

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Industrial (98)

**INFLUENCIA DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN A
ALTAS TEMPERATURAS SOBRE EL
COMPORTAMIENTO EN FRACTURA DE H.A.C.
DE ALTA RESISTENCIA REFORZADOS CON
FIBRAS.**

Autor: Ana Alba Cruz

Tutores: Héctor Cifuentes Bulté,
Carlos Leiva Fernández.

**Grupo de Estructuras
Dep. Teoría de Mecánica de Medios Continuos y
Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2015



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de Industrial (98)

INFLUENCIA DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN A ALTAS TEMPERATURAS SOBRE EL COMPORTAMIENTO EN FRACTURA DE H.A.C. DE ALTA RESISTENCIA REFORZADOS CON FIBRAS.

Autor:

Ana Alba Cruz

Tutores:

Héctor Cifuentes Bulté

Carlos Leiva Fernández

Grupo de Estructuras

Dep. Teoría de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

SOBRE EL COMPORTAMIENTO EN FRACTURA DE H.A.C. DE ALTA RESISTENCIA REFORZADOS
CON FIBRAS.

Autor: Ana Alba Cruz

Tutor: Héctor Cifuentes Bulté

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal

A mis padres, Juan y Ana, por permitirme ser quien soy, por caminar a mi lado y formar parte de mis sueños.

A mi hermano, Juan, por su sonrisa cómplice.

A mi tutor, Héctor, por su profesionalidad y cercanía.

A Emilio, jefe de taller del laboratorio de Estructuras, por su ayuda y hacer que las horas de laboratorio sean agradables.

Hacer especial mención a Eduardo, irremplazable compañero de trabajo durante la realización del proyecto.

La vida no es más que un viaje. Durante este trayecto me han acompañado muchísimas personas que estaban y han seguido, otros que sin conocerlos me han cogido de la mano y se han quedado, y otros que, simplemente, me han hecho recordarlos en la distancia. A todos ellos, Gracias.

ÍNDICE

Índice	ix
Índice de Tablas	xii
Índice de Figuras	xiii
BLOQUE 0. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO	1
1. <i>INTRODUCCIÓN</i>	2
2. <i>OBJETIVOS</i>	5
2.1. <i>OBJETIVOS GENERALES</i>	5
2.2. <i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	6
3. <i>ALCANCE DEL PROYECTO</i>	7
BLOQUE I. ESTADO DEL ARTE	11
4. <i>HORMIGÓN CONVENCIONAL</i>	12
5. <i>HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES</i>	15
5.1. <i>INTRODUCCIÓN</i>	15
5.2. <i>HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA (HAR)</i>	16
5.3. <i>HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE (HAC)</i>	16
5.4. <i>HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (HRF)</i>	20
6. <i>COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN EN FRACTURA</i>	27
6.1. <i>INTRODUCCIÓN</i>	27
6.2. <i>MECÁNICA DE LA FRACTURA ELÁSTICO LINEAL</i>	28
6.3. <i>NECESIDAD DE APLICACIÓN DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA AL HORMIGÓN ESTRUCTURAL</i>	34
6.4. <i>MECÁNICA DE LA FRACTURA APLICADA AL HORMIGÓN ESTRUCTURAL</i>	36
6.5. <i>METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FRACTURA EXPERIMENTALMENTE</i>	37
6.6. <i>EFFECTO TAMAÑO</i>	42
7. <i>COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN A ALTA TEMPERATURA</i>	45
7.1. <i>INTRODUCCIÓN</i>	45
7.2. <i>VARIACIÓN DE LAS PROPIERADES DEL HORMIGÓN A ALTA TEMPERATURA</i>	46

7.3.	Fenómeno de <i>Spalling</i>	55
7.4.	FIBRAS DE POLIPROPILENO PARA LA PROTECCIÓN PASIVA DEL HORMIGÓN CONTRA INCENDIOS.	
	59	

BLOQUE II. CAMPAÑA EXPERIMENTAL	61
8. DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL	62
8.1. INTRODUCCIÓN.....	62
8.2. MATERIALES A UTILIZAR.....	63
9. ESTUDIO DE DOSIFICACIÓN Y FABRICACIÓN.....	79
9.1. INTRODUCCIÓN.....	79
9.2. DOSIFICACIONES.	80
9.3. FABRICACIÓN.....	85
9.4. ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO.	91
10. ENSAYOS	94
10.1. INTRODUCCIÓN.....	94
10.2. CORTE DE PROBETAS Y PREPARACIÓN DE ENTALLAS.	98
10.3. CALENTAMIENTO DE PROBETAS.....	101
10.4. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN ENDURECIDO.....	102
BLOQUE III. RESULTADOS.....	115
11. RESULTADOS.....	116
11.1. INTRODUCCIÓN.....	116
11.2. ENSAYO A FLEXIÓN EN TRES PUNTOS.	117
12.2.1. Evolución de la carga de pico en función de la temperatura.....	147
11.3. ENSAYO A COMPRESIÓN UNIAXIAL.	151
11.4. ENSAYO A COMPRESIÓN UNIAXIAL CON TRANSDUCTORES CILÍNDRICOS.....	155
11.5. ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA.	160
11.6. LONGITUD CARACTERÍSTICA.	164
11.7. ANÁLISIS DSC-TG.	166
BLOQUE IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS	169
12. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	170
12.1. INTRODUCCIÓN.....	170
12.2. ENSAYO DE FLEXIÓN EN TRES PUNTOS.	171
12.3. ENSAYO A COMPRESIÓN UNIAXIAL.	181

12.4.	ENSAYO A COMPRESIÓN UNIAXIAL CON TRANSDUCTORES CILÍNDRICOS.....	182
12.5.	ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA.....	183
12.6.	LONGITUD CRACTERÍSTICA.....	183
BLOQUE V. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.....		185
13.	<i>CONCLUSIONES</i>	186
14.	<i>DESARROLLOS FUTUROS</i>	189
Referencias.....		191

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 8.1. Datos técnicos CEM II/B-L 32,5 N.	64
Tabla 8.2. Granulometría de la arena silícea fina.	68
Tabla 8.3. Granulometría de la arena silícea 0/4.	69
Tabla 8.4. Granulometría de la arena González tamizada.	70
Tabla 8.5. Granulometría de la arena caliza.	71
Tabla 8.6. Datos técnicos SIKA VISCOCRETE 20 HE.	74
Tabla 8.7. Datos técnicos GLENIUM SKY 549.	75
Tabla 8.8. Datos técnicos del humo de sílice utilizado.	76
Tabla 8.9. Fibras de polipropileno.	77
Tabla 9.1. Dosificaciones propuestas por Karihaloo B.L. para distintos tipos de hormigones clasificados según su resistencia a compresión (MPa).	81
Tabla 9.2. Dosificaciones.	84
Tabla 10.1. Nomenclatura de las probetas ensayadas.	98
Tabla 11.1. Energía de fractura.	145
Tabla 11.2. Carga de pico.	149
Tabla 11.3. Resistencia a compresión.	153
Tabla 11.4. Resistencia de tracción indirecta.	162
Tabla 11.5. Análisis DSC-TG para un rango de temperaturas comprendido entre 25°C y 300°C.	166
Tabla 11.6. Análisis DSC-TG para un rango de temperaturas comprendido entre 300°C y 500°C.	166
Tabla 11.7. Análisis DSC-TG para un rango de temperaturas comprendido entre 500°C y 750°C	166
Tabla 11.8 . Análisis DSC-TG para un rango de temperaturas comprendido entre 750°C y 1000°C.	167
Tabla 12.1. Pendiente curva $P - \delta$ de hormigón sin fibras DO a 500°C.	175

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 4.1. Curva de respuesta carga - deformación de un material cuasi frágil sometido a tracción pura con desplazamiento controlado.</i>	13
<i>Figura 4.2. Zona de proceso de fractura.</i>	13
<i>Figura 5.1. Generación de esfuerzos debido al desplazamiento relativo entre partículas de áridos gruesos.</i>	17
<i>Figura 5.2. Ensayo de escurrimiento (ensayo de extensión de flujo).</i>	18
<i>Figura 5.3. Ensayo de la caja en L.</i>	18
<i>Figura 5.4. Ensayo de escurrimiento con embudo en V.</i>	19
<i>Figura 5.5. Ensayo de escurrimiento con anillo japonés.</i>	19
<i>Figura 5.6. Efecto cosido de las fibras en la matriz de hormigón (fibras de polipropileno en este caso).</i>	20
<i>Figura 5.7. Patrón de deformación de la matriz con respecto a la fibra.</i>	22
<i>Figura 5.8. Distribución de las fibras. Fibras continuas alineadas (a); fibras discontinuas alineadas (b); fibras discontinuas aleatorias (c).</i>	23
<i>Figura 5.9. Curva tensión-deformación del hormigón a compresión para distintas fracciones de volumen de fibras.</i>	26
<i>Figura 6.1. Placa delgada ($L \gg t$) con presencia de tensiones en las inmediaciones del vértice de una grieta de longitud $2a$. Problema de Griffith.</i>	29
<i>Figura 6.2. Principio de Superposición aplicado a una placa con una grieta centrada de longitud $2a$. La placa bajo una tensión uniforme externa σ (a) es equivalente a una placa no agrietada bajo una carga σ (b) más una placa sin carga externa pero con una tensión igual y cambiada de signo σ aplicada sobre la grieta (c).</i>	30
<i>Figura 6.3. Modos de apertura de grieta: (a) Modo I, (b) Modo II y (c) Modo III.</i>	32
<i>Figura 6.4. Diferentes formas de grieta y su correspondiente distribución de tensiones.</i>	33
<i>Figura 6.1. Geometría de la probeta cilíndrica preparada para el ensayo a flexión en tres puntos.</i>	39
<i>Figura 6.2. Curva $P - \delta$ típica de una probeta entallada de hormigón sometida a flexión en 3 puntos según el procedimiento RILEM TC-50.</i>	40
<i>Figura 6.3. Ley de Efecto Tamaño de Bazant (a) modelo logarítmico y (b) lineal.</i>	43
<i>Figura 7.1. Variación de la conductividad térmica de un hormigón convencional en función de la temperatura.</i>	48
<i>Figura 7.2. Variación del calor específico de un hormigón convencional en función de la temperatura.</i>	49

<i>Figura 7.3. Variación de masa de un hormigón convencional en función de la temperatura para distintos tipos de agregados.</i>	50
<i>Figura 7.4. Variación de la resistencia a compresión de un hormigón convencional en función de la temperatura.</i>	51
<i>Figura 7.5. Variación de la resistencia a compresión de un hormigón de alta resistencia en función de la temperatura.</i>	51
<i>Figura 7.6. Variación de la resistencia a tracción del hormigón en función de la temperatura.</i>	53
<i>Figura 7.7. Variación del módulo elástico del hormigón en función de la temperatura.</i>	54
<i>Figura 7.8. Variación de la respuesta a compresión del hormigón en función de la temperatura.</i>	55
<i>Figura 7.10. Proceso del efecto spalling o desconchamiento del hormigón por presión en los poros.</i>	57
<i>Figura 7.11. Procesos físico-químicos en el hormigón con base en cemento Portland, como material, mientras aumenta la temperatura</i>	58
<i>Figura 7.12. Fibra de polipropileno en una matriz de hormigón antes del fuego (a) y el hueco que deja al derretirse (b).</i>	59
<i>Figura 8.1. Aspecto del cemento utilizado.</i>	65
<i>Figura 8.2. Máquina de tamizado.</i>	66
<i>Figura 8.3. Grava utilizada.</i>	67
<i>Figura 8.4. Finos (<2mm) desechados.</i>	67
<i>Figura 8.5. Grava gruesa (>20mm) desechada.</i>	67
<i>Figura 8.6. Tamices normalizados.</i>	67
<i>Figura 8.7. Pesado del material retenido en cada tamiz.</i>	67
<i>Figura 8.8. Finos de fondo.</i>	67
<i>Figura 8.10. Aspecto de la arena silícea 0/4.</i>	69
<i>Figura 8.11. Aspecto de la arena caliza.</i>	70
<i>Figura 8.12. Curva granulométrica de la arena silícea fina (azul), arena González (naranja), arena González tamizada (amarillo) y arena caliza (gris).</i>	71
<i>Figura 8.13. Molécula de superplastificante en torno a un grano anhidro de cemento.</i>	73
<i>Figura 8.14. Preparación del superplastificante: pesada.</i>	74
<i>Figura 8.15 Adición del superplastificante con la última parte de agua añadida.</i>	74
<i>Figura 8.17. Aspecto del humo de sílice utilizado para la fabricación de probetas.</i>	77
<i>Figura 8.18. Comparación de las longitudes de fibras con una moneda.</i>	78

<i>Figura 9.1. Molde para probeta prismática cubierta de desencofrante.</i>	85
<i>Figura 9.2. Detalle del recipiente que contiene el líquido desencofrante utilizado.</i>	86
<i>Figura 9.3. Báscula: precisión 0,1 m.</i>	87
<i>Figura 9.4. Báscula: precisión 0,001 m.</i>	87
Figura 9.5. Aspecto de la primera hormigonera utilizada, hormigonera común. Las muestras que en ella se han realizado son: Dosificación 1, 2, 3 y 4.	87
<i>Figura 9.6. Aspecto de la segunda hormigonera utilizada. Hormigonera de eje vertical con capacidad máxima de 12 L. Las muestras que en ella se han realizado son: Dosificación 5, 6 y 7.</i>	87
<i>Figura 9.8. Hormigonera de eje vertical mezclando el cemento con los áridos.</i>	88
<i>Figura 9.9. Hormigonera de eje vertical mezclando la masa con el agua y plastificante añadido.</i>	88
<i>Figura 9.10. Probetas de hormigón ya enrasadas listas para desmoldar a las 24 horas.</i>	89
<i>Figura 9.11. Probeta lista para desencofrar.</i>	89
<i>Figura 9.12. Desencofrado de probetas.</i>	90
<i>Figura 9.13. Limpieza de los moldes.</i>	90
<i>Figura 9.14. Montado de los moldes.</i>	90
<i>Figura 9.15. Baño de curado donde se introducen las probetas.</i>	91
<i>Figura 9.16. Proceso de realización del ensayo de extensión de flujo.</i>	92
<i>Figura 9.17. Hormigón que presenta segregación. Dosificación número 4.</i>	93
<i>Figura 9.18. Hormigón que no presenta segregación. Dosificación número 8.</i>	93
<i>Figura 9.19. Los áridos se acumulan irregularmente en el centro, no fluyen. Dosificación número 2.</i>	93
<i>Figura 10.1. Dimensión de las Probetas. a) 218x48x48 mm. b) 48x48x48 mm.</i>	96
<i>Figura 10.2. Obtención de probetas prismáticas.</i>	98
<i>Figura 10.3. Obtención de probetas cúbicas.</i>	99
<i>Figura 10.4. Rotaflex utilizada para el corte.</i>	99
<i>Figura 10.5. Probetas prismáticas originales y probetas cortadas.</i>	100
<i>Figura 10.6. Probetas cúbicas cortadas.</i>	100
<i>Figura 10.7. Horno de 100 a 300 °C</i>	101
<i>Figura 10.8. Horno de 500 °C a 700°C.</i>	101
<i>Figura 10.9. Medida de temperatura en el ensayo de flexión en 3 puntos para la probeta D1_T100_5.</i>	102
<i>Figura 10.10. Panel de control Servosis y Prensa hidráulica Servosis modelo MES 300</i>	103

<i>Figura 10.11. Elemento que solventa los defectos que aparecen en las caras de las probetas cúbicas en el ensayo de compresión.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 10.12. Resultados obtenidos del ensayo de compresión uniaxial, PCD 2k.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 10.13. Máquina servo hidráulica modelo ME 406/15 marca Servosis Ensayos 50.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 10.14. Apoyo de rodillo.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 10.15. Generador de funciones (PCD 2k).....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 10.16. Controles, Media de Canal 1 (medida de fuerza) y 2 (medida de posición), Trazador y Generador de Funciones (PCD 2k).....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 10.17. Ensayo de flexión en tres puntos. Carga hasta rotura.</i>	<i>109</i>
<i>Figura 10.18. Toma de medida del área de ligadura.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 10.19. Curva de aplicación de carga en el ensayo de compresión uniaxial con transductores de medida.</i>	<i>112</i>
<i>Figura 10.20 . Ensayo de tracción indirecta.</i>	<i>113</i>
<i>Figura 12.1. Hormigón sin fibras D0 a Temperatura Ambiente.</i>	<i>117</i>
<i>Figura 11.2 Hormigón sin fibras D0 a 100 °C para un tiempo de exposición de 6 h.</i>	<i>118</i>
<i>Figura 11.3. Hormigón sin fibras D0 a 100 °C para un tiempo de exposición de 24 h.</i>	<i>118</i>
<i>Figura 11.4. Hormigón sin fibras D0 a 100 °C para un tiempo de exposición de 48 h.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 11.5. Hormigón sin fibras D0 a 300 °C para un tiempo de exposición de 6 h.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 11.6. Hormigón sin fibras D0 a 300 °C para un tiempo de exposición de 24 h.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 11.7. Hormigón sin fibras D0 a 300 °C para un tiempo de exposición de 48 h.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 11.8. Hormigón sin fibras D0 a 500 °C para un tiempo de exposición de 6 h.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 11.9. Hormigón sin fibras D0 a 500 °C para un tiempo de exposición de 24 h.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 11.10. Hormigón sin fibras D0 a 500 °C para un tiempo de exposición de 48 h.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 11.11. Hormigón sin fibras D0 a 700 °C para un tiempo de exposición de 6 h.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 11.11. Hormigón sin fibras D0 a 700 °C para un tiempo de exposición de 24 h.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 11.13. Hormigón sin fibras D0 a 700 °C para un tiempo de exposición de 48 h.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 11.14. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a Temperatura Ambiente.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 11.15. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 100 °C para un tiempo de exposición de 6 h.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 11.16. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 100 °C para un tiempo de exposición de 24h.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 11.17. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 100 °C para un tiempo de exposición de 48h.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 11.18. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 300 °C para un tiempo de exposición de 6h.</i>	<i>126</i>

<i>Figura 11.19. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 300 °C para un tiempo de exposición de 24h.</i>	<i>126</i>
<i>Figura 11.20. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 300 °C para un tiempo de exposición de 48h.</i>	<i>127</i>
<i>Figura 11.21. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 500 °C para un tiempo de exposición de 6h.</i>	<i>127</i>
<i>Figura 11.22. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 500 °C para un tiempo de exposición de 24h.</i>	<i>128</i>
<i>Figura 11.23. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 500 °C para un tiempo de exposición de 48h.</i>	<i>128</i>
<i>Figura 11.24. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 700 °C para un tiempo de exposición de 6h.</i>	<i>129</i>
<i>Figura 11.25. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 700 °C para un tiempo de exposición 24 h.</i>	<i>129</i>
<i>Figura 11.25. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 700 °C para un tiempo de exposición de 48h.</i>	<i>130</i>
<i>Figura 11.26. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a Temperatura Ambiente.</i>	<i>130</i>
<i>Figura 11.27. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 100 °C para un tiempo de exposición de 6h.</i>	<i>131</i>
<i>Figura 11.28. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 100 °C para un tiempo de exposición de 24h.</i>	<i>131</i>
<i>Figura 11.29. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 100 °C para un tiempo de exposición de 48h.</i>	<i>132</i>
<i>Figura 11.30. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 300 °C para un tiempo de exposición de 6h.</i>	<i>132</i>
<i>Figura 11.31. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 300 °C para un tiempo de exposición de 24h.</i>	<i>133</i>
<i>Figura 11.32. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 300 °C para un tiempo de exposición de 48h.</i>	<i>133</i>
<i>Figura 11.33. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 500 °C para un tiempo de exposición de 6h.</i>	<i>134</i>
<i>Figura 11.34. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 500 °C para un tiempo de exposición de 24h.</i>	<i>134</i>
<i>Figura 11.35. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 500 °C para un tiempo de exposición de 48h.</i>	<i>135</i>
<i>Figura 11.36. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 700 °C para un tiempo de exposición de 6h.</i>	<i>135</i>
<i>Figura 11.37. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 700 °C para un tiempo de exposición de 24h.</i>	<i>136</i>
<i>Figura 11.38. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 700 °C para un tiempo de exposición de 48h.</i>	<i>136</i>
<i>Figura 11.39. Hormigón sin fibras D0 a 100°C para los distintos tiempos de exposición.</i>	<i>137</i>
<i>Figura 11.40. Hormigón sin fibras D0 a 300°C para los distintos tiempos de exposición.</i>	<i>138</i>
<i>Figura 11.41. Hormigón sin fibras D0 a 500°C para los distintos tiempos de exposición.</i>	<i>138</i>
<i>Figura 11.42. Hormigón sin fibras D0 a 700°C para los distintos tiempos de exposición.</i>	<i>139</i>
<i>Figura 11.43. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 100°C para los distintos tiempos de exposición.</i>	<i>139</i>
<i>Figura 11.44. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 300°C para los distintos tiempos de exposición.</i>	<i>140</i>
<i>Figura 11.45. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 500°C para los distintos tiempos de exposición.</i>	<i>140</i>
<i>Figura 11.46. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 700°C para los distintos tiempos de exposición.</i>	<i>141</i>

Figura 11.47. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 100°C para los distintos tiempos de exposición.	141
Figura 11.48. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 300°C para los distintos tiempos de exposición. ...	142
Figura 11.49. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 500°C para los distintos tiempos de exposición. ...	142
Figura 11.50. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 700°C para los distintos tiempos de exposición. ...	143
Figura 11.51. Evolución de la energía de fractura del hormigón sin fibras D0 en función de la temperatura, para los distintos tiempos de exposición.	146
Figura 11.52. Evolución de la energía de fractura del hormigón con fibra corta D1 en función de la temperatura, para los distintos tiempos de exposición.	146
Figura 11.53. Evolución de la energía de fractura del hormigón con fibra larga D2 en función de la temperatura, para los distintos tiempos de exposición.	147
Figura 11.54. Evolución carga de pico en función de la temperatura para hormigón sin fibras D0 según tiempo de exposición.	150
Figura 11.55. Evolución carga de pico en función de la temperatura para hormigón con fibras cortas D1 según tiempo de exposición.	150
Figura 11.56. Evolución carga de pico en función de la temperatura para hormigón con fibras largas D2 según tiempo de exposición.	151
Figura 11.57. Evolución tensión de rotura en función de la temperatura para hormigón sin fibras D0 según tiempo de exposición.	154
Figura 11.58. Evolución tensión de rotura en función de la temperatura para hormigón con fibras largas D2 según tiempo de exposición.	154
Figura 11.59. Evolución tensión de rotura en función de la temperatura para hormigón con fibras largas D2 según tiempo de exposición.	155
Figura 11.60. Evolución del módulo elástico estabilizado en función de la temperatura para hormigón sin fibras D0 según tiempo de exposición.	158
Figura 11.61. Evolución del módulo elástico estabilizado en función de la temperatura para hormigón con fibra corta D1 según tiempo de exposición.	159
Figura 11.62. Evolución del módulo elástico estabilizado en función de la temperatura para hormigón con fibra larga D2 según tiempo de exposición.	159
Figura 11.63. Evolución del módulo elástico estabilizado en función de la temperatura para hormigón con fibra larga D2 según tiempo de exposición.	160
Figura 11.64. Evolución de la resistencia a tracción indirecta en función de la temperatura para hormigón sin fibras D0 según tiempo de exposición.	162
Figura 11.65. Evolución de la resistencia a tracción indirecta en función de la temperatura para hormigón con fibras cortas D1 según tiempo de exposición.	163

<i>Figura 11.66. Evolución de la resistencia a tracción indirecta en función de la temperatura para hormigón con fibra larga D2 según tiempo de exposición.</i>	163
<i>Figura 11.67. Evolución de la longitud característica en función de la temperatura para hormigón sin fibra D0 según tiempo de exposición.</i>	164
<i>Figura 11.68. Evolución de la longitud característica en función de la temperatura para hormigón con fibra corta D1 según tiempo de exposición.</i>	165
<i>Figura 11.69. Evolución de la longitud característica en función de la temperatura para hormigón con fibra larga D2 según tiempo de exposición.</i>	165
<i>Figura 11.70. Efectos de la temperatura en la matriz del hormigón.</i>	167
<i>Figura 12.1. Ensayo de flexión en tres puntos donde aparece el crecimiento de grieta.</i>	171
<i>Figura 12.2. Rotura transgranular propia de los H.A.R.</i>	172
<i>Figura 12.3. Fractura irregular debido a áridos de mayor resistencia en la zona de entalla lo que obliga un crecimiento de grieta irregular o grieta iniciada en el enfriamiento de la propia probeta.</i>	173
<i>Figura 12.4. Fractura irregular debido a defectos cercanos a la zona entallada, porosidad en este caso.</i>	173
<i>Figura 12.5. Influencia de la adición de fibra en la energía de fractura.</i>	177
<i>Figura 12.6. Influencia de la adición de fibra en la energía de fractura.</i>	178
<i>Figura 12.7. Influencia de la adición de fibra en la energía de fractura.</i>	178
<i>Figura 12.8. Influencia de la adición de fibra en la carga de pico para un tiempo de exposición de 6h.</i>	180
<i>Figura 12.9. Influencia de la adición de fibra en la carga de pico para un tiempo de exposición de 24h.</i>	180
<i>Figura 12.10. Influencia de la adición de fibra en la carga de pico para un tiempo de exposición de 48h.</i>	181
<i>Figura 12.11. Evolución del módulo elástico recogido por ensayos experimentales por Cifuentes H. et al (2012) para distintas dosificaciones.</i>	182

BLOQUE 0.
INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS
Y ALCANCE DEL PROYECTO.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón o concreto es un material compuesto, formado esencialmente por un aglomerante (cemento) al que se añade partículas o fragmentos de un agregado (áridos), agua y aditivos específicos. Las propiedades del hormigón dependen fundamentalmente de las características de los materiales utilizados y de la dosificación del mismo.

Debido a la exigencia cada vez mayor del mismo en nuevos retos tecnológicos aumenta la utilización de hormigones de altas prestaciones, como Hormigón de Alta y Ultra-Alta Resistencia (HAR) que presentan mayor resistencia a la compresión, así como el uso de Hormigón Autocompactante (HAC), que evitan la compactación externa en la puesta en obra del hormigón haciendo posible la construcción de estructuras más complejas.

Estos hormigones presentan varias ventajas además de las ya comentadas, sin embargo, al poseer ambos una gran cantidad de finos en su composición, se produce una importante fisuración por retracción. Para evitar este problema aparece la incorporación de fibras al hormigón.

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

Estas fibras proporcionan una red de pequeñas armaduras distribuidas homogéneamente por el hormigón que se encargan de "coser" las grietas, impidiendo la apertura y propagación de las fisuras, proporcionando un mejor comportamiento ante la fractura.

Además, es bien conocido que el hormigón es un material pétreo con una resistencia a la compresión muy superior a su resistencia a tracción. Debido al efecto cosido comentado anteriormente, con la adición de fibras, aumenta la resistencia a tracción.

La mejora que las fibras introducen en las propiedades a tracción, ha originado que se hayan desarrollado modelos de Mecánica de la Fractura para materiales cuasi-frágiles, como es el hormigón.

Las fibras añadidas al hormigón pueden ser de materiales diferentes, resaltando las fibras metálicas y las fibras de materiales polímeros, por ejemplo las fibras de polipropileno que son las utilizadas en el proyecto que se presenta. Las primeras presentan unas mejores propiedades mecánicas aunque las fibras de polipropileno cuentan con la ventaja de poseer un menor peso y ausencia de corrosión.

Por otra parte, el tipo de hormigón aquí estudiado (de alta resistencia y autocompactante) se caracteriza por su gran compactación y densidad. Por lo que ante un incendio, el aumento de la presión interna del agua sometida a temperaturas por encima de la de ebullición, genera tensiones locales elevadas que, en ocasiones puede producir una rotura explosiva. Este fenómeno conocido como "spalling" podría evitarse con la incorporación al hormigón de fibras de polipropileno durante el amasado del mismo. Las fibras se descomponen a altas temperaturas y dejan en su lugar pequeños conductos por los que emigra el vapor de agua, evitando así el desconchamiento.

Todo ello, acentúa la necesidad de abordar el estudio experimental del Hormigón Autocompactante de Alta Resistencia Reforzado con Fibras de Polipropileno sobre el que no existe

una investigación exhaustiva, contribuyendo de este modo a abrir el camino definitivo de las micro-fibras plásticas como material de refuerzo frente a microfisuras producidas a tracción y por retracción del hormigón, y como una solución atractiva ante el problema de "spalling" a altas temperaturas. Pudiéndose convertir en una tendencia de futuro clara para obtener un material más competitivo.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GENERALES.

El presente proyecto tiene como objetivo principal el estudio de la dosificación y del comportamiento en fractura a alta temperatura de un hormigón (hot concrete) de alta resistencia autocompactante con y sin fibras de polipropileno.

Nos basamos en la determinación de los parámetros de fractura en hormigón mediante ensayos experimentales realizados a diferentes temperaturas. Siendo la Energía de Fractura, G_F , el parámetro más trascendente.

