
Placa 2 HA1	22,45	22,45	12,31	51,79	29,34	6,11	109,18	57,39	4,51	165,51	56,33	1,92	219,20	53,69	14,65	269,96	50,76	20,54	1,27	1,27	1,27
Placa 2 HA2	17,53	17,53	12,31	50,68	33,15	6,08	113,49	62,81	4,51	167,71	54,22	1,90	207,68	39,97	14,65	241,14	33,46	20,54	1,27	1,27	1,27

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterio de selección		
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)
Placa 2 Media HB CAPT.2	19,69	19,69		45,63	25,94		88,88	43,25		128,32	39,44		167,07	38,75		205,06	37,99				
Placa 2 HB1	21,18	21,18	7,57	49,91	28,73	10,76	95,34	45,43	5,04	135,91	40,57	2,87	174,80	38,89	0,36	212,86	38,06	0,18	1,03	1,03	1,03
Placa 2 HB2	18,19	18,19	7,62	41,35	23,16	10,72	82,42	41,07	5,04	120,73	38,31	2,87	159,33	38,60	0,39	197,26	37,93	0,16	1,03	1,03	1,03

**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.

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterio de selección		
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)
Placa 1																					
Media HI	15,13	15,13		38,45	23,32		83,98	45,53		128,64	44,66		171,48	42,84		212,87	41,38				
C96 HI	14,96	14,96	1,09	34,70	19,74	15,37	79,65	44,96	1,26	133,76	54,11	21,14	192,03	58,27	36,01	253,59	61,56	48,76	2,14	2,14	2,14
C123 HI (55%)	18,53	18,53	22,50	42,12	23,59	1,15	86,46	44,34	2,62	133,40	46,94	5,09	182,57	49,18	14,79	233,03	50,46	21,93	1,55	1,55	1,55

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterio de selección		
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)
Placa 1																					
Media HA	15,75	15,75		39,09	23,34		89,47	50,38		140,59	51,12		190,76	50,17		238,15	47,39				
C96 HA	15,72	15,72	0,16	39,82	24,09	3,22	89,05	49,24	2,27	146,45	57,40	12,28							0,94	0,63	3,17
C123 HA (55%)	19,77	19,77	25,50	46,28	26,51	13,60	96,80	50,52	0,28	148,24	51,44	0,63	201,89	53,64	6,92	256,18	54,29	14,57	1,84	1,84	1,84

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterio de selección		
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)
Placa 1																					
Media HB	11,98	11,98		29,84	17,86		63,46	33,62		96,81	33,35		129,56	32,75		161,93	32,37				
C96 HB	11,44	11,44	4,51	26,38	14,94	16,35	55,09	28,71	14,61	88,84	33,75	1,20	125,88	37,04	13,10	165,46	39,58	22,28	1,69	1,69	1,69
C123 HB (55%)	12,28	12,28	2,53	27,60	15,32	14,23	57,25	29,65	11,82	86,87	29,62	11,17	118,43	31,56	3,64	151,70	33,27	2,77	1,52	1,52	1,52

**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.

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterio de selección		
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)
Placa 2 Media HI CAPT.2	18,92	18,92		46,38	27,46		102,09	55,71		156,53	54,44		210,73	54,2		259,18	48,45				
C96 HI	17,99	17,99	4,89	38,38	20,38	25,77	88,10	49,72	10,76										3,87	5,15	2,17
C123 HI (55%)	26,15	26,15	38,22	54,80	28,65	4,34	117,92	63,12	13,30										3,27	3,27	3,27

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterio de selección		
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)
Placa 2 Media HA CAPT.2	19,99	19,99		51,24	31,25		111,34	60,1		166,61	55,27		213,44	46,83		255,55	42,11				
C96 HA	21,51	21,51	7,62	51,21	29,69	4,98	119,14	67,93	13,03										1,92	0,96	15,35
C123 HA (55%)	28,86	28,86	44,39	60,95	32,09	2,69	129,30	68,35	13,72	200,34	71,04	28,54	273,24	72,90	55,66	347,43	74,19	76,18	4,47	4,47	4,47

	Tramo 0-1			Tramo 1-2			Tramo 2-4			Tramo 4-6			Tramo 6-8			Tramo 8-10			Criterio de selección		
	A <sub>Acum</sub> 0-1 (J)	A <sub>Tramo</sub> 0-1 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 1-2 (J)	A <sub>Tramo</sub> 1-2 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 2-4 (J)	A <sub>Tramo</sub> 2-4 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 4-6 (J)	A <sub>Tramo</sub> 4-6 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 6-8 (J)	A <sub>Tramo</sub> 6-8 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	A <sub>Acum</sub> 8-10 (J)	A <sub>Tramo</sub> 8-10 (J)	Dif <sub>Num-Exp</sub> (%)	D1 (%)	D2 (%)	Dc (%)
Placa 2 Media HB CAPT.2	19,69	19,69		45,63	25,94		88,88	43,25		128,32	39,44		167,07	38,75		205,06	37,99				
C96 HB	14,98	14,98	23,90	37,04	22,06	14,97	82,34	45,30	4,75	131,30	48,95	24,12	182,81	51,51	32,93	237,49	54,68	43,93	3,22	3,22	3,22
C123 HB (55%)	16,41	16,41	16,66	33,16	16,75	35,43	70,26	37,10	14,22	111,11	40,85	3,58	153,56	42,44	9,54	197,73	44,18	16,28	2,98	2,98	2,98