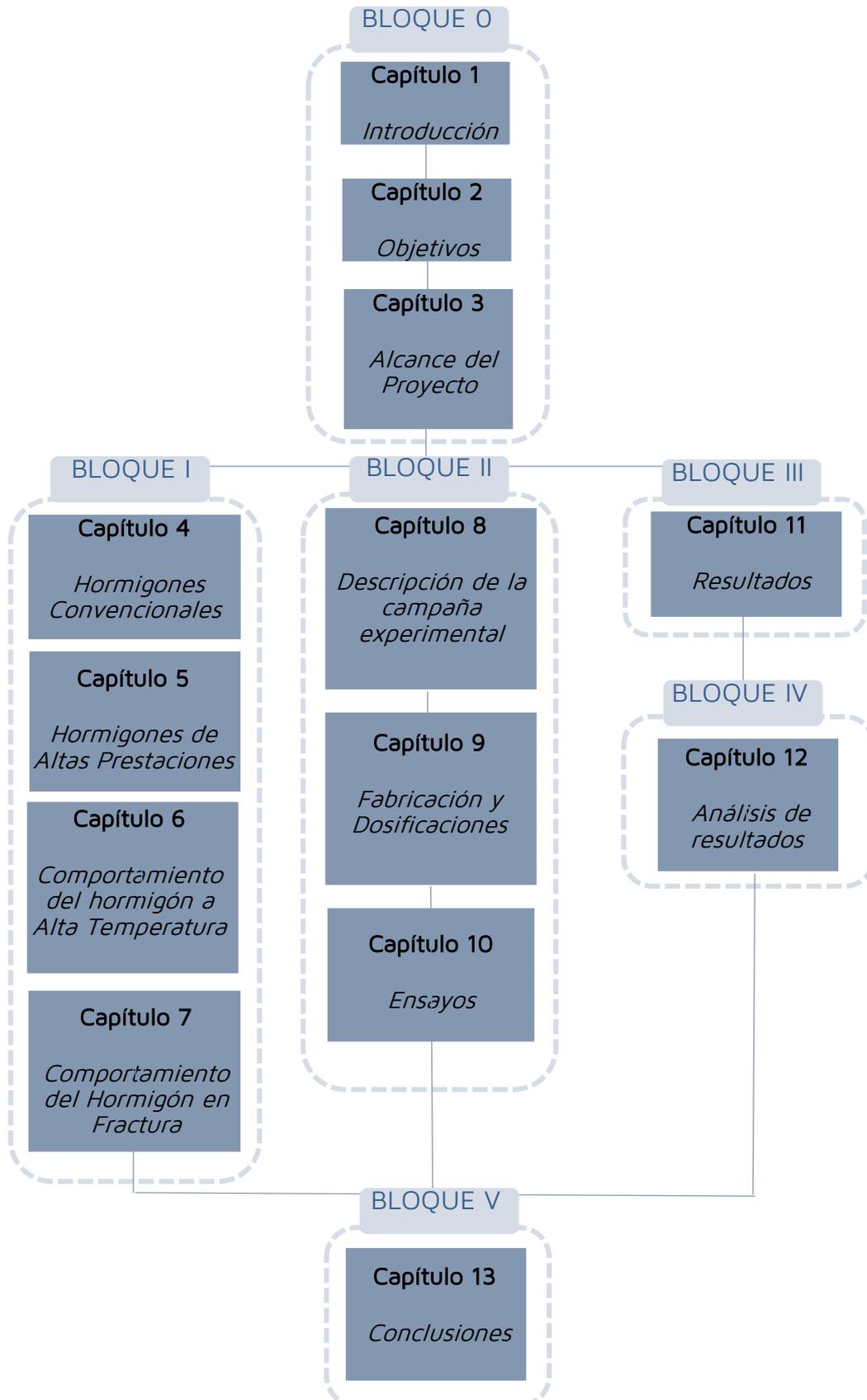
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

<p>1.- Obtener la dosificación de un Hormigón Autocompactante de Alta Resistencia.</p>	<p>Se parte de las dosificaciones propuestas por Karihaloo [21-23] y se van ajustando, teniendo en cuenta que éstas han sido realizadas con distintos materiales y en otras condiciones ambientales.</p>
<p>2.- Estudiar la influencia de la temperatura en los parámetros de fractura en hormigones autocompactantes de alta resistencia con y sin refuerzo de fibras.</p>	<p>Se realizan ensayos de fractura in situ a diferentes temperaturas (100, 300, 500 y 700 °C) para estudiar cómo influye ésta en los parámetros del hormigón.</p>
<p>3.- Estudiar la influencia del tiempo de exposición.</p>	<p>Se realizan ensayos tras 6, 24 y 48 horas transcurridas de introducir las probetas en el horno.</p>
<p>4.- Estudiar la influencia de la presencia de fibras de polipropileno.</p>	<p>Se fabricarán tres dosificaciones de un mismo hormigón:</p> <ul style="list-style-type: none"> - DO: Hormigón sin fibras (referencia). - D1 y D2: Hormigón con fibras de polipropileno.
<p>5.- Estudiar la influencia del tamaño de las fibras de polipropileno.</p>	<p>Se fabrican probetas con dos tipos de fibras de distintas longitudes:</p> <ul style="list-style-type: none"> - D1: Fibras de 6mm. - D2: Fibras de 24mm.

3. ALCANCE DEL PROYECTO

El contenido del proyecto se divide en seis grandes bloques, los cuales se componen a su vez de diferentes capítulos. A continuación se resume la metodología seguida en cada uno de ellos para facilitar al lector la comprensión del proyecto.

En el esquema adjunto aparecen los Bloques divididos por capítulos, y la relación entre ellos.



En el *Bloque I: Estado del Arte* se aporta, fruto de una exhaustiva revisión bibliográfica, una visión general del método de Mecánica de la Fractura (MF) aplicada al hormigón estructural y la metodología de obtención experimental de los parámetros de fractura. Además del comportamiento de hormigones de alta resistencia con y sin fibras de polipropileno y el comportamiento del hormigón a alta temperatura.

En el *Bloque II: Campaña Experimental* se pretende exponer toda la campaña experimental realizada en el laboratorio de estructuras, describiendo los materiales y maquinaria utilizados así como las diferentes dosificaciones fabricadas. Se establece una metodología de fabricación de las probetas posteriormente ensayadas.

Además, se enumeran los diferentes ensayos realizados para determinar los parámetros característicos del hormigón, fijando unas pautas para la correcta obtención de éstos.

A continuación, en el *Bloque III: Resultados* se exponen todos los resultados obtenidos en los ensayos, seguido del *Bloque IV: Análisis de Resultados* donde se realiza un análisis comparativo de los mismos, comentando los resultados detalladamente.

Por último, en el *Bloque V: Conclusiones* se extraen las conclusiones generales tras la investigación y realización del proyecto.

BLOQUE I.
ESTADO DEL ARTE.

4. HORMIGÓN CONVENCIONAL

Si se somete a una barra de hormigón en masa a una tracción pura con desplazamiento controlado y se miden la fuerza aplicada y el desplazamiento producido en el punto de aplicación de esta fuerza, se obtendrá una curva carga-deformación como la indicada en la Figura 4.1. El área encerrada por la curva representa la energía necesaria para la fractura completa del elemento.

La curva $P - \delta$ del hormigón es una curva intermedia entre la correspondiente a un material frágil y la de un material dúctil. Sin embargo, las deformaciones postpico no son muy elevadas, por ello se le denomina como material con comportamiento cuasi-frágil [1].

Antes de alcanzarse la carga máxima, se observa cómo se produce un endurecimiento por deformación con un comportamiento no lineal en el tramo final pre-pico.

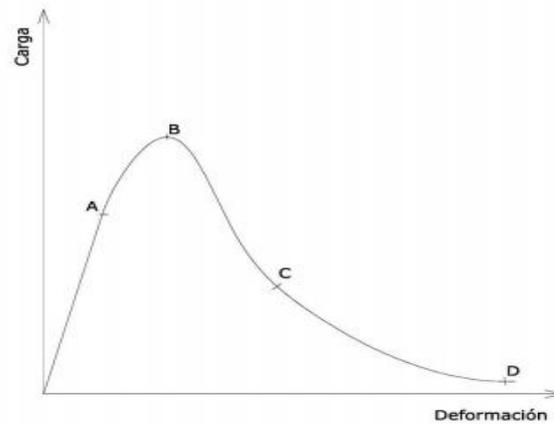


Figura 4.1. Curva de respuesta carga - deformación de un material cuasi frágil sometido a tracción pura con desplazamiento controlado.

Tras alcanzar la resistencia a tracción del hormigón reducida (en torno al 10% de la resistencia a compresión) se producirá un ablandamiento hasta rotura de carácter fuertemente no lineal. Este comportamiento post-pico del material viene representado por la ley de ablandamiento y es originada por la aparición de microfisuras y el desarrollo de la Zona de Proceso de Fractura (ZPF).

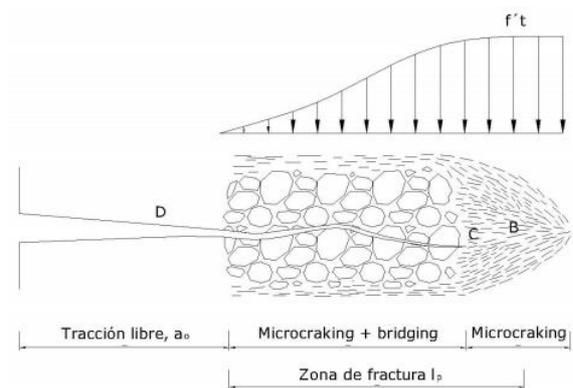


Figura 4.2. Zona de proceso de fractura.

En la ZPF se producen unas microfisuras iniciales cuya longitud está muy relacionada con diversos factores del material, como el tamaño máximo y tipo de áridos, cantidad y tipo de cemento empleado, etc. Cuando se llega a un determinado límite de carga estas microfisuras se interconectan entre si llegando a formar una macrogrieta. A partir de este instante no es capaz

de transmitir ningún tipo de carga.

Ahí radica la importancia de aplicar un método de cálculo basado en la Mecánica de la Fractura, para poder predecir el futuro crecimiento de grietas existentes en el hormigón y así su comportamiento en fractura.

En el presente proyecto se aplica la Mecánica de la Fractura a hormigones de altas prestaciones, como se expone a continuación.

5. HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

5.1. INTRODUCCIÓN.

Se entiende por hormigones de altas prestaciones aquellos que poseen alguna característica notablemente mejorada sobre un hormigón convencional, conseguidos por técnicas especiales, mediante la adición de componentes no ordinarios o introduciendo elementos constituyentes avanzados. Entre ellos se encuentran hormigones de alta resistencia, hormigones de alta ductilidad, hormigones reforzados con fibras, hormigones autocompactantes, etc.

Cada vez son mayores las exigencias sobre el hormigón para su utilización en nuevos retos tecnológicos, por lo que aumenta la fabricación de hormigones de altas prestaciones, quedando

justificado el estudio de su comportamiento.

En el presente proyecto se realiza el estudio de la dosificación y el comportamiento de un hormigón autocompactante de alta resistencia con y sin refuerzo de fibras de polipropileno. Para una mejor comprensión de este tipo de hormigón se detallan, a continuación, las características de cada uno de los tipos de hormigones de altas prestaciones por separado.

5.2. HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA (HAR).

El Hormigón de Alta Resistencia, HAR, además de una resistencia a la compresión elevada, brinda mejores prestaciones en lo referente a permeabilidad, resistencia a los sulfatos, a la reacción "árido-alcalis", resistencia a la abrasión, etc; lo cual les confiere una mayor durabilidad.

Estos hormigones también presentan un aumento de la resistencia a tracción, pero menos proporcional que el aumento de la resistencia a compresión. Además se obtiene un valor de la energía específica de fractura superior al correspondiente a los hormigones convencionales. Sin embargo, las deformaciones a las que se alcanzan las tensiones últimas son inferiores.

La pasta de cemento de los hormigones de alta resistencia es muy compacta presentando una gran rigidez y fragilidad. Esta mayor fragilidad es notable a través de distintos fenómenos. Por un lado la rotura a compresión simple de este tipo de hormigones es explosiva. Por otra parte, las curvas $P - \delta$ inherentes son más altas y estrechas, con una rama de ablandamiento más reducida, lo que conlleva un menor valor de la longitud característica (y por lo tanto de la ZPF).

5.3. HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE (HAC).

El Hormigón Autocompactante, HAC (Self-Consolidating Concrete, SCC, según su sigla en inglés), se puede definir como aquel hormigón de consistencia fluida y viscosa que es capaz de fluir en el interior del encofrado, llenándolo de forma natural, pasando entre las barras de armadura, y

consolidándose únicamente bajo la acción de su propio peso, sin presentar segregación de los áridos gruesos [2], lo cual le permite alcanzar finalmente una distribución uniforme del árido en toda su masa.

Los mecanismos del comportamiento del hormigón autocompactante en estado fresco son encontrados principalmente en la reología de las partículas en suspensión [3].

Cuando el hormigón fluye a través de las barras de refuerzo (Figura 5.1), se cambia la ubicación relativa de las partículas de árido grueso en el espacio. Este desplazamiento relativo causa esfuerzos de corte en la pasta entre los áridos, además de esfuerzos de compresión.

Por lo tanto, para que el hormigón fluya a través de los obstáculos sin segregación, el esfuerzo de corte generado debe ser suficientemente pequeño para permitir el desplazamiento relativo y no se produzca un grado de fricción que evite el flujo y cause separación de los materiales, en especial los áridos gruesos del mortero. En el diseño de HAC, el árido fino y/o aditivo superplastificante confiere a la mezcla la capacidad de disminuir la segregación desarrollando en la pasta fuerzas cohesivas y de compresibilidad.

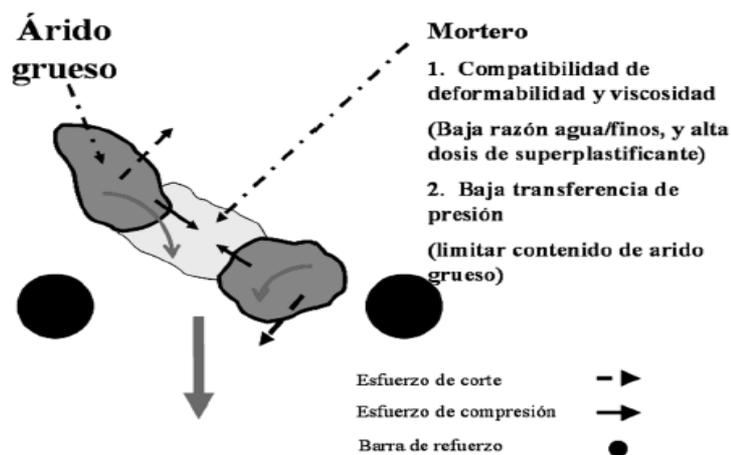


Figura 5.1. Generación de esfuerzos debido al desplazamiento relativo entre partículas de áridos gruesos.

En resumen, se tiene que compatibilizar un alto grado de deformabilidad y baja viscosidad

(bajando la relación agua/finos junto a mayores dosis de aditivo superplastificante), junto con la generación de una baja transferencia de presión en la pasta (limitando el contenido de árido grueso).

La caracterización de la autocompactabilidad se realiza a través de métodos de ensayos específicos que permiten evaluar las prestaciones del material en términos de fluidez, mediante ensayos de escurrimiento (Figura 5.2) según UNE 83.361 o de ensayos de escurrimiento en embudo en V (Figura 5.4), según UNE 83.364. La resistencia al bloqueo se evalúa mediante ensayos del escurrimiento con anillo J (Figura 5.5), según UNE 83.362 y mediante ensayos de la caja en L (Figura 5.3), según UNE 83.363. Por último, si bien no existen ensayos normalizados para evaluar la resistencia a la segregación, la misma se puede apreciar visualmente a partir del comportamiento del material en los ensayos de escurrimiento y embudo en V. En el ensayo de escurrimiento debe observarse una distribución uniforme del árido grueso y ningún tipo de exudación en el perímetro de la "torta" final del ensayo [4].



Figura 5.2. Ensayo de escurrimiento (ensayo de extensión de flujo).



Figura 5.3. Ensayo de la caja en L.



Figura 5.4. Ensayo de escurrimiento con embudo en V.



Figura 5.5. Ensayo de escurrimiento con anillo japonés.

Como consecuencia de la ausencia de vibración y el uso habitual de adiciones y fillers en el hormigón autocompactante, se suele obtener una interfase pasta-árido más densa que en los hormigones convencionales (como se ha comentado anteriormente en los hormigones de alta resistencia). Como consecuencia de ello, junto con la mayor compacidad general de la estructura granular, suele obtenerse una reducción en la velocidad de ingreso de la mayoría de los agentes agresivos. La ausencia de vibración redundará, a su vez, en una capa exterior del hormigón de recubrimiento de superior densidad y, por tanto, menos permeable. Por lo tanto una mayor durabilidad del mismo.

Un alto contenido de cemento conducirá a un mayor calor de hidratación, una consecuente dilatación y una posterior retracción térmica, lo cual en elementos de mediana o gran masa podría resultar crítico de cara a la fisuración. Se deben emplear las mismas precauciones que para el hormigón de compactación convencional [5].

La utilización de cenizas volantes, humo de sílice y/o filler calizo puede contribuir a la reducción de la retracción endógena.

5.4. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (HRF).

5.4.1. INTRODUCCIÓN.

El 'HRF' (Hormigón Reforzado con Fibras), del anglosajón 'FRC' (Fiber Reinforced Concrete) es un hormigón que según el comité ACI 544 se define como: "hormigón fabricado con cemento hidráulico, que contiene árido fino, grueso o ambos, y fibras discontinuas. Las fibras pueden ser orgánicas o inorgánicas".

La adición de fibras de refuerzo al hormigón en el momento de su amasado es una técnica de gran interés implantada desde hace varias décadas, y aún hoy día sigue siendo objeto de estudio.

El hormigón posee una reducida resistencia a tracción. Debido a este comportamiento del material, los fallos de los elementos estructurales de hormigón suceden motivados por esfuerzos de tracción, originados directa o indirectamente.

Además, el diferente comportamiento del hormigón de alta resistencia en tracción, (mayor fragilidad, mayor contenido en cemento y porcentaje de finos y mayor sensibilidad al "spalling" que propicia el refuerzo con fibras en este tipo de hormigones), combinado con la importancia de la fisuración del hormigón en general ha promovido el estudio del comportamiento mecánico y en fractura del Hormigón de Alta Resistencia Reforzado con Fibras [6].



Figura 5.6. Efecto cosido de las fibras en la matriz de hormigón (fibras de polipropileno en este caso).

A lo largo de la historia, para solucionar este problema se introducen barras de acero (armaduras) que soporten las tracciones que soporta el elemento estructural, cosiendo las fisuras que aparecen. Siguiendo este mismo planteamiento, se añaden fibras de distintos materiales al hormigón, que amasado junto a los demás materiales que lo forman, le proporcione una mejora de la resistencia a la tracción mediante la costura de las microfisuras producidas en la pasta de cemento (Figura 5.6).

5.4.2. TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE LAS FIBRAS.

Las fibras pueden estar compuestas de diferentes materiales. Según la naturaleza de las fibras estas pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- Inorgánicas (vidrio, carbono).
- Orgánicas (vegetales, sintéticas).
- Metálicas (acero, acero inoxidable).

Destacando dos clases claramente diferenciadas como son las fibras metálicas y las fibras de materiales polímeros. También se emplea habitualmente una mezcla de ambas formando lo que se conoce como hormigones reforzados con fibras híbridos [1, 6].

Las fibras de refuerzo deben ser resistentes, rígidas, ligeras y con una temperatura de fusión alta, prefiriéndose las fabricadas con materiales que tengan límites plásticos específicos y módulos de elasticidad específicos altos [7].

Las características de los hormigones reforzados con fibras dependerán principalmente de los siguientes factores:

- Naturaleza de las fibras.
- Tipo de fibra.
- Característica geométrica de las fibras.
- Del porcentaje y de la orientación de las fibras.

5.4.3. CONCEPTOS GENERALES DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL HRF.

Se observa como la adición de fibras a la matriz de hormigón genera un aumento de la zona de proceso de fractura del material, lo cual indica que el hormigón reforzado con fibras tiene un comportamiento más dúctil que un hormigón sin refuerzos. Mejorando, así, su comportamiento en fractura, controlando la propagación de grietas y limitando el ancho de fisuras mediante el efecto cosido.

El mayor porcentaje de las fibras incrementa la resistencia y rigidez del hormigón, pero no debe olvidarse que el porcentaje máximo debe estar limitado para asegurar así que la totalidad de la superficie de las fibras quede recubierta con el material tenaz de la matriz [7].

Las características mecánicas de los compuestos reforzados con fibras dependen no sólo de las propiedades de la fibra, sino también del grado en que una carga aplicada se transmite a la fibra por medio de la fase matriz. En este aspecto cobra gran importancia la influencia que tienen algunas de las características que diferencian los tipos de fibras [8]:

- Influencia de la longitud de fibra: Al aplicar un esfuerzo de tracción, la unión fibra se genera un patrón de deformación como el que se muestra en la figura 5.7.

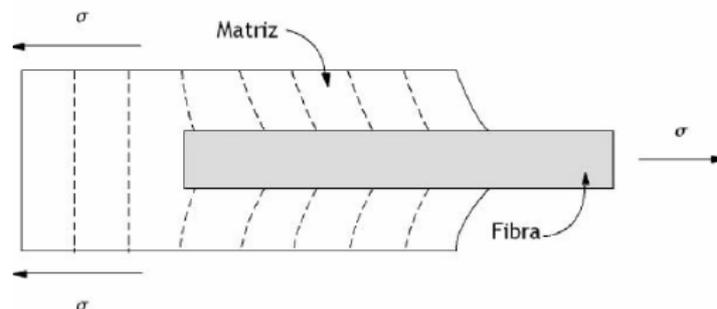


Figura 5.7. Patrón de deformación de la matriz con respecto a la fibra.

Existe una longitud de fibra crítica para aumentar la resistencia y la rigidez del material compuesto. Esta longitud l_c depende del diámetro d de la fibra, de la resistencia a la

tracción σ_f y de la resistencia de la unión matriz-fibra (o resistencia al cizalle de la matriz), τ_c de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{\tau_c}$$

Las fibras con $l \gg l_c$ se denominan *continuas*, y las fibras de menor longitud se denominan *discontinuas* o *fibras cortas*.

- Influencia de la orientación y de la concentración de fibras: La orientación relativa de las fibras y su concentración y distribución influyen radicalmente en la resistencia y en otras propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras. Con respecto a la orientación existen dos situaciones extremas. Primero la alineación paralela de los ejes longitudinales de las fibras y en segundo lugar la alineación al azar. Las fibras continuas normalmente se alinean (a), mientras que las fibras discontinuas se pueden alinear (b) o bien se pueden orientar al azar (c) o alinearse parcialmente como se puede observar en la figura 5.8.

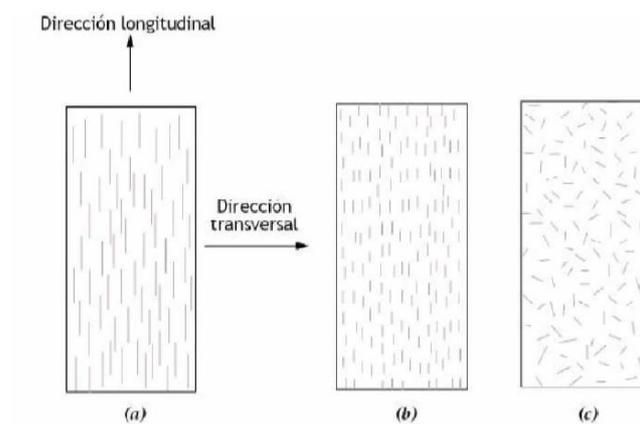


Figura 5.8. Distribución de las fibras. Fibras continuas alineadas (a); fibras discontinuas alineadas (b); fibras discontinuas aleatorias (c).

El módulo elástico de los materiales reforzados, tanto si las fibras están alineadas como si están orientadas al azar, aumenta al incrementarse la fracción de volumen de la fibra.

5.4.4. COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO.

Con la adición de fibras metálicas se obtiene una notable mejora de las propiedades mecánicas [1] sobre todo en cuanto a resistencia a tracción se refiere.

El empleo de fibras de polipropileno no aumenta tan significativamente las propiedades mecánicas del hormigón. No tienen un significativo efecto en la resistencia y tenacidad a compresión, ni en la resistencia a flexión, pero si aumenta considerablemente la tenacidad a la flexión. También mejora la resistencia al impacto. La presencia, además, de humo de sílice aumenta la resistencia y tenacidad a compresión y la tenacidad a flexión en un porcentaje mayor en el hormigón reforzado con fibras de polipropileno que en el hormigón convencional como establece un estudio realizado por Alhozaimy A. M. et al en 1995 [9].

La más importante aplicación de las fibras de polipropileno está en la prevención de formación de grietas por tracción, sin embargo, presentan otra serie de ventajas con respecto al uso de fibras de acero, como puede ser [8]:

- Menor peso por lo tanto menor densidad.

- Mejora del comportamiento al fuego en hormigones de alta resistencia (como se verá en el siguiente capítulo).

- Mejora de la resistencia a la corrosión: El hormigón armado, presenta un gran problema con la corrosión de sus armaduras producida por agentes agresivos como son los cloruros y los ácidos. Por normativa están diseñados con un recubrimiento mínimo de las armaduras, pero esto no es suficiente ya que el hormigón es un material frágil y una vez cargado y sometido a tracción se fisura. Por estas fisuras acceden los agentes agresivos hasta las armaduras de acero produciendo su corrosión por tanto debilitando su capacidad portante. Las fibras de polipropileno son inertes a la corrosión

y debido a sus características y adicionadas a la matriz de hormigón, "cosen" estas fisuras, evitando que las armaduras estructurales principales sean corroídas.

- Influencia sobre la retracción plástica: Cuando el hormigón se encuentra en estado plástico, se produce una pérdida de humedad del hormigón debido principalmente a la evaporación a la atmósfera y a la absorción por parte del encofrado. En este proceso de pérdida de agua, se produce un efecto de capilaridad por presiones negativas, las cuales desarrollan en el hormigón deformaciones de compresión. Estas deformaciones de compresión, provocan lejos de dicha zona tracciones que causan grietas internas en hormigones que todavía tiene una corta edad. Al igual que en el caso anterior, la adición de fibras de polipropileno evita dentro de lo posible que se formen esas grietas internan, cosiendo la matriz de hormigón.

- Mejoras de los parámetros de fractura del hormigón como son la capacidad de absorción de energía y la fragilidad-ductilidad. Además, las fibras sintéticas también influyen en la "Ley de efecto tamaño de Bazant"

Por ello, las fibras de polipropileno, en particular, han ganado popularidad los últimos años para su uso en hormigón.

Es importante aclarar, que las fibras de polipropileno no reemplazan el refuerzo estructural principal en el hormigón ya que agregan poca o ninguna resistencia. Pero el esfuerzo estructural no suministra su beneficio hasta que el hormigón haya endurecido. Es por esto por lo que se adicionan fibras sintéticas como refuerzo secundario.

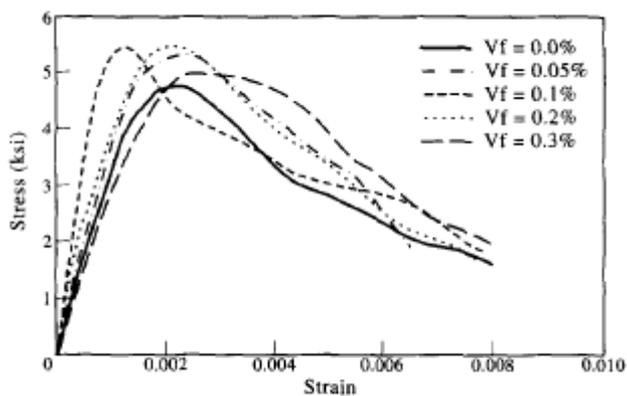


Figura 5.9. Curva tensión-deformación del hormigón a compresión para distintas fracciones de volumen de fibras.

Respecto al porcentaje de fibras, en la figura 5.9 se observa un pequeño aumento de la tensión a compresión con el aumento de volumen de fibra añadido al hormigón, siendo máxima para un volumen de 0.1-0.2% y disminuyendo a continuación [9].

6. COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN EN FRACTURA

6.1. INTRODUCCIÓN.

Como se ha comentado anteriormente, en el presente proyecto se estudiará el comportamiento mecánico de hormigones de altas prestaciones. El comportamiento de estos hormigones es diferente al correspondiente a un hormigón convencional, principalmente su comportamiento en fractura, por lo que se les aplican teorías relacionadas con la mecánica de la fractura [1].

6.2. MECÁNICA DE LA FRACTURA ELÁSTICO LINEAL.

La Mecánica de la Fractura Elástica Lineal (MFEL) es una ciencia que estudia los mecanismos y procesos de propagación de grietas en sólidos, así como la distribución de tensiones y deformaciones que ocurren en un material agrietado o con discontinuidades, sometido a cierta tensión externa.

Esta ciencia surgió con los trabajos fundamentales de Griffith (1921,1924) sobre criterios de propagación de grietas en sólidos, basados en conceptos de transformación de energía elástica en energía de superficie y por esta razón se conoce una formulación energética de la mecánica de la fractura.

Irwin (1957) introdujo un avance importante en la mecánica de la fractura ya que planteó el análisis en términos de tensiones, lo cual no se había podido hacer anteriormente debido a que teóricamente en la punta de una grieta las tensiones tienden a infinito, independientemente de la magnitud de la carga aplicada.

A continuación se introducen brevemente ambas teorías para su mejor comprensión.

6.2.1. TEORÍA DE GRIFFITH PARA MATERIALES FRÁGILES.

Las grietas, y en general los defectos, están presentes en todos los materiales. Éstas introducen fuertes concentraciones de tensiones en sus extremos en los materiales elásticos y frágiles. Griffith desarrolló una teoría que analiza las tensiones en las inmediaciones del vértice de una grieta de longitud 2^a y de abertura inicial nula, situada en un medio elástico continuo indefinido sometido a tracción uniaxial, σ (Figura 6.1).

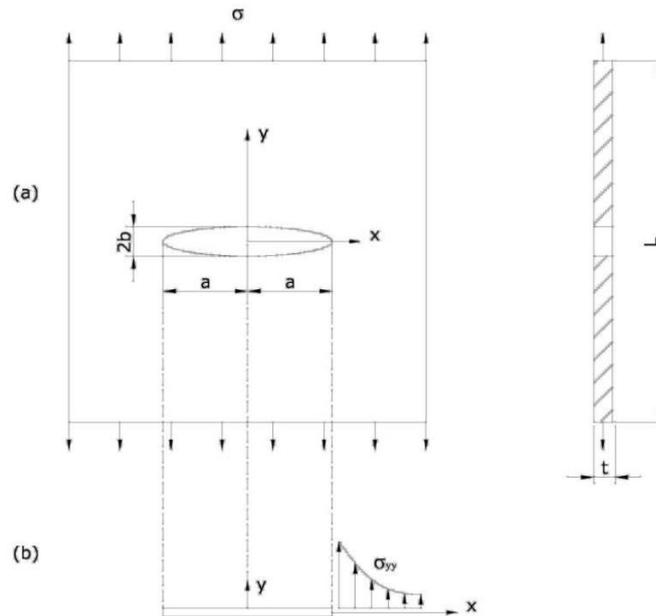


Figura 6.1. Placa delgada ($L \gg t$) con presencia de tensiones en las inmediaciones del vértice de una grieta de longitud $2a$. Problema de Griffiht.

Las tensiones en el borde de la grieta vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$\sigma_{yy} = \sigma f\left(\frac{x}{a}\right) + \sigma$$

$$\sigma_{xx} = \sigma f\left(\frac{x}{a}\right)$$

Siendo:

$f\left(\frac{x}{a}\right)$: Función adimensional dependiente de la geometría del espécimen.

Cuando $|x| \rightarrow a$ las tensiones tienden a infinito.

La solución anterior del campo de tensiones, ha sido obtenida por la aplicación del Principio de Superposición, válido para comportamientos elásticos (Figura 6.2).

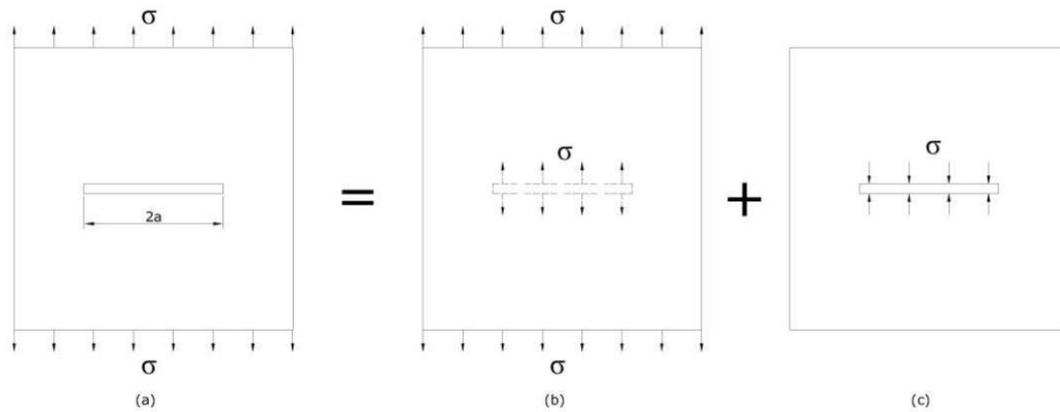


Figura 6.2. Principio de Superposición aplicado a una palca con una grieta centrada de longitud $2a$. La placa bajo una tensión uniforme externa σ (a) es equivalente a una placa no agrietada bajo una carga σ (b) más una placa sin carga externa pero con una tensión igual y cambiada de signo σ aplicada sobre la grieta (c).

La expresión del desplazamiento vertical del borde de la grieta es la siguiente:

$$v(x) = \frac{2\sigma}{E'} \sqrt{a^2 - x^2}$$

Siendo:

$E' = E$: Tensión plana.

$E' = \frac{E}{1-\nu^2}$: Deformación plana.

La energía liberada por la grieta será igual al trabajo, W , que realizan las tensiones y es igual a la integral de la tensión, σ , por el desplazamiento, $v(x)$, siendo:

$$W = -\frac{\pi a^2 \sigma^2}{E'}$$

En el problema de Griffith, la energía de deformación elástica U , se incrementa durante el proceso y el trabajo W es igual al cambio de la energía potencial del sistema siempre que no existan pérdidas como por ejemplo de índole térmica.

Se supone un crecimiento estable de grieta, da , a cada lado de ésta. En este caso la energía liberada al propagarse la grieta es igual a la energía necesaria para su propagación: $dW = -d\Gamma$.

Siendo:

$\Gamma = 4a\gamma$: Energía superficial de la grieta que es igual a la densidad de energía superficial del material necesaria para crear una superficie de unidad libre de tensiones por el área de grieta creada.

Realizando un balance de energía para un espesor unidad se obtiene el valor de la tensión crítica que produce el inicio de crecimiento de grieta:

$$\sigma\sqrt{\pi a} = \sqrt{2E'\gamma} = cte$$

Siendo:

E' y γ constantes del material.

El criterio de energía de Griffith de fractura frágil tiene un carácter global. Cuando la energía acumulada y disponible en el cuerpo para ser liberada en el extremo de la grieta es suficiente para romper los vínculos allí existentes, tiene lugar la fractura frágil catastrófica.

6.2.2. TEORÍA DE IRWIN PARA MATERIALES FRÁGILES.

Se ha visto que en un cuerpo frágil, el proceso de fractura tiene lugar en los extremos de la grieta. Irwin observó que en las cercanías de los extremos de las grietas, las componentes del campo tensional no dependían de la forma del cuerpo elástico y de la forma de carga.

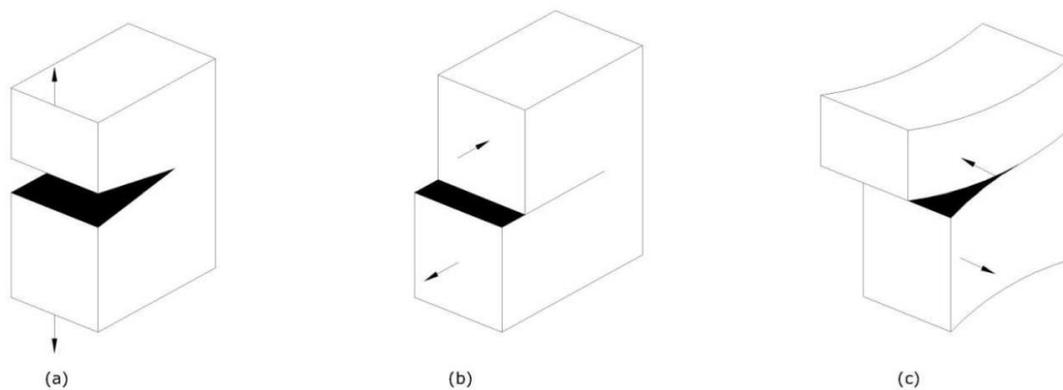


Figura 6.3. Modos de apertura de grieta: (a) Modo I, (b) Modo II y (c) Modod III.

Desarrolló una teoría en la que se obtienen las tensiones en función de unos factores de intensidad de tensiones K_I , K_{II} o K_{III} , según el modo de apertura de grieta (Figura 6.3).

Irwin dedujo que el proceso de fractura no podía concentrarse en un solo punto como lo plantea la teoría elástica, sino que se presenta en una zona pequeña próxima a la punta, que denominó Zona Plástica o Zona de Proceso de Fractura (ZPF), la cual, por el efecto de la deformación, absorbe gran cantidad de energía y mantiene las tensiones dentro de un valor finito.

Para el agrietamiento en Modo I, el campo de tensiones resultantes en los vértices de la grieta es:

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta)$$

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f'(\theta)$$

Siendo:

r y θ : coordenadas polares. Por lo tanto cuando $r \rightarrow 0$, vértice de la grieta, las tensiones son infinitas.

El factor de intensidad de tensiones viene dado por la siguiente expresión:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$$

Este, K_I , depende de la geometría del cuerpo y de la forma en que la carga es aplicada para crear las condiciones del modo I en las caras de la grieta. En la figura 6.4 se observan las formas de los picos de grieta y la distribución de tensiones para valores de K_I distintos. De la misma forma se analizan los otros dos modos de carga.

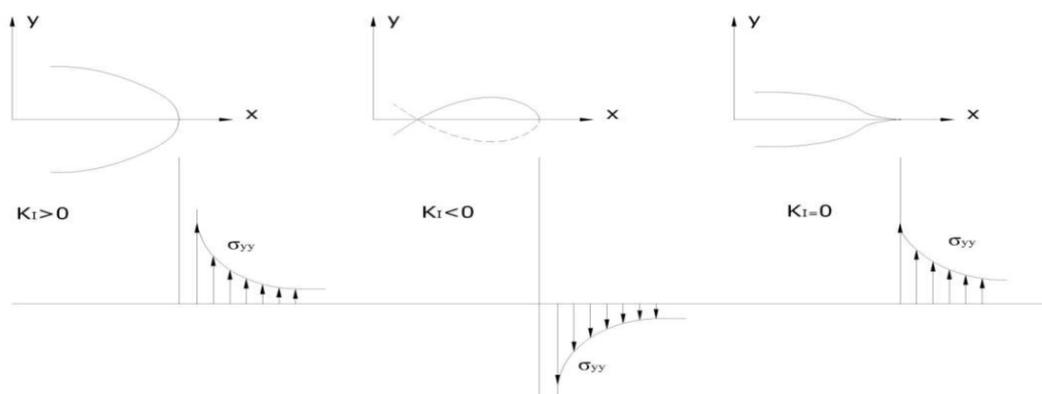


Figura 6.4. Diferentes formas de grieta y su correspondiente distribución de tensiones.

Al relacionar el factor de intensidad de tensiones con las propiedades del material se obtiene el factor de intensidad de tensiones crítico:

$$K_{IC} = \sqrt{2E'\gamma}$$

El criterio de avance de una grieta en términos del factor de intensidad de tensiones está dado por las siguientes condiciones:

- Si $K_I < K_{IC}$, no hay crecimiento de grieta (estable).
- Si $K_I = K_{IC}$, se produce un posible crecimiento cuasi-estático de grieta. Criterio de propagación.
- Si $K_I > K_{IC}$, crecimiento dinámico de grieta (inestable).

La relación entre la tasa de liberación de energía y el factor de intensidad de tensiones se puede expresar como:

$$G_{IC} = K_{IC}^2/E'$$

La fórmula anterior representa la energía específica necesaria para que se propague la grieta.

6.3. NECESIDAD DE APLICACIÓN DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA AL HORMIGÓN ESTRUCTURAL.

La Mecánica de la Fractura Elástico lineal sólo es aplicable para materiales elásticos, homogéneos y frágiles. El hormigón, debido a su base de cemento y a los defectos que en él se presentan, tiene un comportamiento que podríamos llamar "cuasi-frágil". Es por esto por lo que esta teoría no ha tenido éxito en las estructuras de hormigón.

En cambio, hay multitud de motivos por los que sería beneficioso incluir la teoría de la mecánica de la fractura aplicada al hormigón en los distintos códigos y normativas de hormigón, entre ellos los argumentados en un informe de un comité del código ACI presidido por Z.P. Bazant [10] los cuales se exponen brevemente a continuación:

- *Necesidad energética para el crecimiento de grieta.* La fractura o colapso de una estructura de hormigón se produce a través del crecimiento de grietas. Este crecimiento está asociado a un consumo de energía. Por lo tanto, desde el punto de vista de la integridad estructural es importante estudiar la propagación de grietas existentes mediante la aplicación de un criterio basado en términos energéticos como lo es la mecánica de la fractura.
- *Objetividad de los cálculos.* Es necesario que la energía de fractura (energía total disipada debido a la propagación de grietas) sea independiente de la carga máxima aplicada para que los cálculos realizados sean totalmente objetivos. Este hecho sólo se consigue mediante la introducción de la mecánica de la fractura en el modelo de cálculo numérico ya que especificando la energía disipada por unidad de longitud de grieta creada se induce a que ésta sea independiente de la subdivisión de los elementos y por tanto también de la carga máxima. Cosa que no ocurre con los cálculos basados en el método de elementos finitos (MEF), cuyos resultados dependen del tamaño de la malla elegida.
- *Ausencia de plastificación.* En el comportamiento de materiales dúctiles como pueden ser los aceros, se puede observar una zona de cadencia al final del tramo elástico. Microscópicamente se observa que el material no requiere aumento de tensión para que continúe deformándose. Este fenómeno no se produce o se produce en muy pequeño espacio en los materiales catalogados como frágiles.
- *Capacidad de absorción de energía y ductilidad.* Es necesaria la aplicación de la mecánica de la fractura para tener en consideración la energía total disipada durante el fallo de la estructura, la cual incluye la energía del comportamiento postpico.

- *Efecto tamaño.* El argumento más importante a favor del uso de la Mecánica de la Fractura en el hormigón es el llamado Efecto Tamaño. Efecto por el cual un material presenta diferente respuesta según sea el tamaño de la probeta ensayada. Este efecto influye principalmente en dos aspectos. El primero en la capacidad última del hormigón la cual disminuye a medida que el tamaño del espécimen crece, y en segundo lugar afecta a la capacidad cortante del material, disminuyendo también al aumentar el tamaño del espécimen.

6.4. MECÁNICA DE LA FRACTURA APLICADA AL HORMIGÓN ESTRUCTURAL.

Es importante el estudio de la fisuración en el hormigón, sobre todo en hormigones de altas prestaciones cuyo comportamiento a fractura difiere del comportamiento de un hormigón convencional, de forma que se pueda predecir la futura aparición y posterior propagación de grietas. Por lo tanto es necesaria la aplicación de algún modelo de la mecánica de la fractura al comportamiento en fractura del hormigón.

La Mecánica de la Fractura Elástico Lineal (MFEL) ha sido aplicada durante muchos años, pero esta teoría sólo es aplicable para materiales elásticos, homogéneos y frágiles. En el hormigón estructural, cuyo comportamiento es cuasi frágil debido a los defectos que presenta en su interior, esta teoría no ha tenido éxito. Por lo que aparece la necesidad de utilizar el criterio de energía mediante la teoría no lineal de Mecánica de la Fractura para estudiar el fenómeno de la fractura en el hormigón.

Como aparece en el libro *Mecánica de la Fractura aplicada al Hormigón* de Cifuentes H. y Medina F. [1], la mecánica de la fractura se basa en el estudio de los parámetros más importantes para la caracterización del comportamiento en fractura del hormigón, incluyendo la rama de ablandamiento completa. Así las propiedades mecánicas de fractura del hormigón más importantes son:

- *Energía de la fractura (G_F)*, es la cantidad de energía necesaria para la creación de una grieta de superficie unidad en el hormigón. Representa el área encerrada por la curva de comportamiento completa en tracción. Es la encargada de la creación y desarrollo de la ZPF. Define el comportamiento post-pico.

- *Resistencia a tracción (f_{ct})*, valor máximo admisible a tracción que delimita el inicio de la fisuración del hormigón (generación de la ZPF).

- *Módulo de deformación longitudinal (E_C)*, define el comportamiento pre-pico. Está relacionado con la pendiente del tramo inicial de la curva de comportamiento del hormigón.

Dichos parámetros son necesarios para el estudio del comportamiento en fractura del hormigón y son de difícil estimación en función únicamente de la geometría del problema y/o de algún otro parámetro mecánico relacionado. Normalmente, los códigos de diseño de estructuras de hormigón permiten la estimación de los parámetros mecánicos necesarios en función únicamente de la resistencia a compresión del hormigón, considerada como la propiedad fundamental. Sin embargo debido a la complejidad de los mecanismos desarrollados durante la zona de proceso de fractura y la influencia de las numerosas variables intervinientes, como la relación agua/cemento, tipo de cemento, tipo de árido, adiciones y aditivos empleados, etc., se hace necesaria la determinación experimental de estos parámetros si se quiere realizar un análisis exhaustivo y realista del comportamiento a fractura del hormigón.

6.5. METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FRACTURA EXPERIMENTALMENTE.

La definición exhaustiva del comportamiento en fractura del hormigón se basará en la obtención experimental de los parámetros antes descritos aplicando la Mecánica de la Fractura para elementos con comportamiento no lineal.

6.5.1. DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA DE FRACTURA.

La energía de fractura es uno de los parámetros de mayor importancia para el estudio del comportamiento en fractura del hormigón. Su determinación experimental se realiza, normalmente, a través de un ensayo a flexión¹ en tres puntos sobre una probeta prismática entallada.

Los apoyos y el utillaje de aplicación de la carga deben ser anti torsión, de manera que se eviten disipaciones parásitas por torsiones secundarias. El ensayo debe realizarse en una máquina dinámica servo-hidráulica con control en desplazamiento o apertura de la boca de la grieta (CMOD). Además de la medida de la carga, debe colocarse un transductor lineal para la medida del desplazamiento vertical (δ) en el punto de aplicación de la carga.

La entalla inicial se realizará mediante corte por sierra de disco una vez endurecido y curado el hormigón. Definimos como profundidad relativa de entalla (α):

$$\alpha = \frac{a}{D}$$

Ecuación 6.1. *Profundidad relativa de entalla.*

Siendo:

a: Longitud de entalla.

D: Canto de la viga.

Actualmente, existen unas recomendaciones de la asociación internacional RILEM sobre la manera de proceder en el ensayo y las dimensiones de las probetas que dan lugar al conocido método del trabajo de fractura RILEM. Este método detalla el procedimiento de obtención de la energía a

¹ Se define la realización del ensayo de flexión en tres puntos según norma en el Bloque II.

fractura sobre probetas entalladas de hormigón, con sección rectangular y sometida a ensayos de flexión en tres puntos. La energía de fractura obtenida, o más concretamente la densidad de energía de fractura o energía de fractura específica, se define como la cantidad de energía necesaria para crear una unidad de área de grieta. El área de la grieta se define como el área proyectada en un plano paralelo a la entalla inicial, lo que facilita su determinación especialmente en el caso de crecimientos de grietas tortuosos.

Las recomendaciones del método de RILEM [1, 11] se pueden resumir en las siguientes:

1. Las dimensiones de la viga serán elegidas en relación al tamaño máximo del árido, d_{max} . El canto de la viga será como mínimo $6d_{max}$. La relación entre la luz de los apoyos y el canto de la viga puede estar comprendida entre 4 y 8. La entalla de la viga, a , ocupará la mitad del canto de la misma siendo por tanto la profundidad relativa de entalla $\alpha = 0,5$.

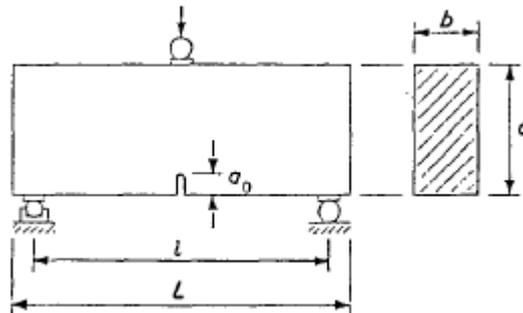


Figura 6.1. Geometría de la probeta cilíndrica preparada para el ensayo a flexión en tres puntos.

2. El ensayo debe ser realizado en una máquina que permita realizar el control en desplazamiento para asegurar un crecimiento estable de la grieta. Por este motivo, las máquinas de ensayo suelen ser máquinas que permitan un control dinámico de lazo cerrado.
3. El desplazamiento vertical en el punto central de la luz de la viga (δ) se medirá de manera continua en función de la carga P , hasta la fractura completa del espécimen.

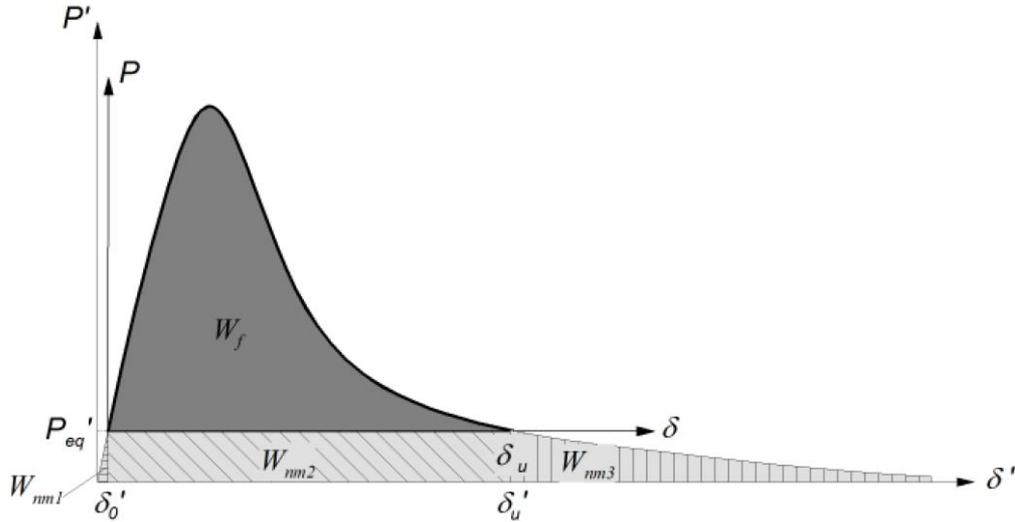


Figura 6.2. Curva $P - \delta$ típica de una probeta entallada de hormigón sometida a flexión en 3 puntos según el procedimiento RILEM TC-50.

4. Para la determinación de la energía de fractura del hormigón, es necesario determinar previamente el trabajo de fractura de la probeta. El trabajo de fractura total, W_{FT} , es la energía consumida por el hormigón durante la rotura completa de la zona de ligamento de la probeta (trabajo de fractura medido, W_F , y que corresponde al área encerrada por la curva $P - \delta$ medida) y debe incluir la compensación del peso propio (trabajo de fractura no medido W_{Fnm} , debe ser corregido para la obtención de la energía de fractura).

$$G_F = \frac{W_{FT}}{A_{lig}} = \frac{\int_0^{\delta_u} P d\delta + mg\delta_u}{B(D - a_0)}$$

Ecuación 6.2. Energía de fractura del hormigón.

Siendo δ_u la deformación última del ensayo realizado y P la carga aplicada.

6.5.2. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN.

La resistencia a tracción, f_{ct} , representa el valor máximo admisible a tracción para el material y establece el inicio de la aparición de fisuras y por tanto de la generación de la ZPF.

Gobierna la carga máxima del material obtenida en la curva $P - \delta$, así, existe una relación entre el valor de f_{ct} y la carga máxima obtenida en el ensayo a flexión en tres puntos, de forma que a mayores valores de la resistencia a tracción del material se obtendrán mayores valores de la carga máxima del ensayo.

Dependiendo del procedimiento experimental de obtención se considera la resistencia a tracción directa o indirecta.

La obtención de la resistencia a tracción directa, f_{ct} , (verdadera resistencia a tracción del hormigón) es complicado debido a los inconvenientes que presenta este tipo de ensayo. Por lo tanto se realiza el ensayo brasileño para la determinación de la resistencia a tracción indirecta.

El procedimiento consiste en la rotura por aplicación de cargas lineales diametralmente opuestas sobre una probeta cilíndrica. Estas cargas que se aplican sobre una pequeña banda de dimensiones normalizadas, provocan un estado de tracción indirecta que rompe la probeta en dos mitades idénticas.

Siendo P_u la carga que produce la rotura de la probeta en el ensayo brasileño de una probeta cilíndrica de dimensiones $D \times l$, el valor de la resistencia a tracción indirecta f_{cti} se obtiene:

$$f_{cti} = \frac{2P_u}{\pi D l}$$

Ecuación 6.3. *Resistencia a tracción indirecta.*

El resultado obtenido por uno u otro método es distinto, existiendo una relación entre ambos. Se considera $f_{ct} = \alpha f_{cti}$, donde α es un valor comprendido entre 0.65 y 0.9 para la mayoría de los casos.

6.5.3. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE DEFORMACIÓN LONGITUDINAL.

El módulo de deformación longitudinal del hormigón o módulo elástico, E_C , controla el comportamiento pre-pico del hormigón. Por lo que su determinación es importante para el estudio del comportamiento a fractura del hormigón.

La determinación precisa de E_C ha de realizarse experimentalmente, determinando la curva $\sigma - \varepsilon$ en un ensayo a compresión simple de una probeta de hormigón. El módulo de deformación longitudinal del hormigón se considera como el módulo secante correspondiente a una tensión del 45% de la resistencia a compresión. Para ello, será necesario realizar la medida de las deformaciones longitudinales de la probeta durante el ensayo mediante la colocación de un anillo especial con dos transductores de desplazamiento. Otra opción sería la colocación de bandas extensométricas directamente en el hormigón.

6.6. EFECTO TAMAÑO.

La energía de fractura obtenida según el procedimiento antes descrito es dependiente del tamaño de la probeta empleada en su obtención, son muchas las investigaciones realizadas que lo ratifican [12,13].

Este efecto tamaño que se produce en la energía de fractura RILEM tiene su explicación en la relación existente entre el tamaño de la zona de ligamento y la longitud de la zona de proceso de fractura (ZPF) ya que la longitud de la ZPF en el hormigón es del mismo orden que el tamaño de los elementos.

La energía de la fractura aumenta con el tamaño del espécimen, para una profundidad relativa de entalla idéntica (zona de ligadura). También se produce un aumento de la energía de fractura con la disminución de la profundidad relativa de entalla para un tamaño de espécimen constante. Esto quiere decir que influye tanto el tamaño de elemento como el tamaño de la zona de ligamento.

Una disminución de la relación entre la longitud de la ZPF y el tamaño de la zona de ligamento proporciona un aumento del valor de la energía de fractura.

En hormigones de alta resistencia, que presentan un comportamiento frágil, la ZPF es despreciable frente a la zona de ligamento, por lo tanto en estos casos se obtienen mayores valores de G_f .

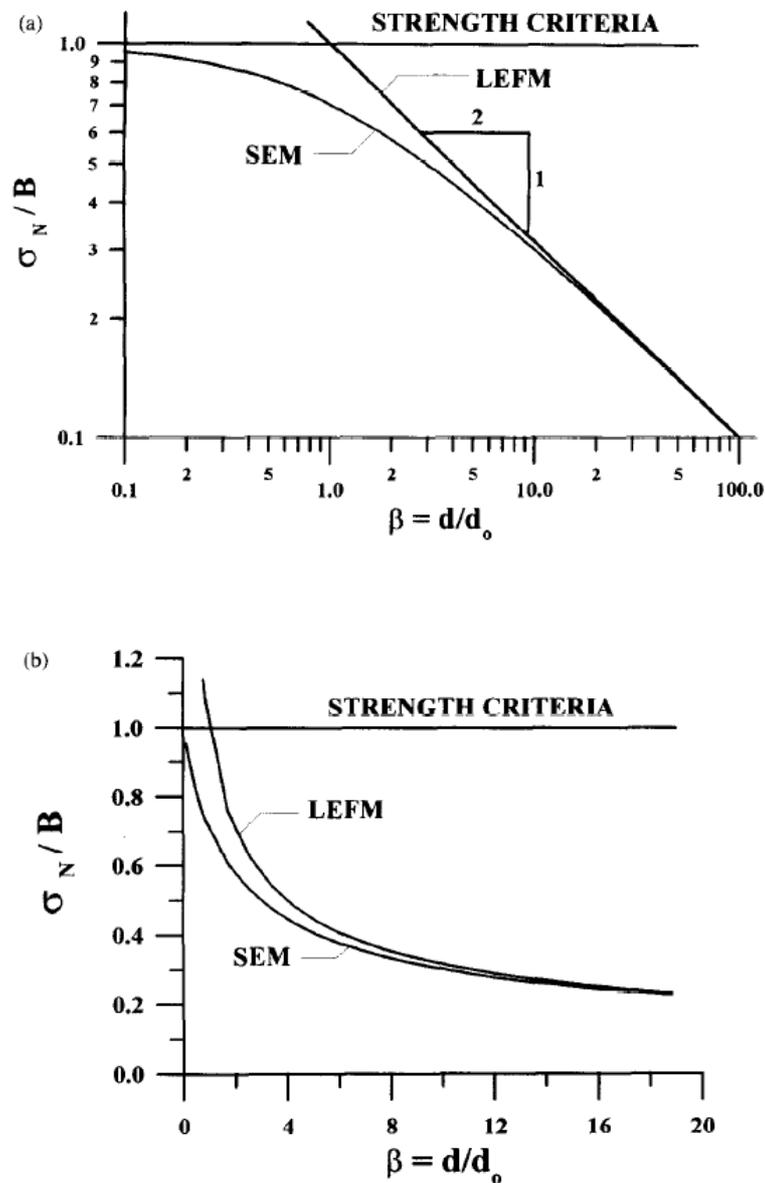


Figura 6.3. Ley de Efecto Tamaño de Bazant (a) modelo logarítmico y (b) lineal.

El criterio de resistencia (Strength Criteria) no predice ningún efecto tamaño mientras que la MFEL (LEFM) predice una fuerte dependencia con el tamaño.

Sin embargo, son muchos los investigadores que siguen utilizando el método de RILEM para obtener valores fiables de energía de fractura.

7. COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN A ALTA TEMPERATURA

7.1. INTRODUCCIÓN.

El hormigón sometido a los elevados gradientes térmicos, desarrollados típicamente en un incendio, muestra dos ventajas destacadas sobre otros materiales: es incombustible (a diferencia de la madera), y es un buen aislante al tener baja difusividad térmica (a diferencia del acero). Por lo tanto, dicho material proporciona unos niveles excepcionales de protección y seguridad en caso de incendio.

No obstante, es necesario tener en cuenta algunos problemas relacionados con la alta temperatura en el hormigón: el deterioro de sus propiedades mecánicas, a causa de

transformaciones físico – químicas que tienen lugar en el material durante el calentamiento y pueden suponer significativas pérdidas de resistencia además del fenómeno de “Spalling” (rotura superficial o desconchamiento), que implica la pérdida de material, reducción de las dimensiones de la sección y exposición de las armaduras a temperaturas excesivas [14-16].

Se puede afirmar que la rotura del hormigón se origina a partir de dos procesos simultáneos. El primero es un proceso termo-mecánico que se relaciona con los gradientes de dilatación térmica que se producen en la estructura. El segundo es un proceso termo-hidráulico que se asocia con la transferencia de masa en la red porosa (aire, vapor, agua), lo cual da lugar a un aumento de la presión y de su gradiente en los poros.

Como consecuencia de estos factores, las funciones de aislamiento térmico y capacidad portante de la estructura pueden estar comprometidas de forma relevante.

7.2. VARIACIÓN DE LAS PROPIERADES DEL HORMIGÓN A ALTA TEMPERATURA.

La resistencia al fuego es un concepto aplicable a los elementos estructurales y no propiamente al material, pero las propiedades del material afectan las características del elemento del cual forma parte.

Son muchos los factores (intrínsecos) que influyen a la resistencia del hormigón durante el calentamiento:

- Las transformaciones físico – químicas en la pasta de cemento.
- Las transformaciones en el agregado.
- La incompatibilidad térmica entre el agregado y la pasta de cemento.

Estas variables, que conciernen propiamente al material, están influenciadas por factores de naturaleza ambiental y del entorno:

- Nivel de temperatura.
- Velocidad de calentamiento.
- Carga aplicada.
- Condiciones externas, que influyen la pérdida de humedad en la superficie.

Este deterioro puede ser reducido mediante la elección de una adecuada dosificación de concreto, aspecto muy importante para incrementar las prestaciones del material.

A continuación se detalla la variación de las propiedades intrínsecas del hormigón con la temperatura según Kodur V. en uno de sus artículos [17].

7.2.1. PROPIEDADES TÉRMICAS DEL HORMIGÓN A ALTA TEMPERATURA.

Las propiedades térmicas dependientes de la temperatura en estructuras de hormigón son la conductividad térmica, el calor específico y la pérdida de masa.

Estas propiedades están influenciados significativamente por el tipo de agregado, la humedad específica, y la composición de la mezcla de hormigón.

7.2.1.1. Conductividad térmica.

La conductividad térmica del hormigón a temperatura ambiente está en el intervalo de 1,4 y 3,6 W / m ° K y varía con la temperatura.

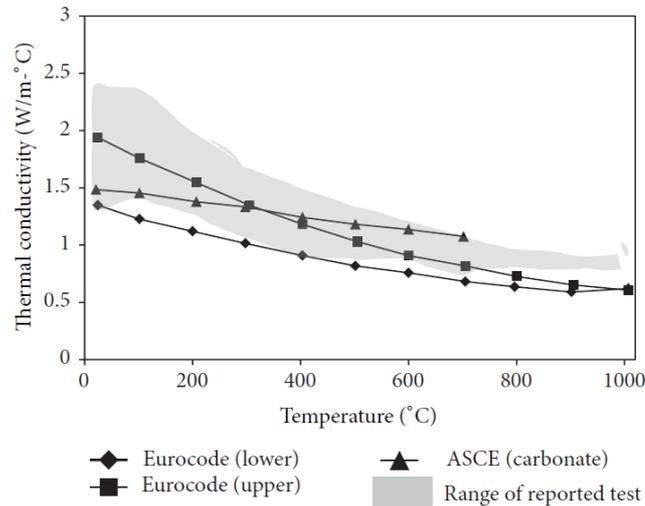


Figura 7.1. Variación de la conductividad térmica de un hormigón convencional en función de la temperatura.

La conductividad térmica, como se puede observar en la Figura 7.1, disminuye gradualmente con la temperatura y esta disminución depende de las propiedades de la mezcla de hormigón, del contenido de humedad y de la permeabilidad específicamente.

Esta tendencia de la conductividad térmica puede ser atribuida a la disminución del contenido de humedad con el aumento de temperatura.

La conductividad térmica del hormigón de alta resistencia es mayor que la del hormigón convencional debido a la baja relación de agua/cemento y el uso de diferentes aglutinantes. Generalmente, la conductividad térmica de HAR está en el intervalo entre 2,4 y 3,6 W / m ° K a temperatura ambiente.

La conductividad térmica para hormigones reforzados con fibras sigue una tendencia similar a la del hormigón en masa, por lo que se deduce que no hay ningún efecto significativo en la conductividad térmica con la adición de fibras en un rango de temperaturas entre 20-800°C.

7.2.1.2. Calor específico.

El calor específico es la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de un elemento para elevar su temperatura en una unidad.

Para el hormigón, el calor específico es sensible a diversas transformaciones físicas y químicas que tienen lugar en él a temperaturas elevadas: vaporización del agua a unos 100°C, disociación de Ca(OH)_2 en CaO y H_2O entre 400 y 500°C y la transformación de algunos agregados en cuarzo por encima de los 600°C. Por lo tanto, el calor específico es altamente dependiente del contenido de humedad y aumenta considerablemente con la relación agua/cemento.

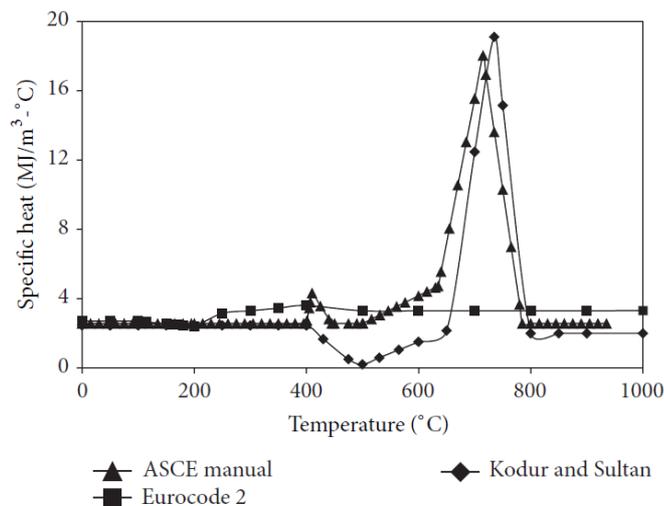


Figura 7.2. Variación del calor específico de un hormigón convencional en función de la temperatura.

El calor específico en hormigones de alta resistencia es menor en toda la gama de temperaturas entre 20-800°C.

La presencia de fibras de polipropileno también disminuye el calor específico del hormigón. La descomposición de fibras de p.p. a alta temperatura produce microcanales por los cuales se libera el vapor de agua; y por lo tanto, la cantidad de calor necesaria para la deshidratación del agua es menor, así su calor específico se reduce en el intervalo de temperaturas entre 600-800°C.

7.2.1.3. Pérdida de masa.

Se produce una pérdida de masa con el aumento de la temperatura debido a la pérdida de humedad.

El tipo de agregado al hormigón ejerce una gran influencia en la pérdida de masa a alta temperatura [21]. En la figura 7.3 se observa la variación de la masa de hormigón con la temperatura para hormigones hechos con áridos carbonatos y silíceos. Para temperaturas menores de 600°C la pérdida de masa es insignificante en ambos casos. A partir de esta temperatura para el hormigón con áridos silíceos sigue siendo insignificante la pérdida de masa, sin embargo, el hormigón con áridos carbonatos presenta una mayor pérdida de masa. Esto se atribuye a la disociación de la dolomita en conjunto carbonato alrededor de 600°C.

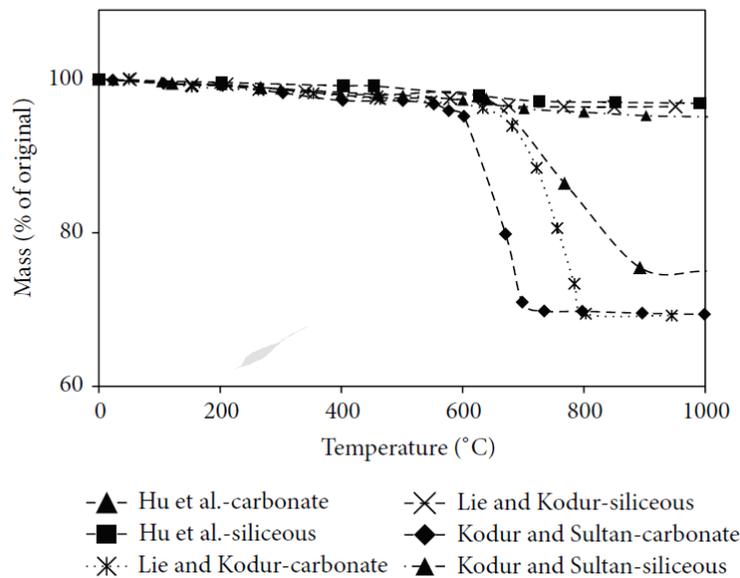


Figura 7.3. Variación de masa de un hormigón convencional en función de la temperatura para distintos tipos de agregados.

La resistencia del hormigón no ejerce influencia significativa en la pérdida de masa de éste con la temperatura, exhibiendo un HAR una tendencia similar a la de un hormigón convencional. La

pérdida de masa para hormigones reforzados con fibras también es similar.

7.2.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN EN ALTAS TEMPERATURAS.

Las propiedades mecánicas de interés en el diseño de resistencia al fuego son la resistencia a compresión, resistencia a tracción, módulo elástico y la relación tensión-deformación en respuesta a compresión.

Existen multitud de estudios sobre la variación de las propiedades mecánicas de diferentes tipos de hormigones a alta temperatura, mediante la realización de ensayos experimentales.

7.2.2.1. Resistencia a compresión.

Se representa en la Figura 7.4 la variación con la temperatura de la resistencia a compresión de un hormigón convencional (NSC) y en la figura 7.5 la de un hormigón de alta resistencia (HSC).

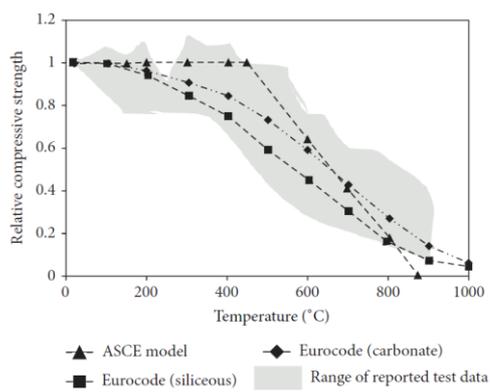


Figura 7.4. Variación de la resistencia a compresión de un hormigón convencional en función de la temperatura.

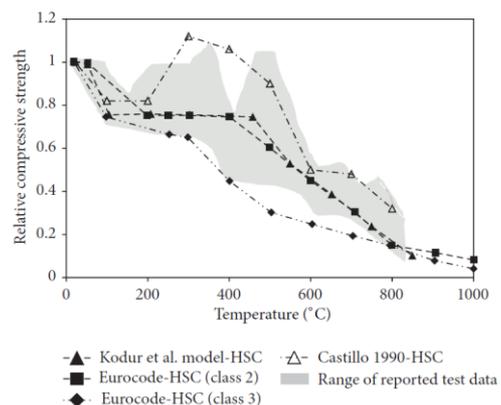


Figura 7.5. Variación de la resistencia a compresión de un hormigón de alta resistencia en función de la temperatura

Se observa que la variación de la resistencia a compresión con la temperatura es muy alta. La

adición de fibras mejora este comportamiento.

El uso de aglutinantes tales como la escoria o el humo de sílice dan mejores resultados a la hora de mejorar la resistencia a la compresión a temperatura ambiente debido a una microestructura más densa (HAR). Sin embargo la microestructura compacta es altamente impermeable y bajo alta temperatura se hace perjudicial, ya que no permite que la humedad contenida se escape y se produzca acumulación de presión en poros y un rápido desarrollo de microfisuras en hormigones de alta resistencia que conducen a un deterioro más rápido de la matriz y a que se produzcan desprendimientos.

7.2.2.2. Resistencia a tracción.

La resistencia a tracción del hormigón es mucho menor que la resistencia a compresión como ya se ha comentado anteriormente, pero no deja de ser una propiedad de relevada importancia ya que la formación de grietas generalmente es debida a las tensiones de tracción y, a su vez, el daño estructural se debe al crecimiento de estas microfisuras.

La figura 7.6 muestra la progresión de la resistencia a tracción indirecta de hormigones convencionales (NSC) y de alta resistencia (HSC) respecto a la temperatura.

La adición de fibras mejora la resistencia a la tracción como ocurre con la resistencia a compresión, debido al cosido de fisuras.

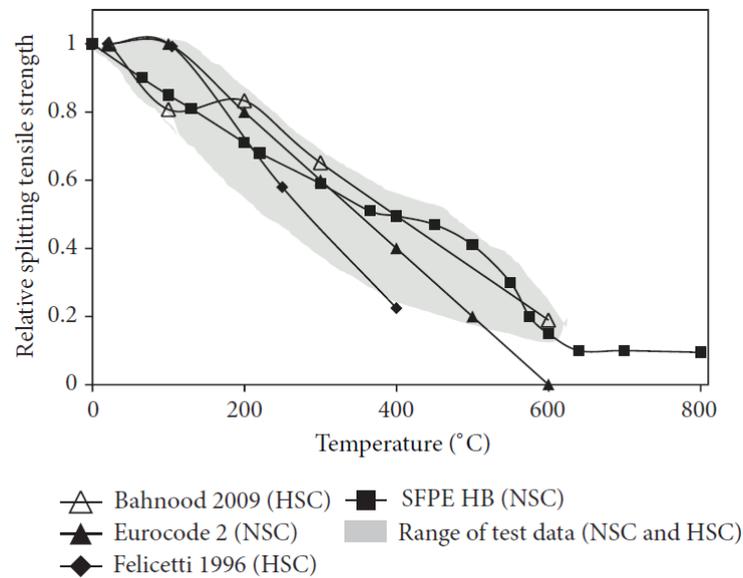


Figura 7.6. Variación de la resistencia a tracción del hormigón en función de la temperatura.

7.2.2.3. Módulo elástico.

El módulo elástico del hormigón a temperatura ambiente es variable según un amplio rango, el cual depende de la relación agua/cemento de la mezcla, la edad del hormigón, cantidad y naturaleza de los agregados [18].

El módulo elástico disminuye con el aumento de la temperatura, como se aprecia en la figura 7.7.

La degradación del módulo elástico tanto para hormigones convencionales como para hormigones de alta resistencia se debe a las tensiones térmicas excesivas y a los cambios físico-químicos en la microestructura del mismo.

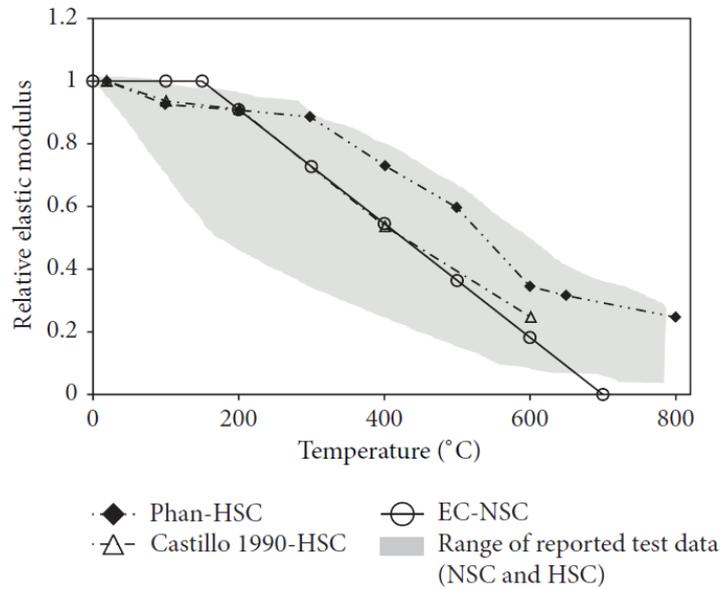


Figura 7.7. Variación del módulo elástico del hormigón en función de la temperatura.

7.2.2.4. Respuesta Tensión (MPa) - Deformación (mm).

A causa de una disminución de la resistencia a compresión y el aumento de la ductilidad del hormigón con la temperatura, la pendiente de la curva tensión - deformación disminuye, y con ella el módulo elástico.

Tanto hormigones convencionales como de alta resistencia exhiben una tendencia lineal seguida de una respuesta parabólica hasta el pico de estrés (donde se obtiene la carga máxima de pico), y por último un tramo postpico descendente antes de producirse el fallo.

Se observa en la Figura 7.8 la gran influencia que ejerce la temperatura en dichas respuestas. En hormigones reforzados con fibras la respuesta postpico es más dúctil.

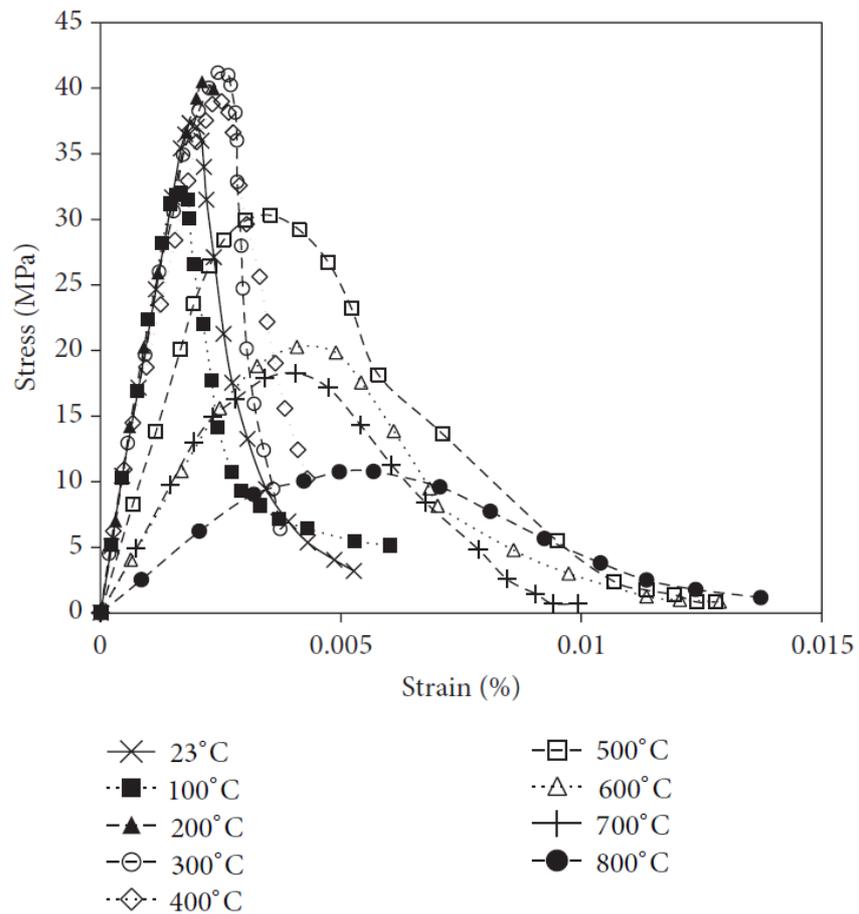


Figura 7.8. Variación de la respuesta a compresión del hormigón en función de la temperatura.

7.3. FENÓMENO DE SPALLING.

Cuando el hormigón es sometido a ambientes con carga térmica severa el aumento de la presión interna del agua sometida a temperaturas por encima de la de ebullición, genera tensiones locales elevadas que, en ocasiones puede producir una rotura explosiva. Este fenómeno es conocido como "spalling".

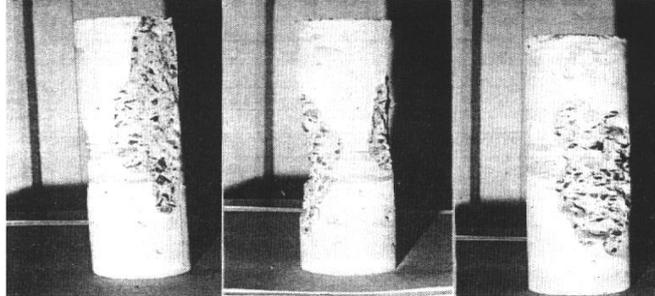


Figura 7.9. Probeta afectada por spalling.

Cuando el spalling afecta a las capas externas provocando desprendimientos del recubrimiento, suele llamársele “desconchado”. El desconchado es parte de la respuesta normal del hormigón frente a las altas temperaturas que se producen en un incendio.

Este efecto puede ser agrupado en cuatro categorías:

- desconchamiento del agregado.
- desconchamiento por explosión.
- desconchamiento de la superficie.
- desconchamiento en esquinas.

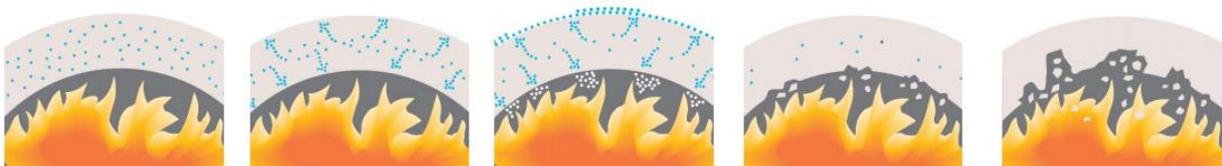
Las tres primeras pueden ocurrir durante los primeros 20-30 min en un fuego y están influenciados por el grado de calentamiento, mientras que la cuarta ocurre luego de 30-60 min de fuego y está influenciada por la temperatura máxima. El desconchamiento de superficie y el desconchamiento por explosión son violentos, siendo el desconchamiento por explosión el más grave de todos.

El hormigón de alta resistencia es más propenso a desprenderse explosivamente y a experimentar múltiples desconchamientos que el hormigón de resistencia normal ya que se crea mayor presión en los poros durante el calentamiento por el aumento de densidad y menor porosidad de su mezcla. La extremadamente alta presión de vapor generada durante la exposición al fuego, queda retenida en el interior de la matriz no permeable generando tensiones de tracción en el material.

Los mecanismos de desconchamiento por explosión pueden agruparse en tres:

- *Desconchamiento por presión en los poros (Figura 7.10):* Los principales factores que influyen son la permeabilidad del hormigón (siendo ésta menor en HAR), el nivel de saturación de agua inicial, y el grado de calentamiento.
- *Desconchamiento por tensión térmica:* Los materiales cerámicos pueden experimentar desconchamiento por explosión debido a tensiones térmicas excesivas generadas por el rápido calentamiento. El hormigón caliente genera gradientes de temperaturas que inducen fuerzas a compresión cerca de la superficie caliente y fuerzas a tracción en las regiones más frías.
- *Desconchamiento por tensión térmica y presión de poros combinadas:* El desconchamiento por presión en los poros y el desconchamiento por tensión térmica, influenciados por cargas externas, actúan individualmente o combinados, dependiendo del tamaño de la sección, el tipo de hormigón y el contenido de humedad.

En el hormigón de resistencia normal y el hormigón de alta resistencia el desconchamiento por presión en los poros es el más dominante.



1. El vapor de agua es un componente estable e integral del hormigón con carácter previo a su calentamiento.
2. Con el fuego, el vapor de agua emigra a través de capilares mientras sube la temperatura.
3. El vapor de agua emerge como vapor en la parte caliente y como líquido en la parte fría.
4. El hormigón se deseca y comienza a "desconcharse".
5. El desconchamiento se hace más grave a medida que el fuego avanza, dejando expuestos los refuerzos.

Figura 7.10. Proceso del efecto spalling o desconchamiento del hormigón por presión en los poros.

Adicionalmente, el hormigón presenta una amplia variabilidad en la temperatura para la cual este fenómeno comienza a manifestarse. Esta temperatura es función del contenido en agua, porosidad de la matriz, velocidad de calentamiento y temperatura máxima alcanzada. En la figura 7.11 se observan los procesos físico-químicos que se producen en el hormigón con el aumento de la temperatura.

La temperatura del aire durante un incendio excede los 900°C. Sin embargo, las buenas propiedades de aislamiento del hormigón indican que el declive de la temperatura es largo y sólo la temperatura de las capas exteriores se incrementa de manera significativa, superando los 300°C, mientras la temperatura del hormigón interior se mantiene comparativamente baja.

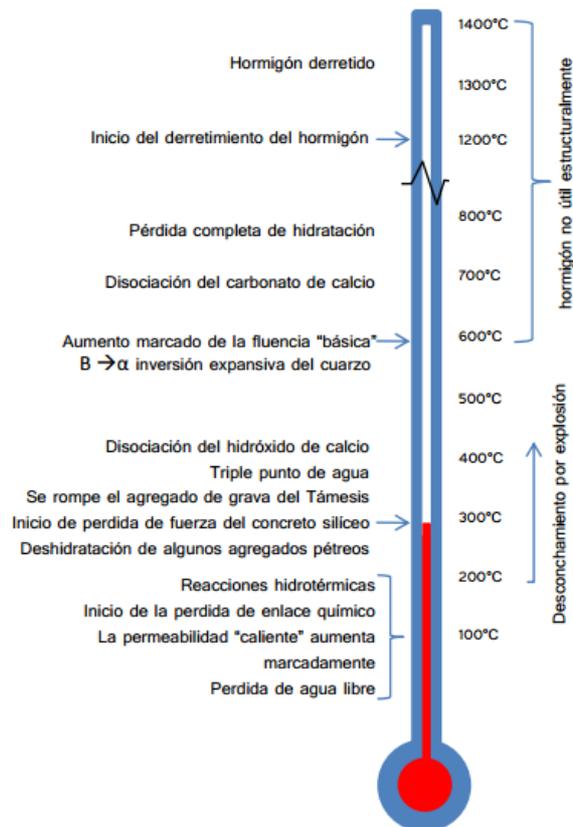


Figura 7.11. Procesos físico-químicos en el hormigón con base en cemento Portland, como material, mientras aumenta la temperatura.

7.4. FIBRAS DE POLIPROPILENO PARA LA PROTECCIÓN PASIVA DEL HORMIGÓN CONTRA INCENDIOS.

El principal objetivo que debe cumplir cualquier sistema de protección pasiva del hormigón contra el fuego es conseguir que, si se produce un incendio, las características mecánicas de los elementos estructurales de hormigón se conserven estables durante el proceso de evacuación y la actuación de los bomberos (por ejemplo en un túnel), evitando la pérdida de vidas humanas. Por tanto, el sistema de protección debe actuar durante los primeros momentos del incendio.

El único método efectivo hasta ahora es el uso de barreras térmicas, protegiendo la superficie del hormigón del fuego. Es sólo que en los últimos años, la utilización de fibras de polipropileno está siendo considerada para su uso en las mezclas de hormigón con el fin de aumentar la permeabilidad durante calentamientos sobre los 160°C, reduciendo así las presiones en los poros y el riesgo de desconchamiento.

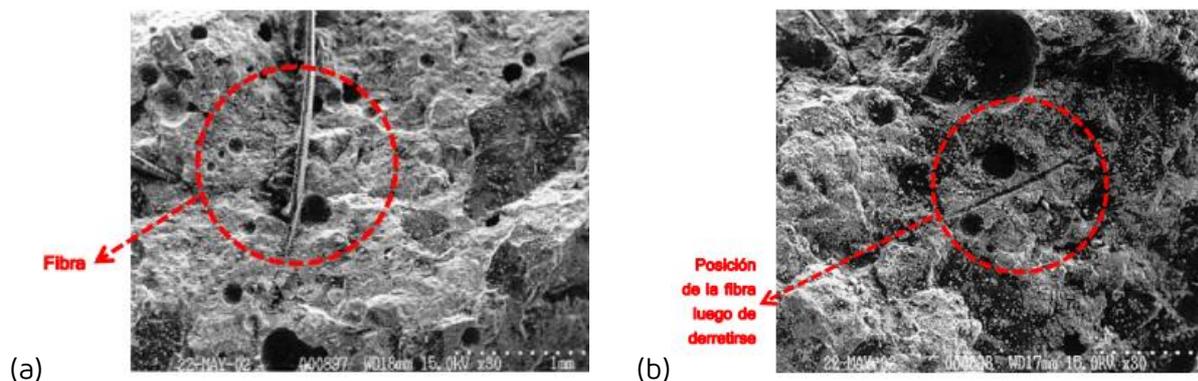


Figura 7.12. Fibra de polipropileno en una matriz de hormigón antes del fuego (a) y el hueco que deja al derretirse (b).

A temperaturas de 400°C, el agua de hidratación dentro del hormigón se libera, dando como resultado cambios microestructurales. Al incluir fibras de polipropileno, éstas desaparecen a alta temperatura, se funden a unos 160°C, creando huecos en el hormigón, favoreciendo la liberación

de la presión que provoca el vapor. Gracias a estos huecos la reacción explosiva del spalling se reduce sustancialmente.

En el proyecto que nos ocupa se estudia este efecto. Desde el punto de vista industrial, una dosificación de la fibra de 2 kg/m^3 , para una longitud de fibra de 10 a 20mm y un diámetro de 50 a 200 μm son generalmente adoptados para el spalling del H.A.R.

BLOQUE II.
CAMPAÑA EXPERIMENTAL.

8. DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

8.1. INTRODUCCIÓN.

En el presente bloque se explica todo el proceso de fabricación del hormigón autocompactante de alta resistencia (H.A.R.), con y sin refuerzo de fibras, desde el cálculo de su dosificación y pruebas previas, hasta la fabricación de las probetas, desencofrado y curado. Además se justifica el número y dimensiones de probetas fabricadas de acuerdo a los resultados que se pretenden obtener.

Esta fase se realiza en el Laboratorio de Construcción del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros perteneciente a la

Universidad de Sevilla (L1-ETSI-US).

Para la Fabricación del Hormigón es muy importante la proporción de sus componentes, que deberán ser los adecuados a los esfuerzos a los cuales estará sometido.

El objetivo de partida es la optimización de los componentes de la mezcla. Obteniendo así el máximo rendimiento de cada uno de ellos, es decir, conseguir la máxima resistencia al mínimo coste.

Las relaciones agua/cemento tan bajas a las que es necesario llegar para conseguir determinados niveles de resistencia, obliga a que en la selección de materiales se dirija fundamentalmente a elegir aquellos que proporcione la máxima resistencia con la mínima demanda de agua.

8.2. MATERIALES A UTILIZAR.

Como ya hemos comentado, el hormigón o concreto es un material compuesto, formado esencialmente por un aglomerante (cemento) al que se añade partículas o fragmentos de un agregado (áridos), agua y aditivos específicos (en España se siguen los requisitos de la UNE 83.001:2000 y de la EHE-08 para la composición del hormigón convencional).

En estado fresco, es una mezcla fluida que se puede moldear aún después de algunas horas de haber sido elaborada, hasta que se presenta el fraguado inicial del hormigón a partir del cual comienza a endurecer, ganando resistencia conforme avanza el tiempo.

Es evidente que las propiedades del hormigón, tanto en estado fresco como en estado endurecido, dependen fundamentalmente de las características de cada uno de sus componentes, de la relación agua/cemento y de la calidad y naturaleza de los agregados.

El H.A.R. autocompactante está formado en principio por los mismos materiales que el hormigón convencional, pero requiere además que se le añadan ciertos aditivos y adiciones minerales. A continuación se citan dichos materiales.

8.2.1. CEMENTO.

El cemento es un material pulverulento que por sí mismo no es aglomerante, y que mezclado con agua, al hidratarse se convierte en una pasta moldeable con propiedades adherentes, que en pocas horas fragua y se endurece tornándose en un material de consistencia pétreo. El cemento consiste esencialmente en silicato cálcico hidratado (S-C-H), este compuesto llamado *gel* es el principal responsable de sus características adhesivas.

Se usará cemento Portland CEM II/B-L 32,5 N por ser el que se encuentra disponible en el laboratorio. Es un cemento de tipo II, esto indica que posee algunos aditivos. Además es de resistencia inicial ordinaria, N, esto indica la resistencia mecánica a la compresión a los 2 días o a los 7 días. Las características químicas, físicas y mecánicas de este cemento son:

	Especificaciones según UNE-EN 197-1
COMPOSICIÓN DEL CEMENTO	
Clinker (%)	65-79%
Puzolanas naturales (%)	21-35%
Componentes minoritarios (%)	≤ 5%
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	
Contenido en Sulfatos (%)	≤ 3.5%
Contenido en Cloruros (%)	≤ 0.1%
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Inicio de fraguado	≥ 75 min
Fin de fraguado	≤ 12 h
Estabilidad en volumen	≤ 10 mm
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	
Resistencia a compresión a 7 días	≥ 16 MPa
Resistencia a compresión a 28 días	≥ 32.5 MPa ≤ 52.5 MPa

Tabla 8.1. Datos técnicos CEM II/B-L 32,5 N.

No es lo mismo, ni debe confundirse la resistencia del cemento con la del hormigón, pues la del cemento corresponde a componentes normalizados y la del hormigón dependerá de todos y cada

uno de sus componentes. Pero si el hormigón está bien dosificado a mayor resistencia del cemento corresponde mayor resistencia del hormigón.



Figura 8.1. Aspecto del cemento utilizado.

8.2.2. AGUA.

El agua de amasado interviene en las reacciones de hidratación del cemento. La cantidad de la misma debe ser la estricta necesaria, pues la sobrante que no interviene en la hidratación del cemento se evaporará y creará huecos en el hormigón disminuyendo la resistencia del mismo.

Durante el fraguado y primer endurecimiento del hormigón se añade en agua de curado para evitar la desecación y mejorar la hidratación del cemento.

El agua utilizada será la del sistema de riego. No hay restricciones para el tipo de agua.

8.2.3. ÁRIDOS.

La naturaleza de los áridos y su preparación serán tales que permitan garantizar la adecuada resistencia y durabilidad del hormigón, así como las restantes características.

Los áridos se componen de grava y de arena. Se entiende por arena o árido fino, al árido o fracción del mismo que pasa por un tamiz de 5 mm de luz de malla; se entiende por grava o árido grueso, al que resulta retenido por dicho tamiz.

Se tendrán dos tipos de áridos de distintos tamaños: grava (tamaño mayor) y arena (tamaño menor).

8.2.3.1. Grava.

Se utilizará grava de machaqueo rodada.

Los áridos de machaqueo suelen estar rodeados de polvo de machaqueo que supone un incremento de finos al hormigón, precisa más agua de amasado y darán menores resistencias por lo que suelen lavarse. Aunque en nuestro caso, se tamizarán para obtener tanto un tamaño máximo (20 mm) de grava como un tamaño mínimo (2mm). Así, por el tamiz de menor apertura, se filtrará la mayor parte de finos que pueda contener la grava.



Figura 8.2. Máquina de tamizado.



Figura 8.3. Grava utilizada.



Figura 8.4. Finos (<2mm) desechados.



Figura 8.5. Grava gruesa (>20mm) desechada.

8.2.3.2. Arena.

Para estudiar la dosificación del hormigón a fabricar es necesario conocer la granulometría de las arenas disponibles. Para ello se realiza un análisis granulométrico mediante tamices normalizados. Pesando la cantidad de material retenido en cada uno de ellos se obtiene la curva granulométrica. A partir de ésta se realiza un estudio de tamaño de partículas.



Figura 8.6. Tamices normalizados.



Figura 8.7. Pesado del material retenido en cada tamiz.



Figura 8.8. Finos de fondo.

Se utilizan distintos tipos de arena:

- Arena Silícea fina 0/2.



Figura 8.9. Aspecto de la arena silícea.

DIAMETRO(mm)	MASA DE SUELO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO	PORCENTAJE QUE PASA
2	1	0,17%	99,83%
1	22	3,67%	96,17%
0,5	209	34,83%	61,33%
0,25	278	46,33%	15,00%
0,125	78	13,00%	2,00%
0,063	11	1,83%	0,17%
FONDO	2	0,33%	

MASA TOTAL	600
------------	-----

Tabla 8.2. Granulometría de la arena silícea fina.

- Arena Silícea 0/4.



Figura 8.10. Aspecto de la arena silícea 0/4.

DIAMETRO(mm)	MASA DE SUELO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO	PORCENTAJE QUE PASA
2	145	24,17%	75,83%
1	101	16,83%	59,00%
0,5	163	27,17%	31,83%
0,25	119	19,83%	12,00%
0,125	47	7,83%	4,17%
0,063	17	2,83%	1,33%
FONDO	5	0,83%	

MASA TOTAL	600
------------	-----

Tabla 8.3. Granulometría de la arena silícea 0/4.

- Arena Silíceo 0/4 tamizada.

Durante el proceso de fabricación la arena Silíceo utilizada se encontrará tamizada, con un tamaño máximo de árido de 2 mm.

DIÁMETRO(mm)	MASA DE SUELO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO	PORCENTAJE QUE PASA
2	0	0,00%	100,00%
1	101	22,20%	77,80%
0,5	163	35,82%	41,98%
0,25	119	26,15%	15,82%
0,125	47	10,33%	5,49%
0,063	17	3,74%	1,76%
FONDO	5	1,10%	
MASA TOTAL	455		

Tabla 8.4. Granulometría de la arena González tamizada.

- Arena caliza (blanca).

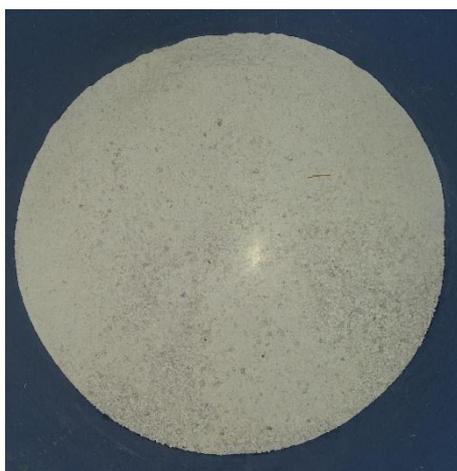


Figura 8.11. Aspecto de la arena caliza.

DIAMETRO(mm)	MASA DE SUELO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO	PORCENTAJE QUE PASA
2	69	11,50%	88,50%
1	159	26,50%	62,00%
0,5	126	21,00%	41,00%
0,25	104	17,33%	23,67%
0,125	72	12,00%	11,67%
0,063	55	9,17%	2,50%
FONDO	14	2,33%	

MASA TOTAL	600
------------	-----

Tabla 8.5. Granulometría de la arena caliza.

A continuación se representan las curvas granulométricas de los cuatro tipos de arenas a utilizar.

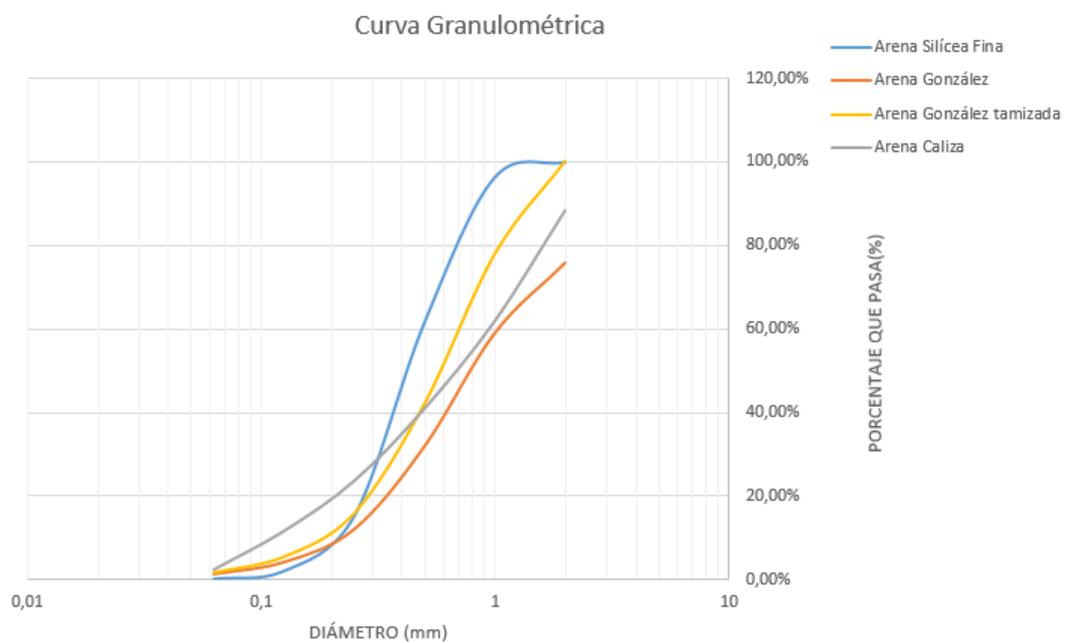


Figura 8.12. Curva granulométrica de la arena silícea fina (azul), arena González (naranja), arena González tamizada (amarillo) y arena caliza (gris).

8.2.4. SUPERPLASTIFICANTE O SUPERFLUIDIFICANTE.

Los plastificantes son aditivos, o sea, productos químicos que, introducidos en pequeñas cantidades en la mezcla, mejoran algunas de las características del hormigón como: facilitar la puesta en obra, regular su proceso de fraguado y endurecimiento, aumentar la durabilidad y trabajabilidad, etc.

Permiten la reducción del agua necesaria en la masa gracias a la acción lubricante y dispersora sobre los granos de cemento.

El efecto dispersante de los aditivos superplastificantes se logra gracias a la adsorción de éstos sobre la partícula de cemento y su posterior orientación. Los aditivos superplastificantes están basados en compuestos orgánicos con grupos ionizados que poseen carga eléctrica, que una vez orientados, crean una densidad de carga local y de idéntico signo sobre las partículas de cemento, que de este modo, en lugar de tender a flocular, se repelen entre ellas originando el fenómeno de dispersión (dispersión inducida por un efecto electrostático).

La magnitud del efecto dispersante depende de la densidad de carga que el aditivo es capaz de inducir sobre la partícula de cemento. Esto depende de varios factores, pero en general se relacionan con la capacidad de adsorción del aditivo sobre el cemento y su punto de saturación (que depende tanto de la composición y finura del cemento como del tipo de aditivo) [19].

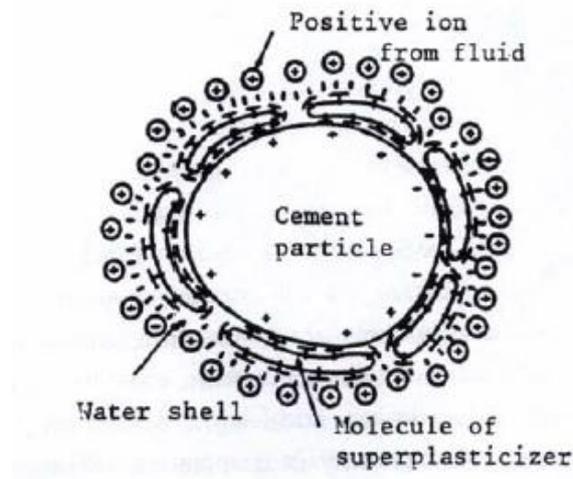


Figura 8.13. Molécula de superplastificante en torno a un grano anhidro de cemento.

Los plastificantes pueden retrasar ligeramente el fraguado y el primer endurecimiento. Para paliar estos efectos indeseables, aparecen los superplastificantes cuya actividad es aún más energética, permiten una reducción del cociente agua/cemento de hasta en 30 %, respecto el 5 % típico de los plastificantes normales.

Son de especial importancia en los hormigones con adición de humo de sílice, debido a la finura de éste, es necesaria más agua de amasado, por ello se añaden superplastificantes que reduzcan la cantidad de agua necesaria.



Figura 8.14. Preparación del superplastificante: pesada.



Figura 8.15 Adición del superplastificante con la última parte de agua añadida.

Durante la fabricación se utilizan dos tipos de superplastificantes:

- ✓ SIKA VISCOCRETE 20 HE proporcionado por la empresa Sika S.A.U.

DATOS TÉCNICOS	
Función principal	Aditivo de Hormigón Reductor de Agua/ Superplastificante.
Usos	Especialmente adecuado para la confección de hormigones de altas resistencias iniciales, hormigones con gran necesidad de reducción de agua y muy alta fluidez.
Estado	Líquido.
Densidad	1,09 kg/l (+20°C)
PH	4,5 ±1
Viscosidad	Ca.145 MPas a + 23°C
Color	Líquido marrón ligeramente transparente.
Norma UNE	UNE-EN 934-1 (T-3.1 y T-3.2)
Contenido máximo en cloruros	<0,1%
Contenido máximo en alcalino	<2,0%
Comportamiento a la corrosión	Sólo contiene componentes del capítulo A.1 UNE-EN 934-1:2008
Modo y precauciones de empleo	Se añadirá al agua de amasado o a la amasadora directamente al mismo tiempo que el agua. Se recomienda batir la mezcla durante 1 minuto.

Tabla 8.6. Datos técnicos SIKA VISCOCRETE 20 HE.

- ✓ GLENIUM SKY 549 proporcionado por la empresa BASF Construction Chemicals España, S.L

DATOS TÉCNICOS	
Función principal	Superplastificante/ Reductor de agua de alta actividad
Función secundaria	--
Efecto secundario	Riesgo de disgregación a dosis elevada.
Estado	Líquido.
Densidad	1,056±0,02 g/cm ³
Color	Turbio pardo claro.
Norma UNE	EN 934-2 (T3.1/T3.2)
Contenido máximo en cloruros	<0,1% (UNE-EN 480-10)
Contenido máximo en alcalino	1,6% (UNE-EN 480-12)
Comportamiento a la corrosión	No contiene sustancias que favorezca la corrosión.
Dosificación	Intervalo de eficacia: 0,6-1,2% sobre peso de cemento.
Modo y precauciones de empleo	Adicionar con la última parte del agua del amasado. No añadir sobre la masa seca.

Tabla 8.7. Datos técnicos GLENIUM SKY 549.

8.2.5. MICROSÍLICE O HUMO DE SÍLICE (HS).

La microsíllice (o humo de sílice, sílica fume) se define según ACI 116R como un "muy fino y no cristalino sílice producido en hornos de arco eléctrico como un subproducto de la producción de silicio o de aleaciones elementales que contienen silicio". Es un mineral compuesto de dióxido de silicio amorfo y ultrafino, que resulta del proceso de obtención de ferrosilicio o silicatos, involucrando la reducción en hornos de arco eléctrico a temperaturas superiores a 2000°C.

Debido a su extrema finura además de su contenido en sílice, tiene un importante papel en las reacciones internas de la pasta de hormigón. Hoy día es un componente usual de los hormigones de alta resistencia.

Al ser tan pequeñas las partículas, estas actúan como un *filler* llenando los espacios vacíos en la pasta de cemento haciendo que el hormigón tenga mayores propiedades adherentes, creando

mayor compacidad a la vez que brinda mayor fluidez a la mezcla. Además, ayuda a reducir la exudación de agua a la superficie y proporciona reducciones significativas en la permeabilidad del hormigón, incrementando con ello la durabilidad del mismo (resistencia a los agentes agresivos). Su uso hace que la dosificación pase de un cociente A/C de 0,5 a valores inferiores a 0,3 (uno de los factores sobre el que se debe actuar para obtener hormigones de altas prestaciones) [20].

En cuanto a la resistencia del hormigón se han determinado aumentos significativos desde 20 a 50%, obteniendo mayores beneficios con el uso de súper plastificantes.

Los contenidos normales de microsilíce varían entre el 5 y el 15% en peso en el cemento, en función de los requisitos de resistencia y trabajabilidad deseados.

El humo de sílice utilizado posee los siguientes datos técnicos:

DATOS TÉCNICOS	
Aspecto físico	Polvo color Grisáceo
Densidad, 20°C	2.1 – 2.4 g/cm ³
Contenido SiO ₂	90 % aproximadamente
Superficie Específica	15000 – 20000 m ² /g
Granulometría	90 % < 0.0001 mm
Cloruros	< 0.1 %
Solubilidad en agua	Nula

Tabla 8.8. Datos técnicos del humo de sílice utilizado.

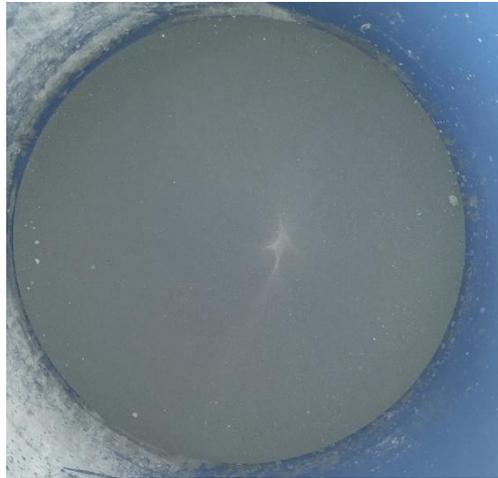


Figura 8.17. Aspecto del humo de sílice utilizado para la fabricación de probetas.

8.2.6. FIBRAS DE POLIPROPILENO.

Se usarán fibras de dos longitudes distintas, ambas de GEOTEXAN, cuyas propiedades principales son:

DENOMINACIÓN	ESPESOR (dtex)	LONGITUD (mm)	TENACIDAD (cN/tex)	ELONGACIÓN (%)
G2A	8.9	6	50	75
G2C	8.9	24	50	75

Tabla 8.9. Fibras de polipropileno.

Como se observa en la tabla 8.9 las propiedades de ambas fibras son exactamente iguales salvo la longitud (fibras cortas de 6 mm y fibras largas de 24 mm), para que así pueda realizarse el estudio de la influencia de este parámetro exclusivamente.



Figura 8.18. Comparación de las longitudes de fibras con una moneda.

9. ESTUDIO DE DOSIFICACIÓN Y FABRICACIÓN

9.1. INTRODUCCIÓN.

La campaña experimental se realiza en dos fases:

- FASE I: El objetivo de esta primera fase es la búsqueda de una correcta dosificación para obtener las características mecánicas que se desean para un hormigón de altas prestaciones como el aquí estudiado. Para ello se realizan ensayos de caracterización de un hormigón autocompactante en estado fresco. Una vez encontrada la dosificación más óptima se comienza la fabricación de las probetas necesarias para realizar dicho estudio. En este capítulo se describe la metodología seguida para la fabricación del hormigón.

- FASE II: En la segunda fase de la campaña experimental se realiza la adecuación de probetas para ejecutar todos los ensayos para la correcta caracterización del material y estudio de la influencia de la temperatura, del tiempo de exposición a la misma y la influencia de la adición de fibras.

9.2. DOSIFICACIONES.

El diseño de hormigón autocompactante requiere un compromiso entre dos objetivos contrapuestos. Por un lado debe ser lo suficientemente fluido para asegurar que llenará el encofrado bajo su propio peso. Esto se consigue mediante el uso de superplastificantes. Por otra parte debe ser una mezcla estable para evitar la segregación en estado fresco.

Lo segundo es alcanzado con una selección exhaustiva del tipo y cantidad de cemento, así como los aditivos que sustituyen el cemento (como el humo de sílice en este caso). También es necesario encontrar un equilibrio adecuado entre sólidos y líquidos en la mezcla, limitando el volumen de árido grueso y mediante una baja relación agua/finos [21].

La adición de fibras mejora las propiedades mecánicas y la ductilidad del hormigón. Sin embargo, las fibras deterioran en gran medida la trabajabilidad debido a su forma alargada y su gran área superficial. Por lo tanto, la cantidad de fibra que se puede añadir a una mezcla de hormigón autocompactante se limita y depende del tipo de fibra utilizado y de la dosificación del hormigón. El aporte máximo de fibras debe determinarse de tal forma que cause la menor disminución de la trabajabilidad, mientras mantenga un buen flujo y la capacidad de paso. En este caso, se toma una cantidad de 1200 g/m³ dosificación habitual.

Actualmente, no existe una metodología única para dosificar un HAR autocompactante a nivel mundial. Diversos son los investigadores que se destacan en la literatura a este nivel, con propuestas de metodologías para la obtención de mezclas estables. En el presente proyecto se parte de las dosificaciones propuestas por Karihaloo B.L. [21-23] (Tabla 9.1).

Constituents	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5	Mix 6	Mix 7	Mix 8
Cement: kg	210	230	294	500	500	500	543.5	543.5
Micro-silica: kg	—	—	—	75	75	75	214	214
Ground granulated blast furnace slag: kg	151.3	151.9	98	—	—	—	311.5	311.5
Limestone	229.1	210.3	176	200	105	200	—	—
Coarse aggregates: kg (crushed limestone) < 10 mm	839.3	842.6	896.3	833	990	833	—	—
Sand < 2 mm	713.6	716.4	732.6	700	660	700	—	—
Quartz sand 9–300 μm : kg	—	—	—	—	—	—	470	470
Quartz sand 250–600 μm : kg	—	—	—	—	—	—	470	470
Water: kg	203.3	190.9	196	138	133.5	138	188	188
Fibres (30 mm long with crimped ends, vol. fraction)	—	—	—	—	—	0.5%	—	2.5%
Superplasticiser/water	0.009	0.012	0.017	0.14	0.12	0.14	0.28	0.28
Water/binder	0.56	0.55	0.5	0.24	0.23	0.24	0.18	0.18
Flow spread: mm	710	700	680	805	800	760	910	850
T_{500} : s	2.42	2.65	2.35	2.2	2.88	3	3	3
T_{200} : s	0.45	0.51	0.36	0.35	0.5	1.88	0.3	1.9
T_{400} : s	0.95	1.04	0.8	0.76	1.02	5.1	0.75	5.6
Level-off: s	8.36	9.26	6.8	7.23	9.2	38	0.95	54
Compressive strength: MPa	35	45	60	80	100	100 ^a	140	160 ^b

^a Mix with 0.5% volume fraction of steel fibres.

^b Mix with 2.5% volume fraction of steel fibres.

Table 1. The mix constituents of normal strength SCC (mix 1, mix 2, mix 3), SCHPC (mix 4, mix 5), SCHPFRC (mix 6), SCUHPC (mix 7) and SCUHPFRC (mix 8) (note in the descriptive mix acronyms, FR represents fibre-reinforced)

Tabla 9.1. Dosificaciones propuestas por Karihaloo B.L. para distintos tipos de hormigones clasificados según su resistencia a compresión (MPa).

Para obtener un hormigón de alta resistencia autocompactante tomamos Mix 4 como referencia, ajustándolo a un volumen adecuado de fabricación (D1). Tomando exactamente la misma dosificación que propone Karihaloo se evidencia la necesidad de adición de un mayor volumen de agua y superplastificante. Este hecho puede ser debido a las dimensiones de la hormigonera (de eje horizontal) y a la escasa humedad de ésta, quedando los finos inicialmente adheridos a las paredes de la misma. Esta dosificación resulta ser no autocompactante, tras realizarle el ensayo de extensión de flujo.

Se realizan dos dosificaciones similares, D2 y D3, modificando los tipos y cantidades de áridos de fabricación. Para la segunda dosificación se elimina la arena caliza 2/4 y se añade mayor cantidad de finos, arena caliza 0,5/1,5, y de áridos gruesos, grava caliza 4/8. La necesidad de adición de

agua es menor en este caso. Por el contrario, para la realización de la tercera dosificación se ejecuta un cambio de materiales, utilizando para su fabricación como árido fino arena caliza blanca y arena silícea, y como árido grueso grava silícea de machaqueo tamizada (tamaño máximo de grano: 20 mm). Ambas dosificaciones resultan no ser autocompactantes.

Además, al realizar el desencofrado a las 24 h, las probetas correspondientes a D3 siguen blandas. La causa puede ser debida a que posee mucha agua retenida en los finos. La cara superior de las probetas se encuentra con mayor humedad que el resto, ya que el superplastificante asciende llevándose con él el agua, quedando la superficie en forma de colmena de abeja.

Se realiza el estudio de granulometría de arena caliza blanca, arena silícea 0/2 y arena silícea 0/4, para comprobar la necesidad de realizar otra dosificación variando el tipo de arena utilizada. Destacar que la arena silícea 0/4 tiene que ser secada antes de su utilización. Si este secado no se realiza correctamente es necesario ajustar la humedad de la dosificación para no añadirle agua sobrante a la mezcla.

Para la fabricación de la cuarta dosificación se sustituye el humo de sílice por una mayor cantidad de cemento. Dicha dosificación y las dos siguientes se realizan en la hormigonera de eje vertical de 7 L de capacidad. D4 resulta no ser autocompactante, produciéndose segregación de agua en el ensayo de extensión de flujo.

Se decide realizar una dosificación adicional (D5) disminuyendo la cantidad de arena caliza y aumentando la cantidad de arena silícea. Esta dosificación es necesaria repetirla por un fallo en la medición del agua adicionada, resultando ser excesiva. Por lo tanto D6 posee las mismas cantidades que la anterior, obteniendo un hormigón de aspecto autocompactante.

Por último, se realizan tres comprobaciones a partir de D6:

- D7: Esta dosificación es igual que D6 pero su fabricación se realiza en una hormigonera de mayores dimensiones de eje vertical, sustituyendo la arena silícea 0/2 por arena silícea 0/4 tamizada, tamaño máximo de grano 2 mm.

- D8: Esta dosificación es igual que D6 pero su fabricación se realiza en una hormigonera de mayores dimensiones de eje vertical.
- D9: Esta dosificación es igual que D6 pero su fabricación se realiza en una hormigonera de mayores dimensiones de eje vertical, sustituyendo la arena silícea 0/2 por arena silícea 0/4.

Además, se realiza un cambio en el tipo de suerplastificante, aditivo de importancia relevante a la hora de fabricar un hormigón autocompactante.

Tras obtener gratos resultados de la fabricación de estas tres últimas dosificaciones, los tres hormigones son autocompactantes, se decide esperar un tiempo de fraguado para realizarles ensayos de compresión y así poder decidir cuál será la dosificación definitiva para la realización de la segunda fase de la campaña experimental, objeto de este proyecto.

A los siete días de fabricación se obtienen los siguientes resultados:

- D7 → $f_c = 61.6 \text{ MPa}$
- D8 → $f_c = 57.75 \text{ MPa}$
- D9 → $f_c = 21.09 \text{ MPa}$

Se obtiene una mayor resistencia a la compresión en el hormigón D7 que en el D8 pero, debido a la necesidad de secado de la arena silícea 0/4, resulta inviable realizar una campaña experimental extensa con dicha arena. Por lo tanto se decide tomar D8 como dosificación final de fabricación para realizar el estudio de comportamiento a fractura de un hormigón autocompactante de alta resistencia.

La composición de cada dosificación se detalla en la tabla 9.2.

Materiales/Dosificaciones (kg)	D1 ²	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Cemento	4,28	4,28	4,28	-	-	-	-	-	-
CEM II	-	-	-	5,91	8,10	4,60	4,60	4,60	4,60
Humo de sílice	1,37	1,37	1,37	-	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
Filler Calizo	2,25	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena Caliza 0,5/1,5	2,25	4,5	-	-	-	-	-	-	-
Arena Caliza 2/4	1,68	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena Caliza Blanca	-	-	4,5	4,48	3,87	0,97	0,97	0,97	0,97
Arena Silíceo 0/2	6,91	6,91	6,91	2,68	6,07	6,07		6,07	
Arena Silíceo 0/4	-	-	-	-	-	-	6,07	-	6,07
Grava caliza 4/8	3,92	5,6	-	-	-	-	-	-	-
Grava silíceo de machaqueo	-	-	5,6	9,58	9,11	9,11	9,11	9,11	9,11
Agua	2,71	1,11	1,21	1,44	¿?	1,53	1,28	0,905	0,97
SP Basf	0,238	0,394	0,394	0,274	0,15	0,332	-	-	-
SP Sika	-	-	-	-	-	-	0,189	0,158	0,313

Tabla 9.2. Dosificaciones.

² Dosificación 1: Dosificación de referencia, propuesta por Karihaloo et al. (2012).

9.3. FABRICACIÓN.

Se sigue una misma metodología de fabricación del hormigón para todas las dosificaciones de la primera fase de la campaña experimental, así como para las probetas finales de ensayo en la segunda fase de la campaña experimental.

9.3.1. PREPARACIÓN DE LOS MOLDES.

El primer paso de la fabricación es la preparación de los moldes necesarios para el secado inicial del hormigón.

Los tipos de moldes a utilizar serán los siguientes:

- *Molde para probetas prismáticas:* moldes de dimensiones $440 \times 100 \times 100 \text{ mm}$.
- *Molde para probetas cúbicas:* moldes de dimensiones $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$.
- *Molde para probetas cilíndricas:* moldes cilíndricos de dimensiones $\varnothing 100 \times 200 \text{ mm}$.

Antes de rellenar el molde, se aplica aceite desencoformante que facilita la posterior extracción de la probeta (Figuras 9.1 y 9.2).



Figura 9.1. Molde para probeta prismática cubierta de desencoformante.



Figura 9.2. Detalle del recipiente que contiene el líquido desencofrante utilizado.

9.3.2. METODOLOGÍA DEL HORMIGONADO.

Respecto a la metodología del hormigonado, se ha seguido un estricto protocolo que se detalla a continuación.

Hay que tener en cuenta que pequeños cambios en la relación agua/cemento debidos a la humedad de la arena, una distribución no homogénea de los áridos del hormigón debido a un insuficiente tiempo de amasada, un curado a humedades no adecuadas, etc., son factores que deben controlarse al máximo a la hora de fabricar hormigón ya que modificarían las propiedades del mismo.

1. Pesar las cantidades de todos los componentes de la mezcla. Para ajustar lo máximo posible a las cantidades calculadas en la dosificación, se usarán dos básculas: una báscula de mayor tamaño de un decimal de precisión (Figura 9.3) para los materiales en grandes cantidades como grava, arenas, cemento, humo de sílice y agua; y otra de mayor precisión (Figura 9.4), tres decimales, para cantidades más pequeñas como es el caso del superplastificante y las fibras de polipropileno.



Figura 9.3. Báscula: precisión 0,1 m.



Figura 9.4. Báscula: precisión 0,001 m.

2. Anadir los áridos a la hormigonera y hacer girar durante aproximadamente 1 min.



Figura 9.5. Aspecto de la primera hormigonera utilizada, hormigonera común. Las muestras que en ella se han realizado son: Dosificación 1, 2, 3 y 4.



Figura 9.6. Aspecto de la segunda hormigonera utilizada. Hormigonera de eje vertical con capacidad máxima de 12 L. Las muestras que en ella se han realizado son: Dosificación 5, 6 y 7.



Figura 9.7. Aspecto de la tercera y definitiva hormigonera utilizada. Hormigonera de eje vertical con capacidad máxima de 50 L. Las muestras que en ella se han realizado son: Dosificación 8 y 9., además de toda la fabricación del hormigón con el que se realiza las probetas de ensayo.

3. Añadir el cemento y el humo de sílice en la hormigonera y hacer girar aproximadamente el mismo tiempo que antes. En el caso de utilizar la hormigonera vertical es conveniente taparla antes de girar, para evitar la pérdida de estos dos componentes debido a su elevada volatilidad. Por el contrario, en las hormigoneras de eje vertical no es necesario.

4. Verter el agua, y con la última fracción de ésta adicionar el superplastificante requerido.



Figura 9.8. Hormigonera de eje vertical mezclando el cemento con los áridos.



Figura 9.9. Hormigonera de eje vertical mezclando la masa con el agua y plastificante añadido.

5. Por último, se añade a la mezcla las fibras de polipropileno, a las dosificaciones que lo requieran.

6. Se gira todo el tiempo suficiente para conseguir una mezcla homogénea. Pasado ese tiempo se extrae el hormigón y se vierte directamente en los moldes.



Figura 9.10. Probetas de hormigón ya enrasadas listas para desmoldar a las 24 horas.

7. Se deja reposar el hormigón en los moldes durante 24 horas y después se pasa al desencofrado y posterior limpieza de los moldes.



Figura 9.11. Probeta lista para desencofrar.

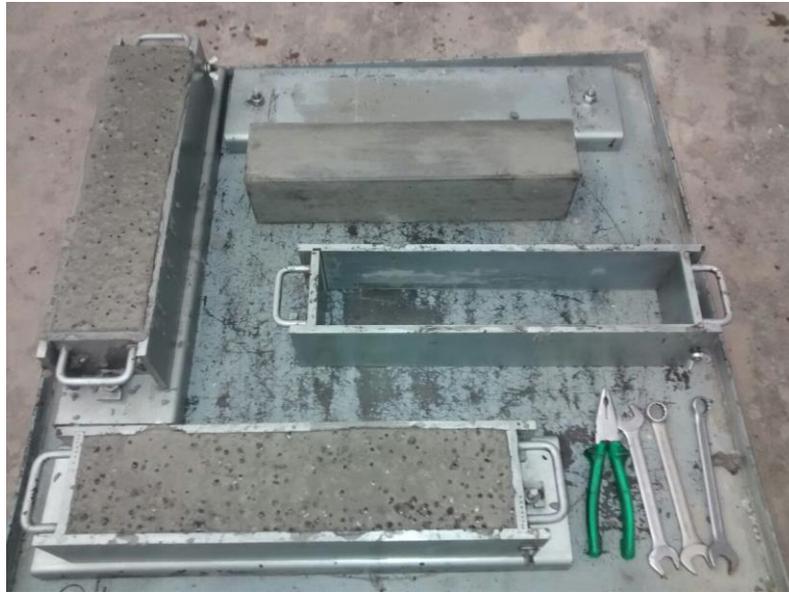


Figura 9.12. Desenfofrado de probetas.



Figura 9.13. Limpieza de los moldes.



Figura 9.14. Montado de los moldes.

8. Las probetas se insertan en la cámara de curado para el fraguado y primer endurecimiento del hormigón durante al menos 28 días, evitando así la desecación y mejorar la hidratación del cemento.



Figura 9.15. Baño de curado donde se introducen las probetas.

9.4. ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO.

Para poder tomar decisiones en cuanto a modificaciones en las dosificaciones realizadas en el mismo instante de la fabricación de ésta, además del aspecto visual que éstas ofrecen, se realiza el ensayo de extensión de flujo en estado fresco.

9.4.1. ENSAYO DE EXTENSIÓN DE FLUJO (CONO DE ABRAMS).

El ensayo de extensión de flujo, o slump flow en inglés, es el método más simple y el más utilizado, debido a la sencillez del equipo que se precisa (Figura 9.16). Está basado en el aparato y procedimiento del ensayo del cono de Abrams, el cual es probablemente el ensayo más universal para la determinación de la docilidad o trabajabilidad del hormigón fresco.

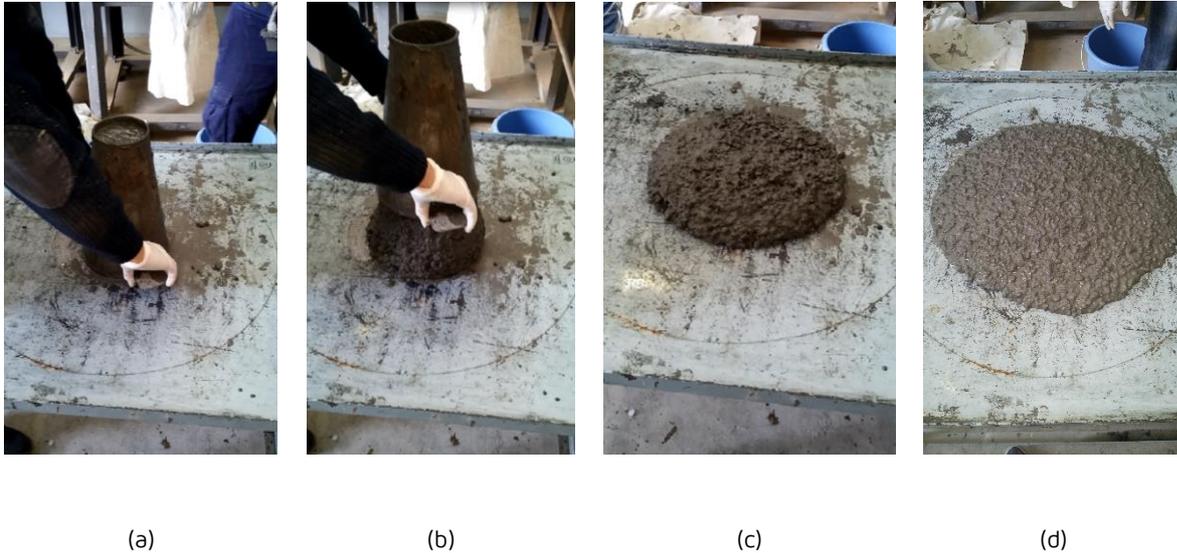


Figura 9.16. Proceso de realización del ensayo de extensión de flujo.

Este ensayo difiere del convencional en que la muestra de hormigón se coloca sin ningún tipo de compactación. Además, en este caso la altura del asentamiento no constituye una medida representativa, siendo el diámetro final de extensión (D_f) la medida fundamental que se obtiene como resultado. Adicionalmente, también suele medirse el tiempo que tarda la muestra desde el inicio del levantamiento del cono hasta alcanzar un diámetro de 500 mm (T_{50}), y más ocasionalmente, el tiempo final de extensión de flujo (T_f), hasta que la muestra deja de moverse.

El objetivo de este ensayo es evaluar la habilidad o facilidad de fluir del hormigón, es decir, si un hormigón determinado puede ser considerado autocompactante o no. Se puede también valorar cualitativamente, en términos visuales, la presencia de segregación, que se manifiesta por la presencia de una aureola de pasta alrededor del perímetro de la extensión del flujo (Figura 9.17) y/o la presencia de áridos gruesos acumulados irregularmente, sobre todo en el centro (Figura 9.19).



Figura 9.17. Hormigón que presenta segregación.
Dosificación número 4.



Figura 9.18. Hormigón que no presenta segregación.
Dosificación número 8.



Figura 9.19. Los áridos se acumulan irregularmente en el centro, no fluyen. Dosificación número 2.

10. ENSAYOS

10.1. INTRODUCCIÓN.

Finalmente, la dosificación elegida es la número 8, dosificación objetivo ya que se trata de un hormigón autocompactante de alta resistencia. Para poder realizar el estudio del comportamiento de este hormigón a alta temperatura y la influencia de fibras de polipropileno se fabrican tres tipos de amasadas:

- Hormigón D0: Sin fibras, hormigón de referencia.
- Hormigón D1: Con adición de fibras de polipropileno de 6 mm de longitud.
- Hormigón D2: Con adición de fibras de polipropileno de 24 mm.

Cada una de las dosificaciones se ensayarán en las mismas condiciones a cinco temperaturas distintas: Temperatura ambiente (TA, temperatura de referencia), 100°C, 300°C, 500°C y 700°C.

Además, para cada temperatura se efectuarán ensayos a diferentes tiempos de exposición: a las 6 h 24 h y 48 h de calentamiento.

Se realizan cuatro tipos de ensayos para poder caracterizar correctamente el hormigón:

- Ensayo de flexión en tres puntos: El cual se realiza con probetas prismáticas. Se necesitarán seis probetas de cada dosificación para cada temperatura (dos por cada tiempo de exposición).

- Ensayo de compresión simple: Se realiza el ensayo con probetas cúbicas. Son necesarias, como en el caso anterior seis probetas de cada dosificación para cada temperatura (dos por cada tiempo de exposición), para así obtener unos resultados fiables en cada caso.

- Ensayo de cálculo del módulo: Se realiza a temperatura ambiente interpolando dichos resultados a alta temperatura a través de la relación entre las cargas de pico obtenidas en los ensayos de flexión en cada caso. Es necesario el ensayo de cuatro probetas para cada dosificación para así obtener una mayor fiabilidad en la media obtenida.

- Ensayo del brasileño: Las mismas probetas cilíndricas utilizadas en el ensayo del módulo, se llevarán hasta la fractura en el ensayo Brasileño, por lo que no será necesaria la fabricación de probetas adicionales para este ensayo específico.

Debido al alto número de probetas necesarias para la realización de los ensayos, se decide tomar las siguientes dimensiones de probetas (Figura 10.1), teniendo que recurrir al corte de prbeas fabricadas.

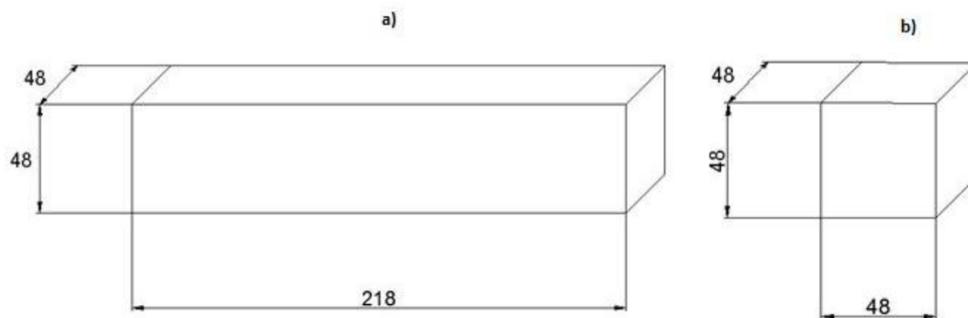


Figura 10.1. Dimensión de las Probetas. a) 218x48x48 mm. b) 48x48x48 mm.

La denominación de las distintas probetas es la siguiente:

		Tiempo exposición	D0	D1	D2
TA	PRISMÁTICA	-	DO_TA_1	D1_TA_1	D2_TA_1
			DO_TA_2	D1_TA_2	D2_TA_2
			DO_TA_3	D1_TA_3	D2_TA_3
			DO_TA_4	D1_TA_4	D2_TA_4
	CÚBICA	-	DO_TA_1	D1_TA_1	D2_TA_1
			DO_TA_2	D1_TA_2	D2_TA_2
			DO_TA_3	D1_TA_3	D2_TA_3
			DO_TA_4	D1_TA_4	D2_TA_4
	CILÍNDRICA	-	DO_TA_1	D1_TA_1	D2_TA_1
DO_TA_2			D1_TA_2	D2_TA_2	
DO_TA_3			D1_TA_3	D2_TA_3	
DO_TA_4			D1_TA_4	D2_TA_4	
100°C	PRISMÁTICA	6 h	DO_T100_1 DO_T100_2	D1_T100_1 D1_T100_2	D2_T100_1 D2_T100_2
		24 h	DO_T100_3 DO_T100_4	D1_T100_3 D1_T100_4	D2_T100_3 D2_T100_4
		48 h	DO_T100_5 DO_T100_6	D1_T100_5 D1_T100_6	D2_T100_5 D2_T100_6
	CÚBICA	6 h	DO_T100_1 DO_T100_2	D1_T100_1 D1_T100_2	D2_T100_1 D2_T100_2

		24 h	DO_T100_3 DO_T100_4	D1_T100_3 D1_T100_4	D2_T100_3 D2_T100_4
		48 h	DO_T100_5 DO_T100_6	D1_T100_5 D1_T100_6	D2_T100_5 D2_T100_6
300°C	PRISMÁTICA	6 h	DO_T300_1 DO_T300_2	D1_T300_1 D1_T300_2	D2_T300_1 D2_T300_2
		24 h	DO_T300_3 DO_T300_4	D1_T300_3 D1_T300_4	D2_T300_3 D2_T300_4
		48 h	DO_T300_5 DO_T300_6	D1_T300_5 D1_T300_6	D2_T300_5 D2_T300_6
	CÚBICA	6 h	DO_T300_1 DO_T300_2	D1_T300_1 D1_T300_2	D2_T300_1 D2_T300_2
		24 h	DO_T300_3 DO_T300_4	D1_T300_3 D1_T300_4	D2_T300_3 D2_T300_4
		48 h	DO_T300_5 DO_T300_6	D1_T300_5 D1_T300_6	D2_T300_5 D2_T300_6
500°C	PRISMÁTICA	6 h	DO_T500_1 DO_T500_2	D1_T500_1 D1_T500_2	D2_T500_1 D2_T500_2
		24 h	DO_T500_3 DO_T500_4	D1_T500_3 D1_T500_4	D2_T500_3 D2_T500_4
		48 h	DO_T500_5 DO_T500_6	D1_T500_5 D1_T500_6	D2_T500_5 D2_T500_6
	CÚBICA	6 h	DO_T500_1 DO_T500_2	D1_T500_1 D1_T500_2	D2_T500_1 D2_T500_2
		24 h	DO_T500_3 DO_T500_4	D1_T500_3 D1_T500_4	D2_T500_3 D2_T500_4
		48 h	DO_T500_5 DO_T500_6	D1_T500_5 D1_T500_6	D2_T500_5 D2_T500_6
700°C	PRISMÁTICA	6 h	DO_T700_1 DO_T700_2	D1_T700_1 D1_T700_2	D2_T700_1 D2_T700_2
		24 h	DO_T700_3 DO_T700_4	D1_T700_3 D1_T700_4	D2_T700_3 D2_T700_4
		48 h	DO_T700_5 DO_T700_6	D1_T700_5 D1_T700_6	D2_T700_5 D2_T700_6
	CÚBICA		DO_T700_1 DO_T700_2	D1_T700_1 D1_T700_2	D2_T700_1 D2_T700_2

		D0_T700_3	D1_T700_3	D2_T700_3
		D0_T700_4	D1_T700_4	D2_T700_4
		D0_T700_5	D1_T700_5	D2_T700_5
		D0_T700_6	D1_T700_6	D2_T700_6

Tabla 10.1. Nomenclatura de las probetas ensayadas.

10.2. CORTE DE PROBETAS Y PREPARACIÓN DE ENTALLAS.

Una vez obtenido el número de probetas necesarias, y pasado el tiempo de fraguado, se procede al corte de probetas para obtener las dimensiones de las probetas nombradas en la tabla 10.1. Se realizan dos tipos de corte:

- Obtención de probetas prismáticas: A partir de las probetas prismáticas de dimensiones $440 \times 100 \times 100$ se realizan cortes para obtener 8 probetas prismáticas de dimensiones $220 \times 50 \times 50$ como aparece en la figura 10.2.

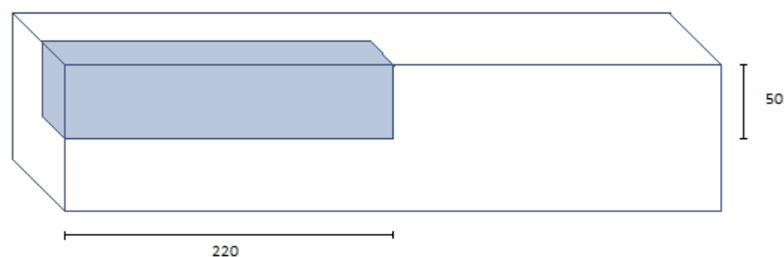


Figura 10.2. Obtención de probetas prismáticas.

- Obtención de probetas cúbicas: A partir de las probetas prismáticas de dimensiones $220 \times 50 \times 50$ se realizan cuatro cortes para obtener 4 probetas cúbicas de dimensiones $50 \times 50 \times 50$ como aparece en la figura 10.3.

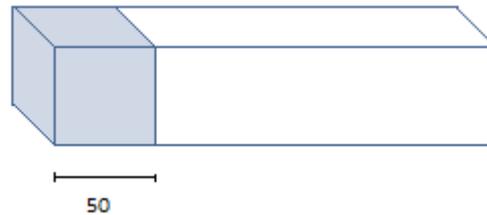


Figura 10.3. Obtención de probetas cúbicas.

Estas dimensiones son teóricas ya que en la realidad hay que tener en cuenta el ancho del disco de corte. La máquina utilizada para el corte es una Rotaflex (Figura 10.4). El disco utilizado tiene un espesor de $b = 4 \text{ mm}$; por lo tanto las dimensiones reales de las probetas, como ya se ha comentado serán de $218 \times 48 \times 48 \text{ mm}$ para las prismáticas y de $48 \times 48 \times 48 \text{ mm}$ para las cúbicas, en caso de realizar un corte perfecto.

Es necesario refrigerar el disco de corte con agua para evitar el excesivo calentamiento por rozamiento tanto de la cuchilla como de la pieza.



Figura 10.4. Rotaflex utilizada para el corte.

Las probetas cortadas quedan como aparecen en las figuras 11.5 y 11.6.



Figura 10.5. Probetas prismáticas originales y probetas cortadas.



Figura 10.6. Probetas cúbicas cortadas.

Con esta misma máquina pero con otro disco de menores dimensiones se realizan las entallas de las probetas. La realización de la entalla requiere en primer lugar el posicionamiento del disco. La distancia desde la plataforma de la máquina donde descansa la probeta y el punto más bajo del filo de la cuchilla tiene que ser igual al ancho de la probeta menos la profundidad de la entalla.

Como la probeta tiene un ancho de 48 mm, se le practica una entalla de 24 mm para cumplir con las recomendaciones de la RILEM de relación: $\frac{\text{profundidad entalla}}{\text{ancho de la probeta}} = 0,5$

10.3. CALENTAMIENTO DE PROBETAS.

El objetivo principal del proyecto es el estudio de la influencia en los parámetros de fractura del tiempo de exposición a alta temperatura del hormigón. El calentamiento de probetas para cada temperatura y cada tiempo de exposición se realiza en hornos.(Figura 10.7 y 10.8).



Figura 10.7. Horno de 100 a 300 °C



Figura 10.8. Horno de 500 °C a 700°C.

Colocando las probetas de forma estratégica debido al espacio reducido del que disponen los hornos y a la peligrosidad que conlleva el manejo de elementos a altas temperaturas. Es por ello que se colocan por orden de salida para realizar los ensayos, esto lo marca el tiempo de exposición correspondiente a cada probeta.

10.4. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN ENDURECIDO.

10.4.1. INTRODUCCIÓN.

Para caracterizar el hormigón una vez éste ha fraguado, se realizan distintos ensayos que se detallan a continuación basándonos en la normativa UNE en cada caso específico para su realización.

Éstos se efectúan con las probetas correspondientes a alta temperatura, por lo que es necesario hacer hincapié en la seguridad de realización de los mismos así como el control en temperatura (Figura 10.9).



Figura 10.9. Medida de temperatura en el ensayo de flexión en 3 puntos para la probeta D1_T100_5.

10.4.2. ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE.

El ensayo de compresión simple se basa en la normativa europea AENOR EN 12390-3:2009 que especifica el método para la determinación de la resistencia a compresión de probetas de ensayo

de hormigón endurecido.

Las probetas cúbicas de dimensiones $48 \times 48 \times 48 \text{ mm}$.se comprimen hasta rotura en una máquina de ensayo de compresión conforme a la Norma EN 12390-4. Se registra la máxima carga alcanzada por la probeta y se calcula la resistencia a compresión del hormigón.

La máquina utilizada para la realización del ensayo es una prensa hidráulica modelo MES 300 de Servosis así como el panel de control Servosis (Figura 10.10) con el cual se programa el ensayo.



Figura 10.10. Panel de control Servosis y Prensa hidráulica Servosis modelo MES 300

El procedimiento seguido se detalla a continuación:

Se limpian los platos de carga de la máquina, debiendo eliminarse cualquier resto de gravilla u

otro material extraño de las superficies de la probeta que han de estar en contacto con los platos.

Las probetas cúbicas se colocan de tal forma que la carga se aplique perpendicularmente a la dirección de hormigonado. Se centran con respecto al plato inferior.

Debido al corte de probetas, las caras pueden no ser completamente lisas ni paralelas entre caras enfrentadas. Por lo tanto se coloca un elemento de acople que ayuda a solventar los errores del ensayo producidos por los defectos de las probetas, como aparece en la figura 10.11.



Figura 10.11. Elemento que solventa los defectos que aparecen en las caras de las probetas cúbicas en el ensayo de compresión.

Una vez colocada la probeta adecuadamente, se aproxima la placa superior hasta que haga

contacto con el elemento de acople.

Se define el ensayo utilizando el programa PCD 2k, introduciéndole a éste parámetros iniciales como fecha de fabricación, fecha de referencia y tipo de ensayo, además de las dimensiones y peso de cada probeta. Se selecciona una velocidad de carga constante dentro del rango de $(0,6 \pm 0,2 \text{ MPa/s})$. Se aplica la carga inicial, que no debe exceder aproximadamente el 30 % de la carga de rotura. Después de esto, se aplica la carga a la probeta sin brusquedades y se incrementa continuamente, a la velocidad seleccionada, hasta que no se pueda soportar más carga obteniéndose una curva Carga-Desplazamiento como la que aparece en la figura 10.12.

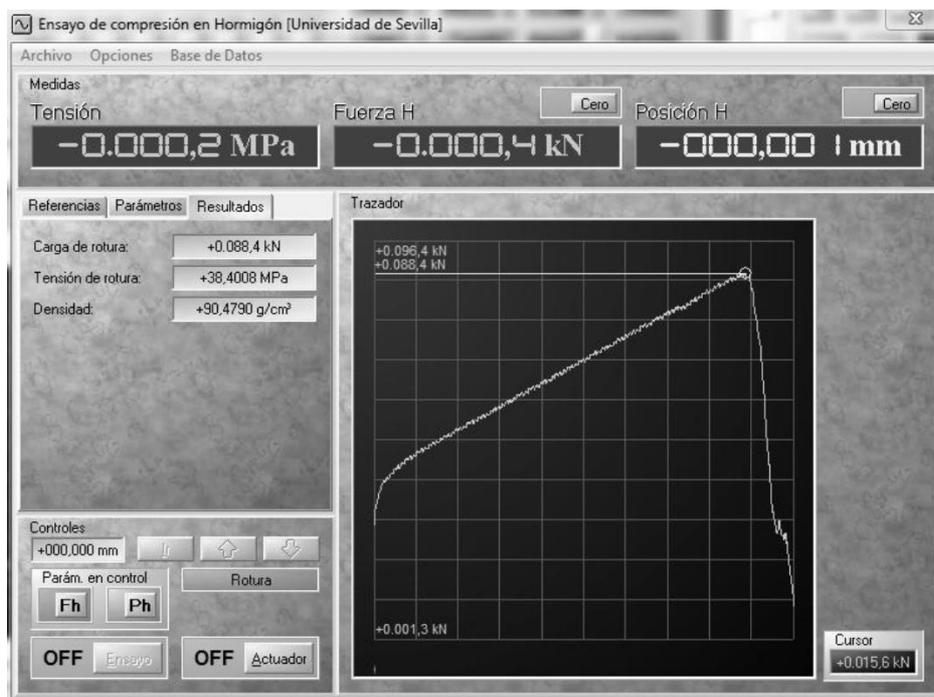


Figura 10.12. Resultados obtenidos del ensayo de compresión uniaxial, PCD 2k.

Se registra la carga máxima indicada en kN, carga de rotura.

La resistencia a compresión viene dada por la ecuación:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Donde:

f_c : es la resistencia a compresión, en MPa (N/mm²);

F : es la carga máxima de rotura, en N;

A_c : es el área transversal de la probeta sobre la que actúa la fuerza de compresión, calculada a partir de las dimensiones normalizadas de la probeta.

10.4.3. 11.5.3. ENSAYO DE FLEXIÓN EN TRES PUNTOS.

A continuación, se especifica el método para la determinación de la energía de fractura G_f a partir del ensayo de flexión en tres puntos. Al igual que en el ensayo de compresión uniaxial, éste se controla y se define a través del panel de control Servosis.



Figura 10.13. Máquina servo hidráulica modelo ME 406/15 marca Servosis Ensayos 50

La máquina utilizada es servo hidráulica modelo ME 406/15 de la marca Servosis con capacidad de carga de 20 kN (Figura 10.13). Su eje inferior es fijo, mientras que el superior es móvil y es el que aplica la carga en el centro de la probeta siendo el área de contacto con la probeta semiesférica para cargar en ésta puntualmente.

El eje inferior consta de una placa fija con dos apoyos de rodillos donde se apoya la probeta (Figura 10.14). Éste permite el deslizamiento relativo, corrigiendo las posibles imperfecciones en la probeta. Por lo tanto ésta se encuentra en un estado de flexión puro (caras inferiores traccionadas), estado objetivo del ensayo. Pero, no es suficiente con permitir los desplazamientos, también es fundamental evitar las tensiones de torsión. Para ello, los rodillos poseen un sistema de muelles que permiten el giro en dirección transversal, por lo que evita que se generen tensiones de torsión que modificarían los resultados

La distancia entre apoyos (rodillos deslizantes), es de aproximadamente 200 mm, es decir, unas 4 veces el canto de la probeta (48 mm), tal y como recomienda la RILEM.



Figura 10.14. Apoyo de rodillo.

Se realiza el control del ensayo en desplazamiento en el cilindro (P_c) y se meten en el ordenador los siguientes parámetros: velocidad y destino. Además de esto, se escoge el tipo de función que va a representar la gráfica carga–desplazamiento, siendo ésta una recta lineal.

Para que la propagación de la grieta sea lo más estable posible, la velocidad del ensayo tiene que

ser lo suficientemente baja. A diferencia del ensayo a compresión, en este caso no existe un módulo predefinido para la realización del ensayo a flexión en 3 puntos por lo que hay que definir una función.

Se crean 4 fases para controlar el ensayo (Figura 10.15). Cada una de ellas varía en el valor de la velocidad, que va desde 0.01 mm/s hasta 0.08 mm/s. La creación de estas fases se realiza para ahorrar tiempo en el ensayo, ya que se aumenta la velocidad en los tramos menos problemáticos de la curva carga-desplazamiento.

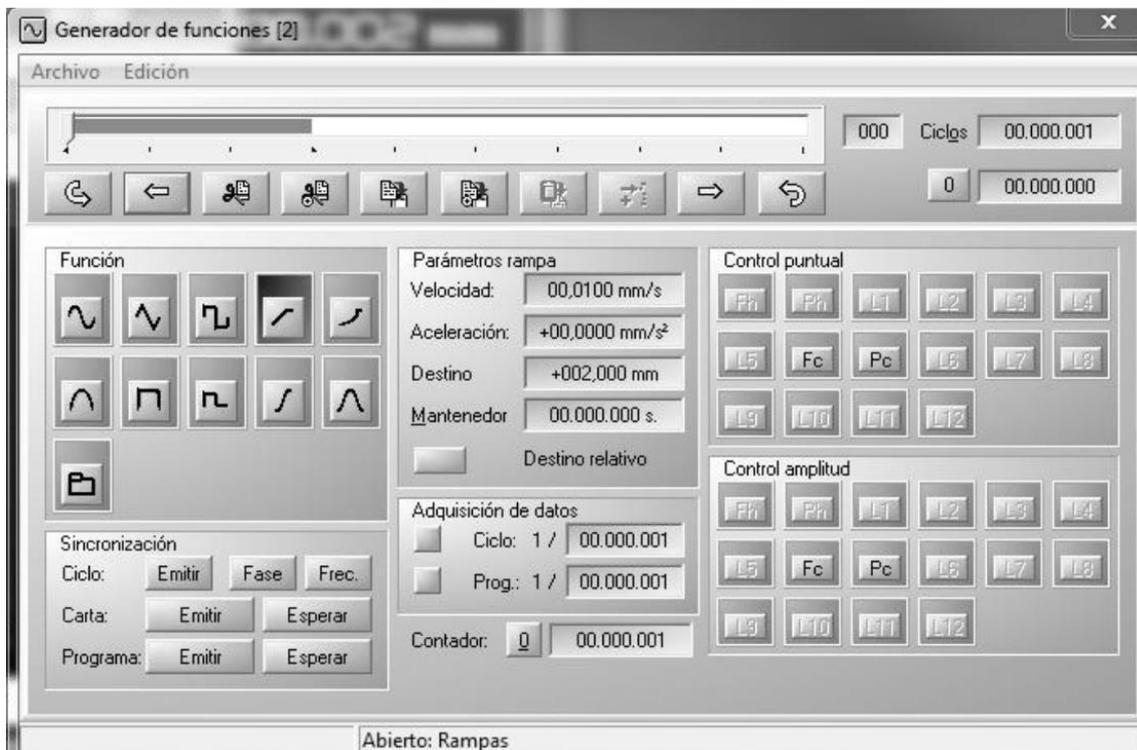


Figura 10.15. Generador de funciones (PCD 2k)

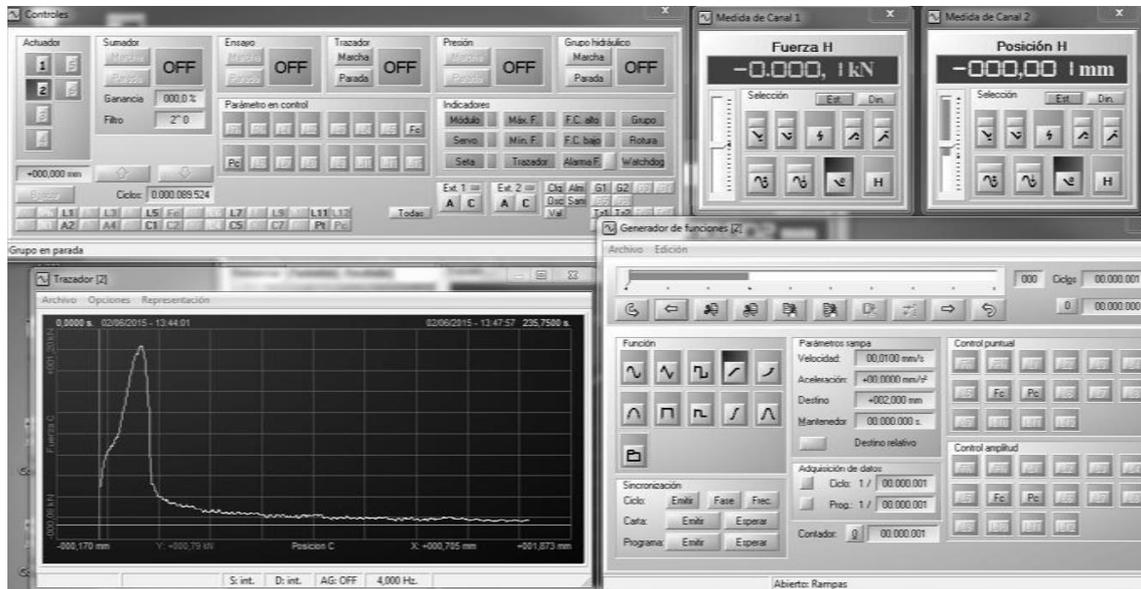


Figura 10.16. Controles, Medida de Canal 1 (medida de fuerza) y 2 (medida de posición), Trazador y Generador de Funciones (PCD 2k)

Se realiza el ensayo llevando hasta la rotura la probeta prismica de dimensiones 48 × 48 × 200.



Figura 10.17. Ensayo de flexión en tres puntos. Carga hasta rotura.

La energía de fractura es el trabajo total que hay que realizar para llevar a la probeta hasta fractura dividido entre el área de ligadura. El trabajo, o energía absorbida, se calcula a partir del área

encerrada por la curva $F - \delta$. Para obtener el área de ligadura hay que medir con el calibre el canto (d) y el ancho de la zona de ligamento (a) una vez haya roto la probeta (Figura 10.18).

$$G_F = W_F A_{lig}$$

$$A_{lig} = d \times a$$

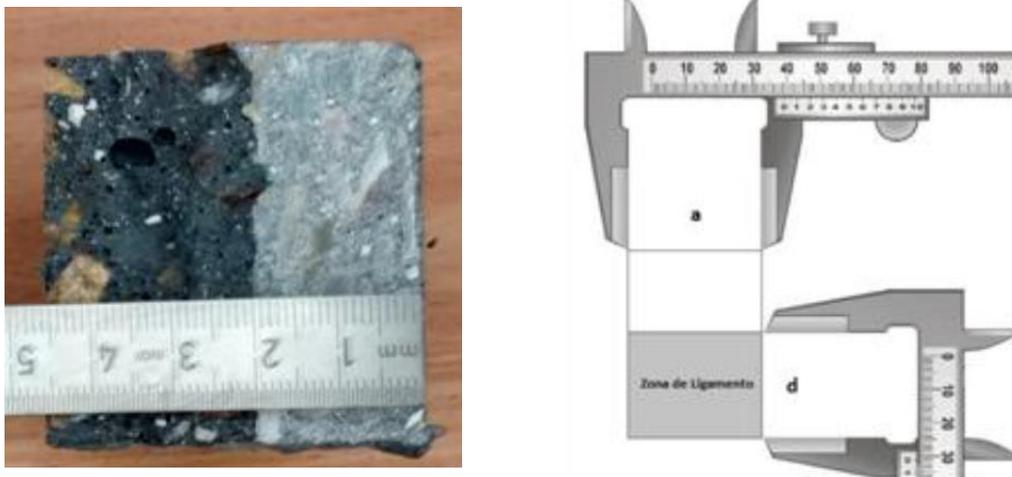


Figura 10.18. Toma de medida del área de ligadura.

10.4.4. ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL MÓDULO SECANTE DE ELASTICIDAD EN COMPRESIÓN.

El ensayo de determinación del módulo secante se basa en la normativa europea AENOR EN 12390-13:2013 que especifica el método para la determinación del módulo secante de elasticidad en compresión del hormigón endurecido sobre probetas de ensayo fabricadas.

Una probeta de ensayos se somete a compresión uniaxial, registrando las tensiones y deformaciones, y se determina la pendiente de la recta secante a la curva tensión-deformación tras tres ciclos de carga.

La pendiente de la recta secante se conoce como el módulo secante de elasticidad en compresión.

La instrumentación utilizada, sensores de desplazamiento, medirá cambios de longitud a partir de los cuales la deformación, ε , se calcula mediante la fórmula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Las probetas, de forma cilíndrica, tendrán unas dimensiones de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura.

La resistencia a compresión, f_c , calculada en el ensayo de compresión simple, se emplea para definir los niveles de tensión del ciclo de ensayo para la determinación del módulo secante de elasticidad.

El método de ensayo permite la determinación de dos módulos secantes de elasticidad:

- Módulo secante de elasticidad inicial, $E_{C,0}$: pendiente de la secante de la curva tensión-deformación durante el primer ciclo de carga.

- Módulo secante de elasticidad estabilizado, $E_{C,S}$: pendiente de la secante de la curva tensión-deformación tras tres ciclos de carga.

En este caso se utiliza un método de ensayo para calcular directamente el módulo estabilizado.

Se coloca la probeta de ensayo centrada en la máquina de ensayo, con los instrumentos de medición colocados axialmente.

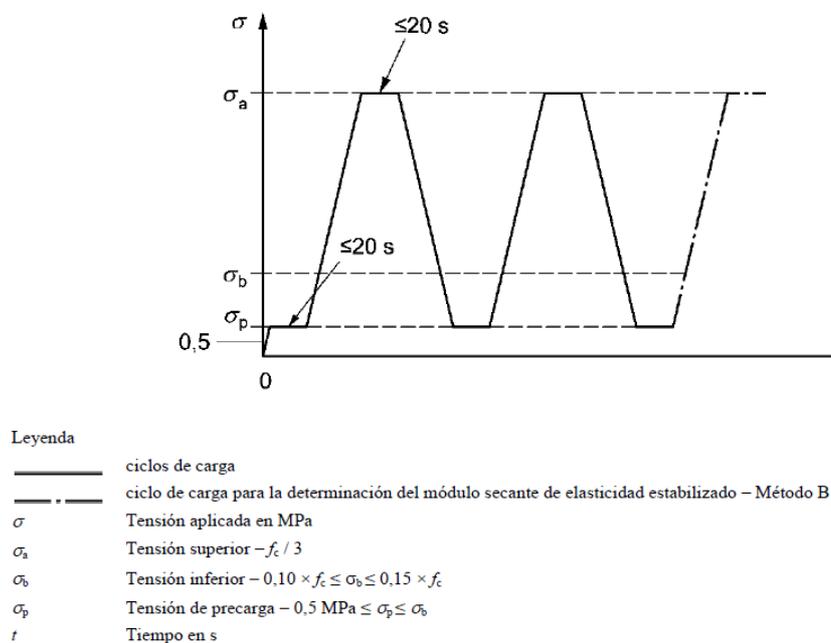


Figura 10.19. Curva de aplicación de carga en el ensayo de compresión uniaxial con transductores de medida.

Se aplica la tensión de precarga, σ_p , se mantiene durante un periodo de tiempo no superior a 20 s. al final de este periodo se ponen a cero los instrumentos de medición.

Se incrementa la tensión aplicada a la probeta a una velocidad de $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s desde la tensión de precarga hasta la tensión superior, σ_s .

$$\sigma_s = \frac{f_c}{3}$$

10.4.5. ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA (ENSAYO BRASILEÑO).

El ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia a tracción indirecta de probetas cilíndricas sometiéndolas a una fuerza de compresión aplicada en una banda estrecha en toda su longitud, en consecuencia, el resultado de la fuerza de tracción ortogonal resultante origina que la probeta se rompa a tracción.

La realización de este ensayo se basa en la norma UNE 83-306-85 EN 12390-6:2000.

El hormigón tiene que estar endurecido y curado con las condiciones normalizadas de laboratorio y romper las probetas a los 28 días, o al tiempo y circunstancias que se determinen en cada caso.

Antes de colocar la probeta en la máquina de ensayo se dibuja, en cada cara, una línea que marque un diámetro del mismo plano axial. Se trazan las generatrices que unen los extremos correspondientes a los diámetros marcados. Estas generatrices corresponden al plano de rotura.

Se coloca la probeta en el dispositivo de ensayo con la generatriz trazada sobre una banda de fibras prensadas de 10 mm de ancho, 4 mm de espesor y una longitud superior a la de la probeta.

Después se sitúa, sobre la generatriz superior opuesta otra banda idéntica a la descrita y sobre ésta una barra de sección rectangular mínima de 50 mm de anchura y de espesor igual o superior a la mitad de la diferencia entre la longitud de la probeta y la mayor dimensión del plato de la prensa.

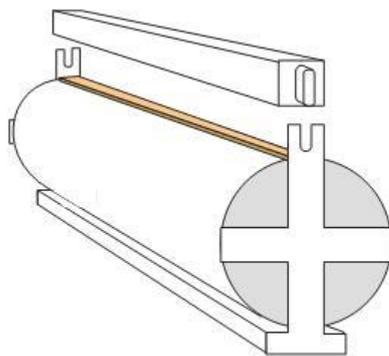


Figura 10.20 . Ensayo de tracción indirecta.

Se sitúa el dispositivo centrado en los platos de prensa, se aproximan los platos para poder fijar la posición del conjunto, sin aplicación de carga. Este ensayo se realiza en la prensa hidráulica descrita en el ensayo de compresión uniaxial.

A continuación, con un incremento de presión constante de entre 4 y 6 Mpa/s, se procede a la

rotura de la probeta, anotándose la carga total obtenida y obteniéndose con esta la resistencia a tracción indirecta.

BLOQUE III.

RESULTADOS

11. RESULTADOS

11.1. INTRODUCCIÓN.

Se enumeran los resultados obtenidos experimentalmente de los ensayos de forma clara y concisa, a modo de tablas y gráficas. En este bloque no se analizan los resultados, esta competencia recae sobre el siguiente apartado (bloque V).

Los resultados recogidos conforman las propiedades que definen el comportamiento en fractura del hormigón a alta temperatura y cada una se obtiene experimentalmente mediante un ensayo concreto como bien se explica en el apartado 11.5.

Como ya se ha mencionado anteriormente, en el proyecto se estudian tres tipos de dosificaciones (D0, D1 y D2): con fibras, fibras de 6 mm y fibras de 24 mm. Para cada una de las dosificaciones se obtienen las propiedades de fractura para las temperaturas de T_a (temperatura de referencia,

con el fin de realizar un análisis comparativo), 100°C, 300°C, 500°C y 700°C.

Además, se presenta un análisis DCS-TG obtenido tras el estudio en laboratorio de la matriz del hormigón y su comportamiento ante la exposición a alta temperatura. Se obtienen las curvas termogravimétricas que muestran la evolución de la pérdida de peso frente al tiempo y sus derivadas.

11.2. ENSAYO A FLEXIÓN EN TRES PUNTOS.

11.2.1. CURVAS CARGA-DESPLAZAMIENTO.

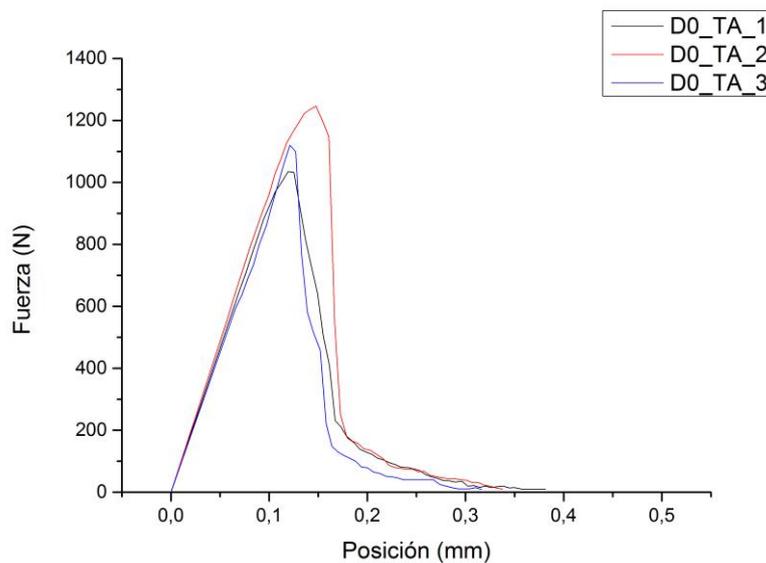


Figura 12.1. Hormigón sin fibras DO a Temperatura Ambiente.

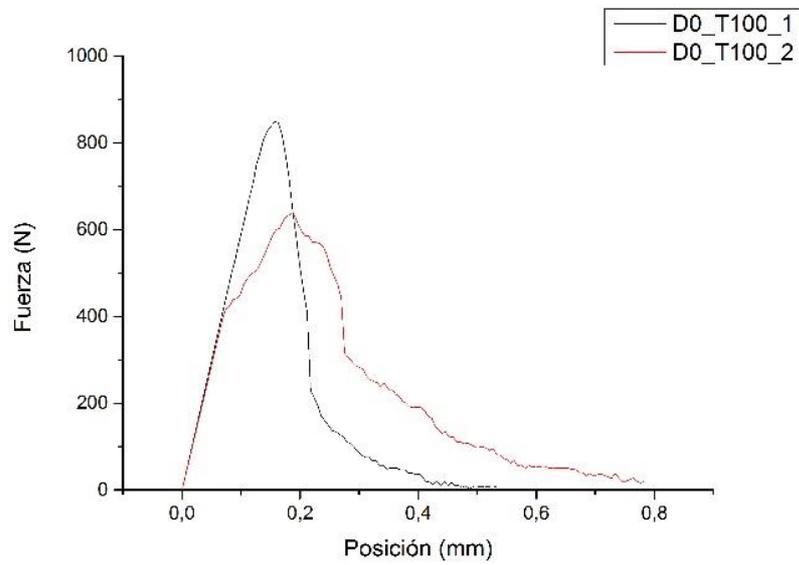


Figura 11.2 Hormigón sin fibras DO a 100 °C para un tiempo de exposición de 6 h.

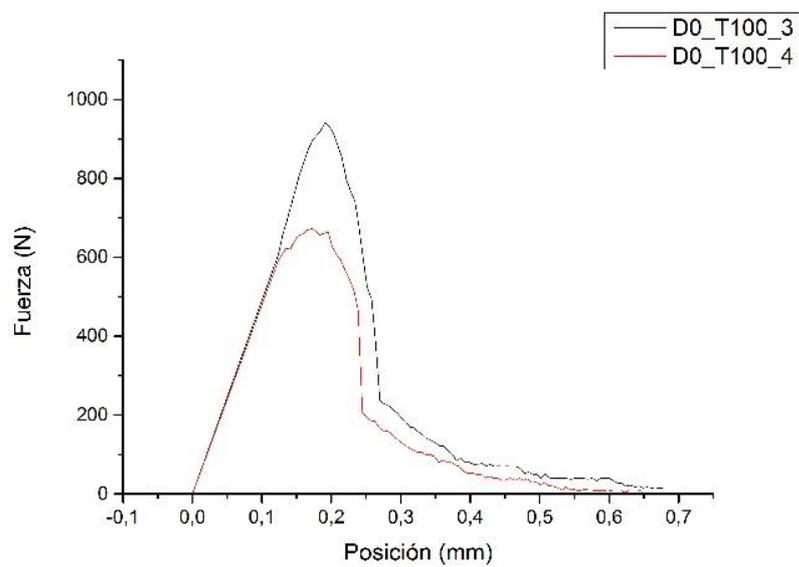


Figura 11.3. Hormigón sin fibras DO a 100 °C para un tiempo de exposición de 24 h.

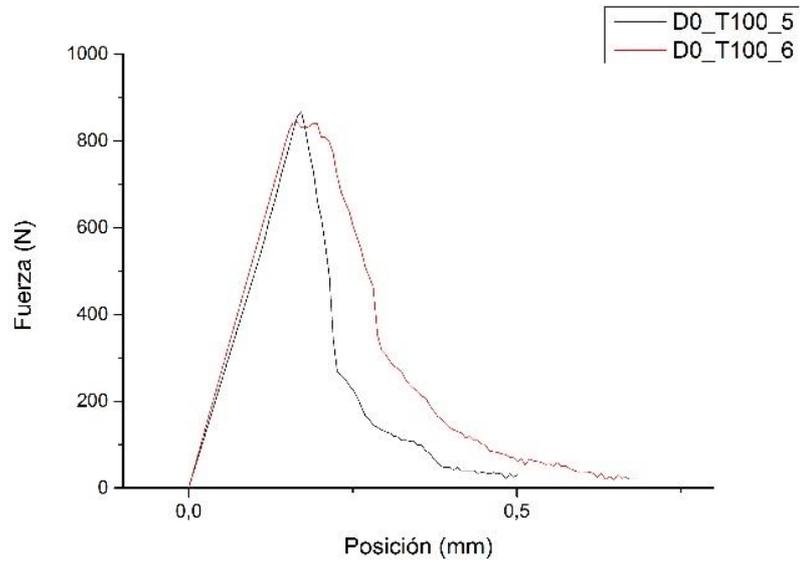


Figura 11.4. Hormigón sin fibras DO a 100 °C para un tiempo de exposición de 48 h

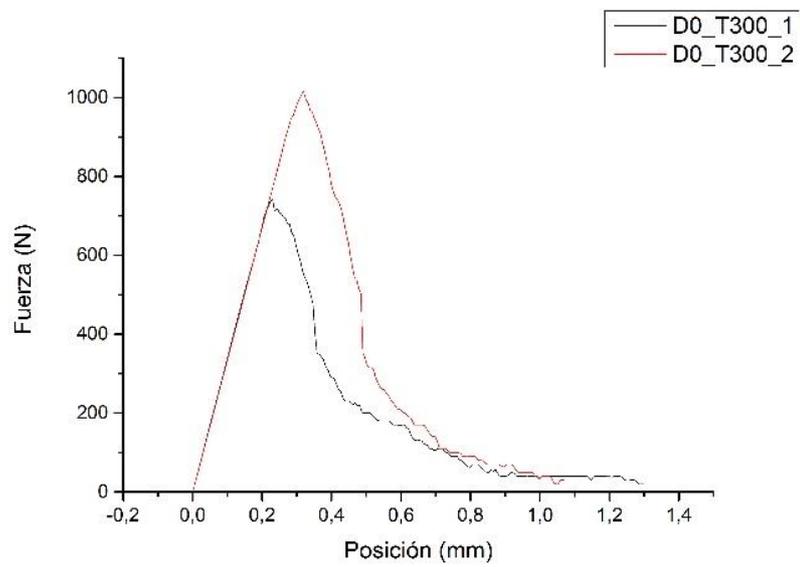


Figura 11.5. Hormigón sin fibras DO a 300 °C para un tiempo de exposición de 6 h.

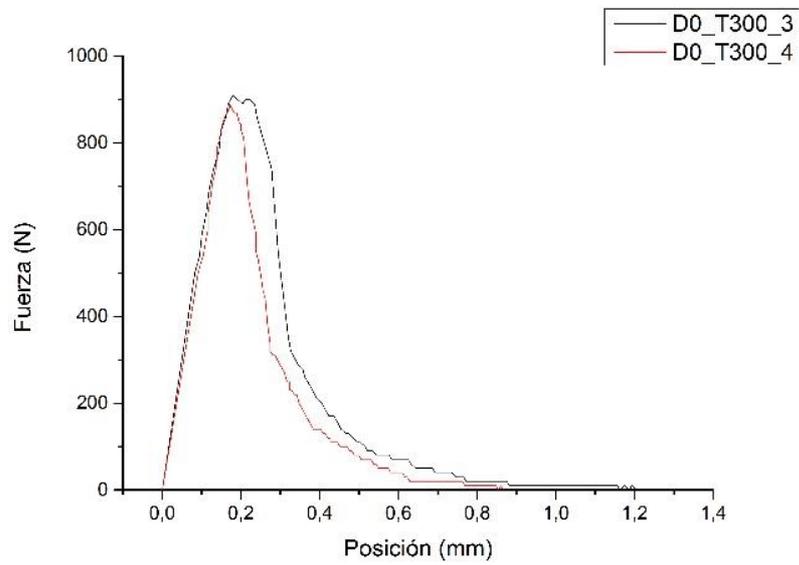


Figura 11.6. Hormigón sin fibras DO a 300 °C para un tiempo de exposición de 24 h.

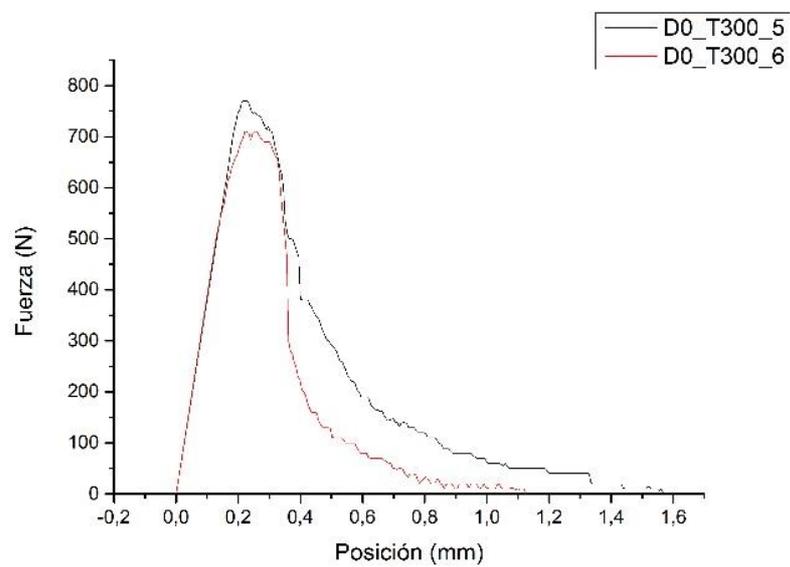


Figura 11.7. Hormigón sin fibras DO a 300 °C para un tiempo de exposición de 48 h.

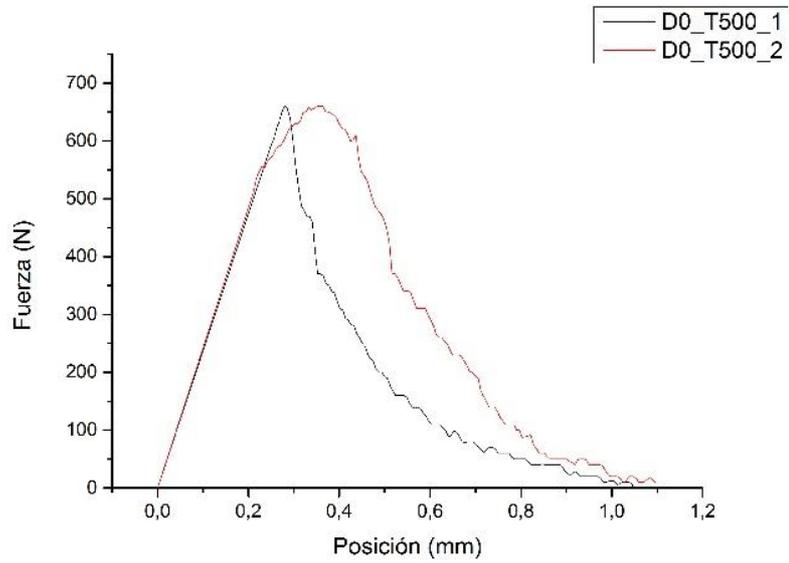


Figura 11.8. Hormigón sin fibras DO a 500 °C para un tiempo de exposición de 6 h.

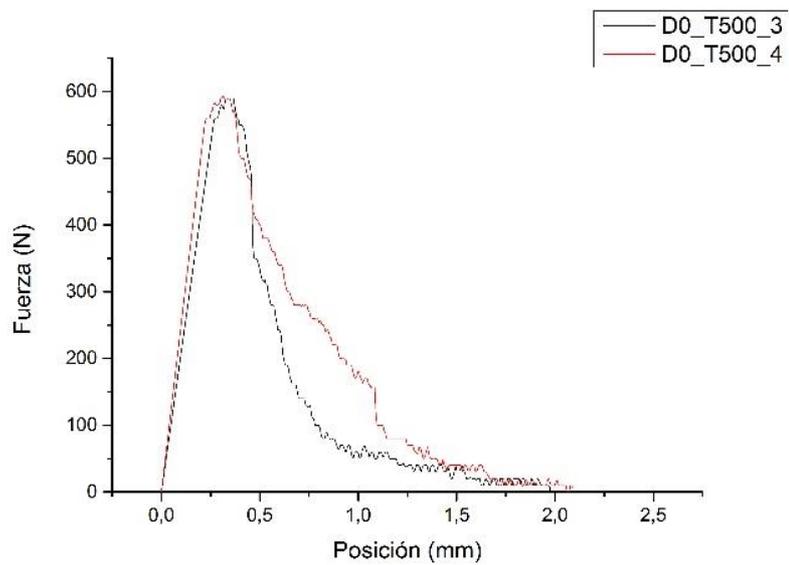


Figura 11.9. Hormigón sin fibras DO a 500 °C para un tiempo de exposición de 24 h.

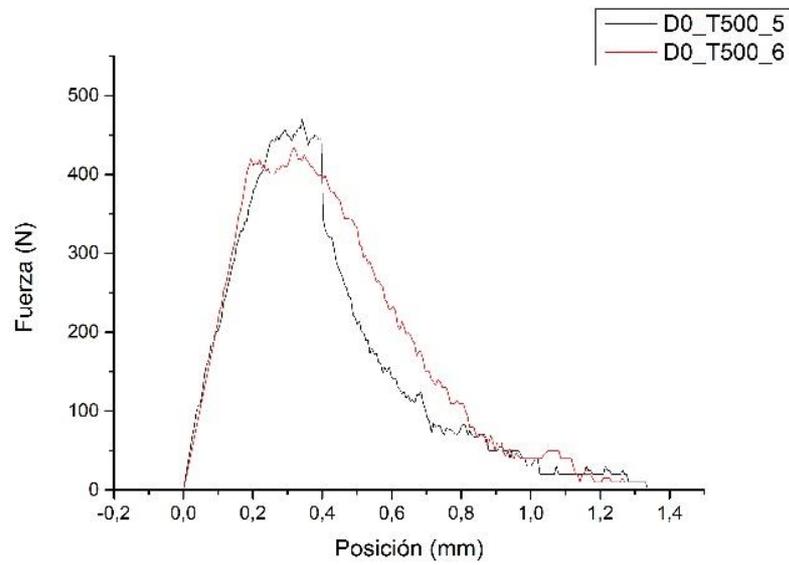


Figura 11.10. Hormigón sin fibras DO a 500 °C para un tiempo de exposición de 48 h

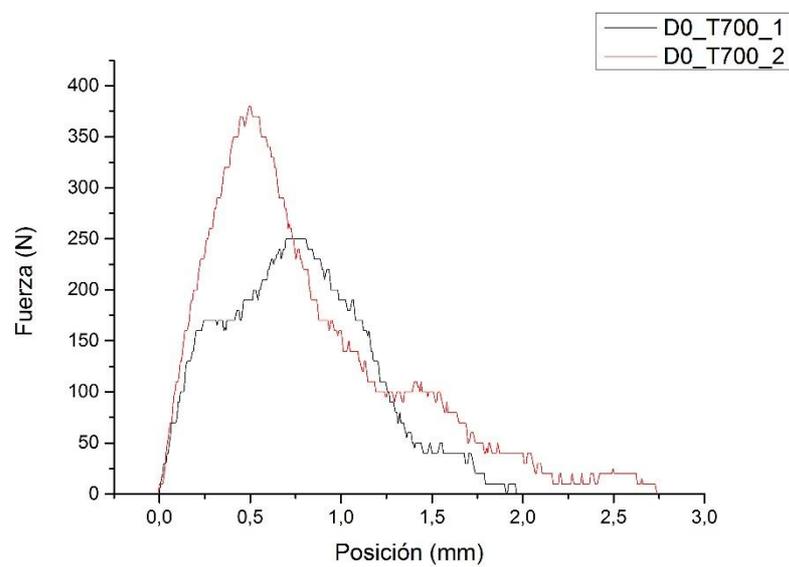


Figura 11.11. Hormigón sin fibras DO a 700 °C para un tiempo de exposición de 6 h.

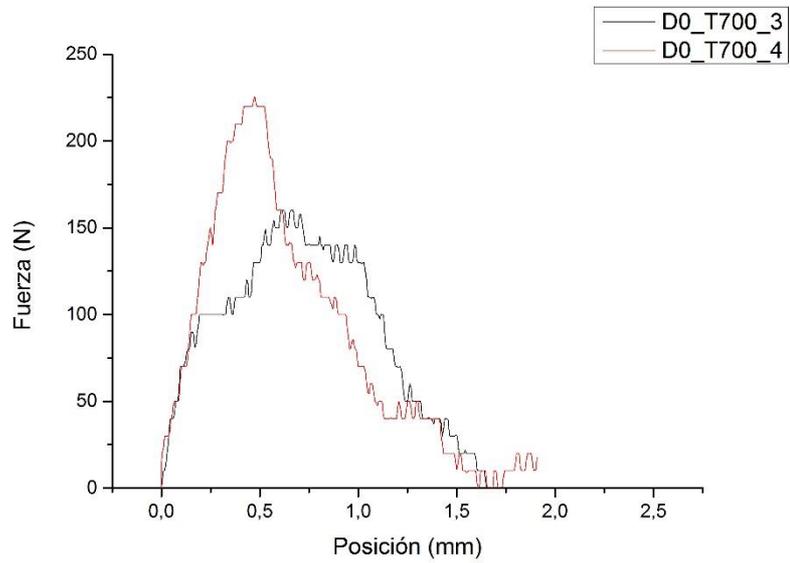


Figura 11.11. Hormigón sin fibras DO a 700 °C para un tiempo de exposición de 24 h.

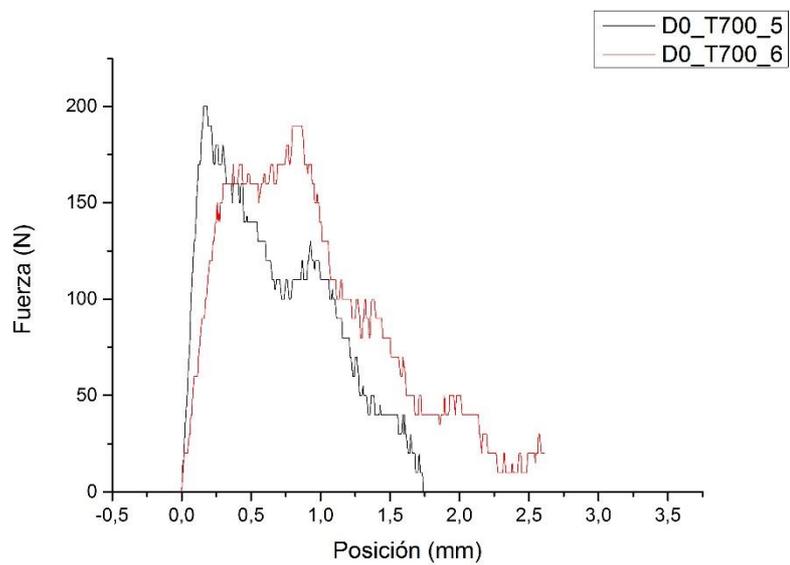


Figura 11.13. Hormigón sin fibras DO a 700 °C para un tiempo de exposición de 48 h.

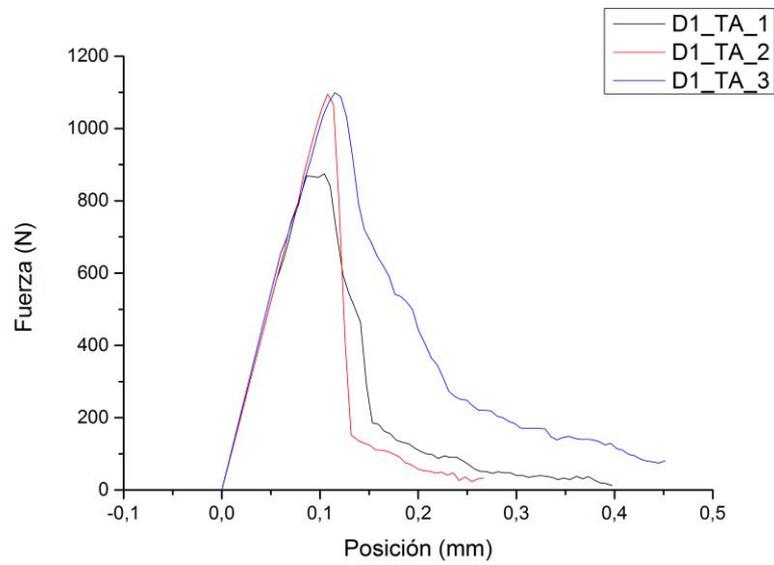


Figura 11.14. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a Temperatura Ambiente.

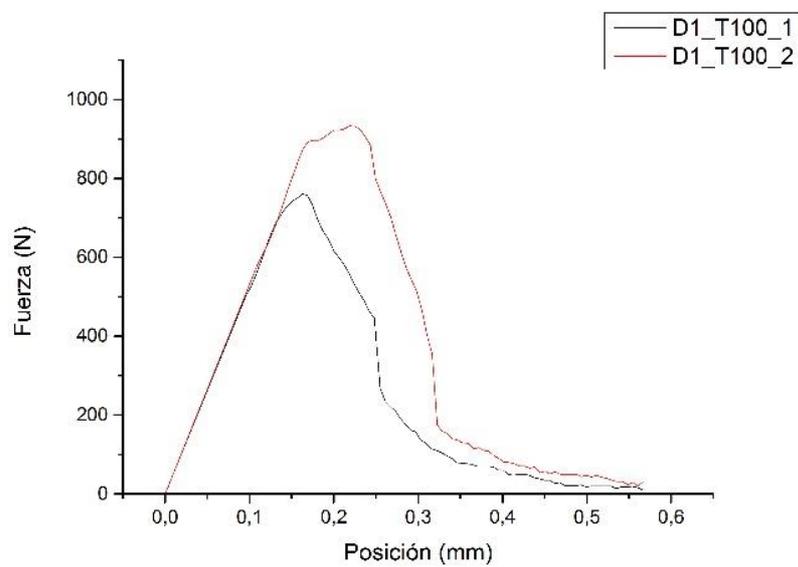


Figura 11.15. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 100 °C para un tiempo de exposición de 6 h.

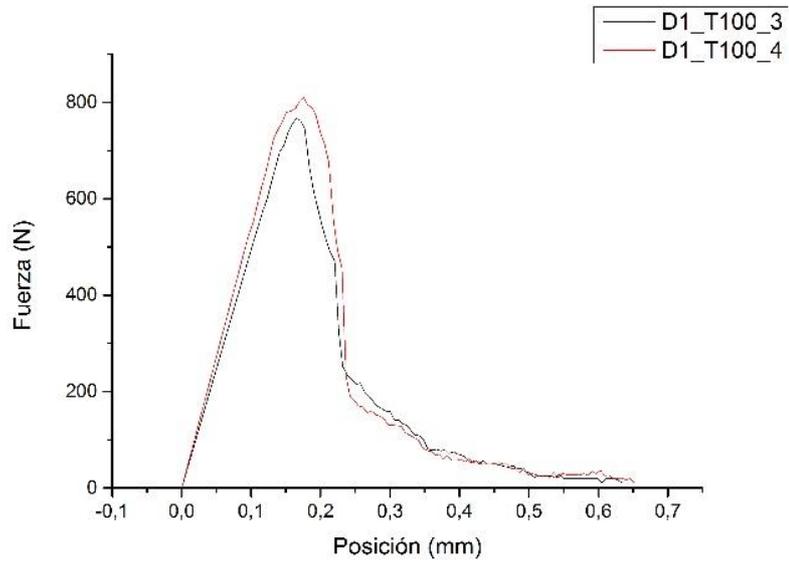


Figura 11.16. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 100 °C para un tiempo de exposición de 24h.

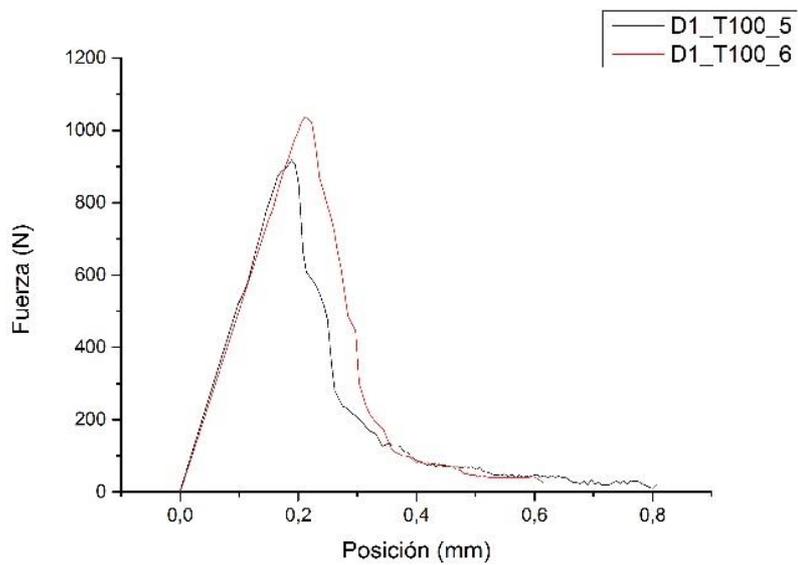


Figura 11.17. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 100 °C para un tiempo de exposición de 48h.

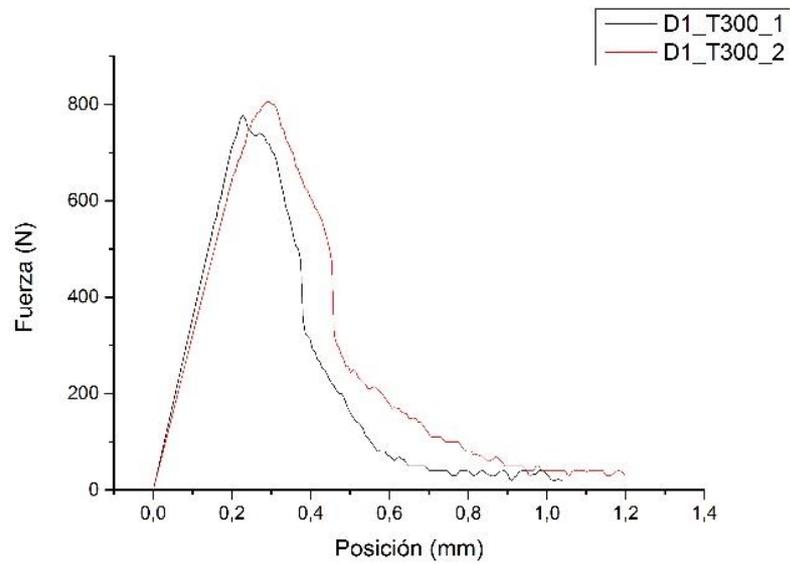


Figura 11.18. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 300 °C para un tiempo de exposición de 6h.

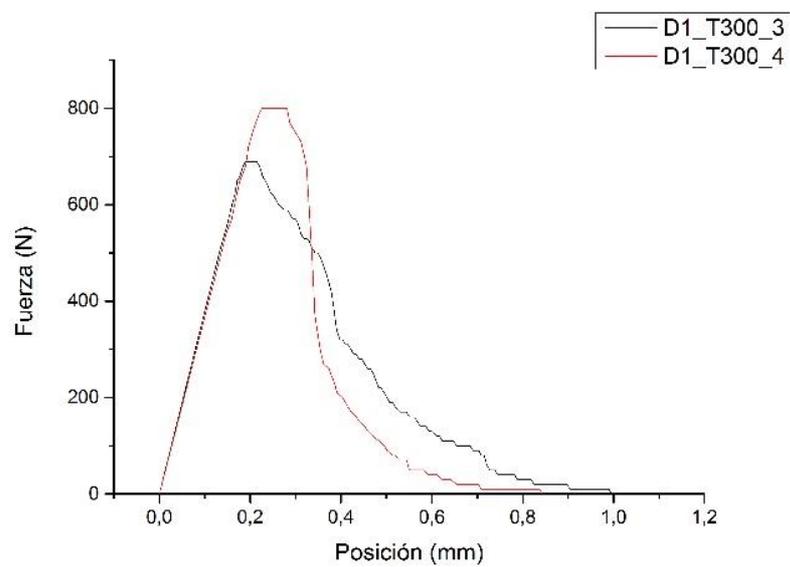


Figura 11.19. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 300 °C para un tiempo de exposición de 24h.

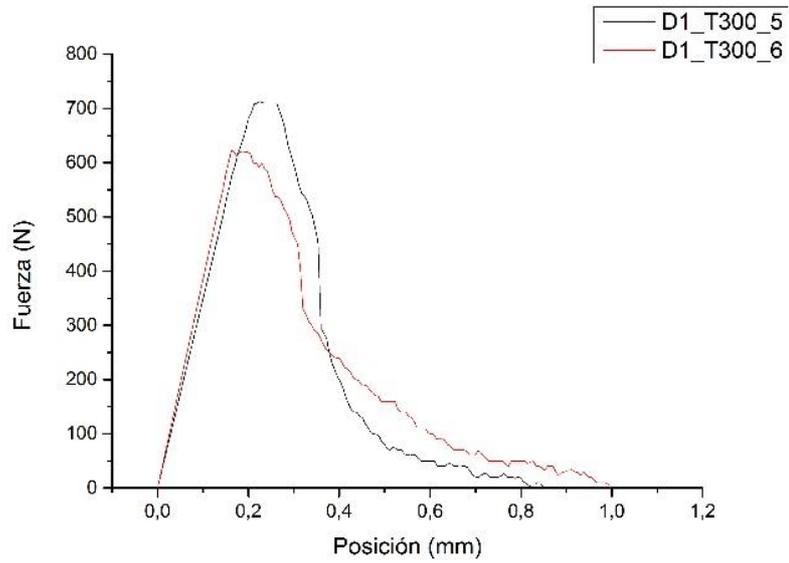


Figura 11.20. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 300 °C para un tiempo de exposición de 48h.

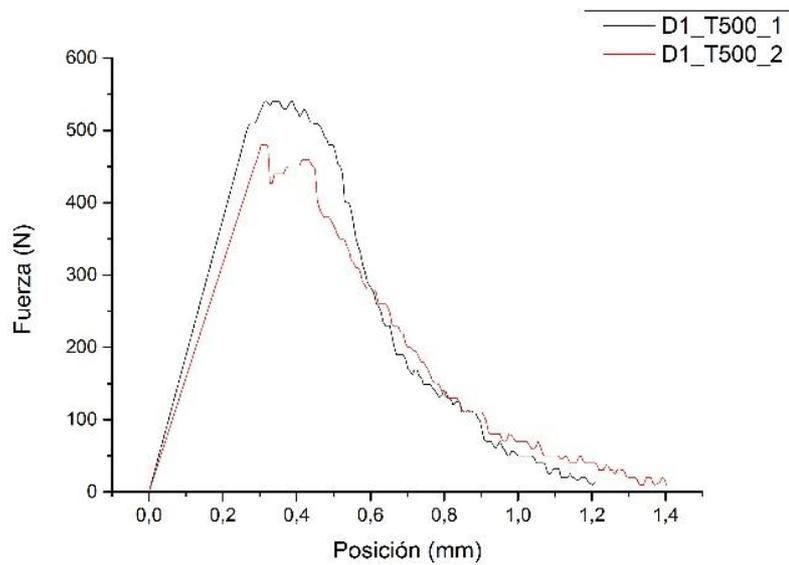


Figura 11.21. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 500 °C para un tiempo de exposición de 6h.

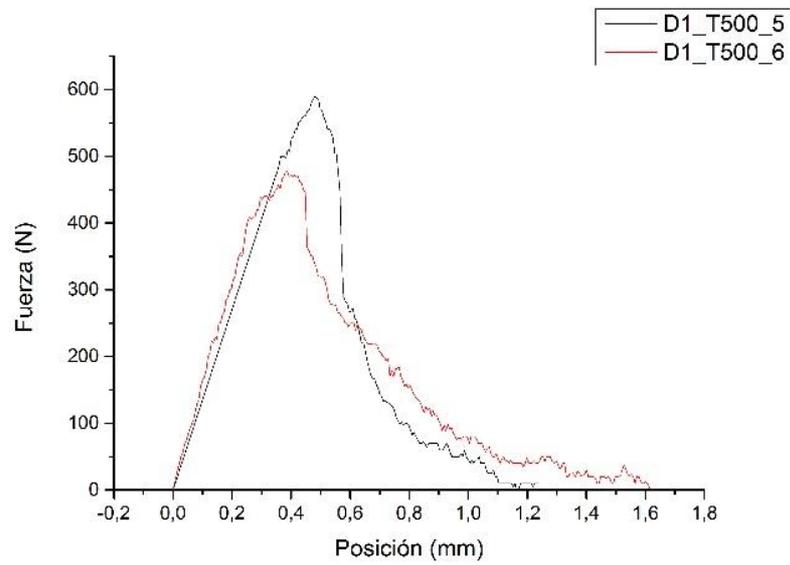


Figura 11.22. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 500 °C para un tiempo de exposición de 24h.

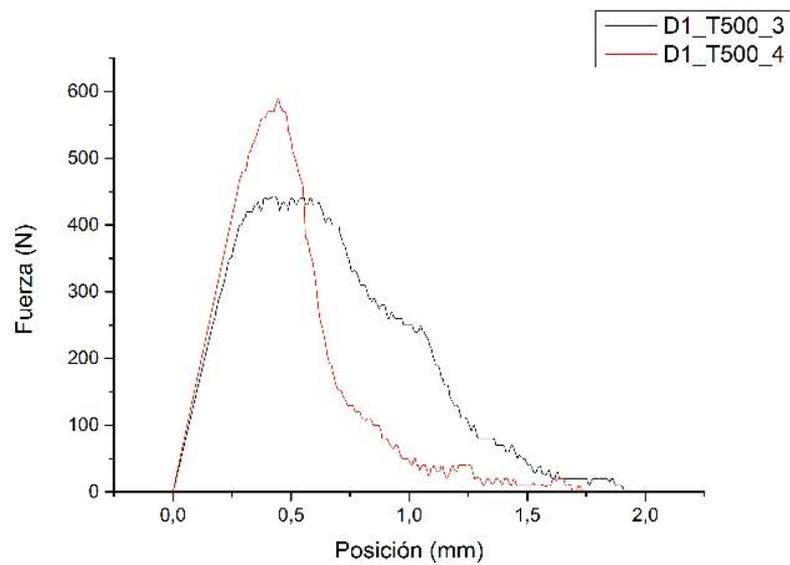


Figura 11.23. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 500 °C para un tiempo de exposición de 48h.

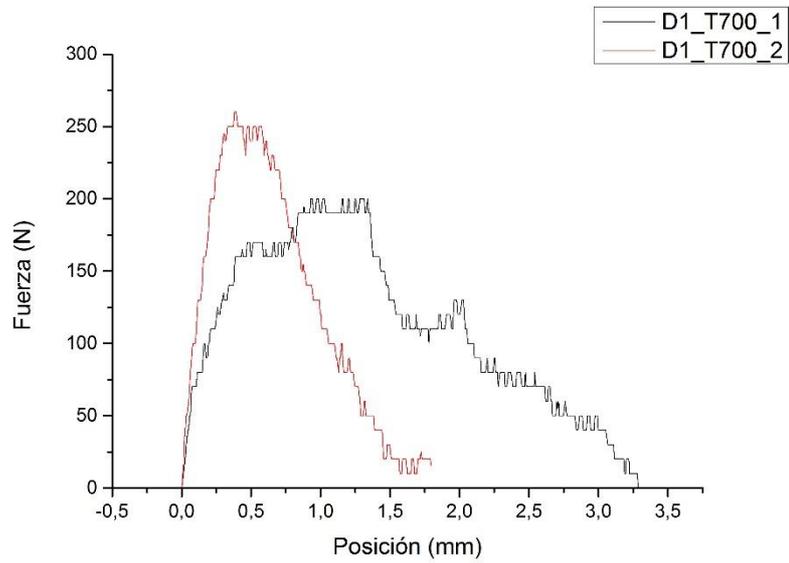


Figura 11.24. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 700 °C para un tiempo de exposición de 6h.

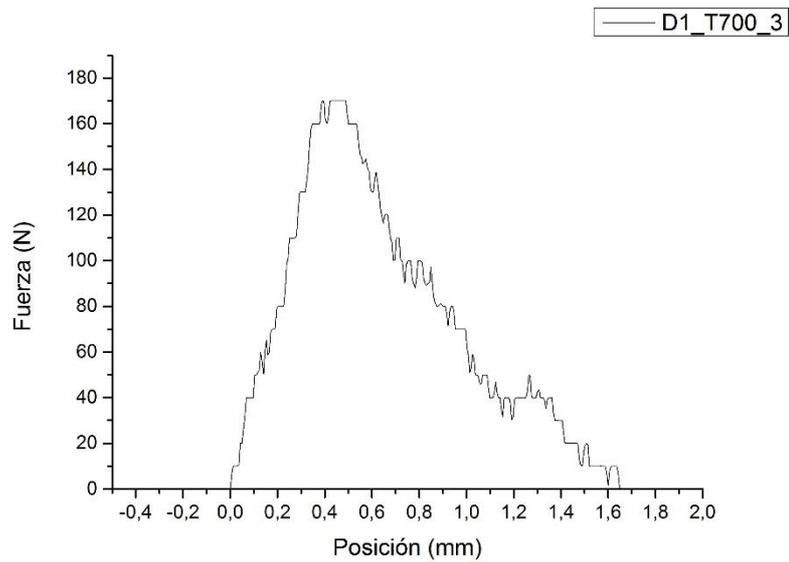


Figura 11.25. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 700 °C para un tiempo de exposición 24 h.

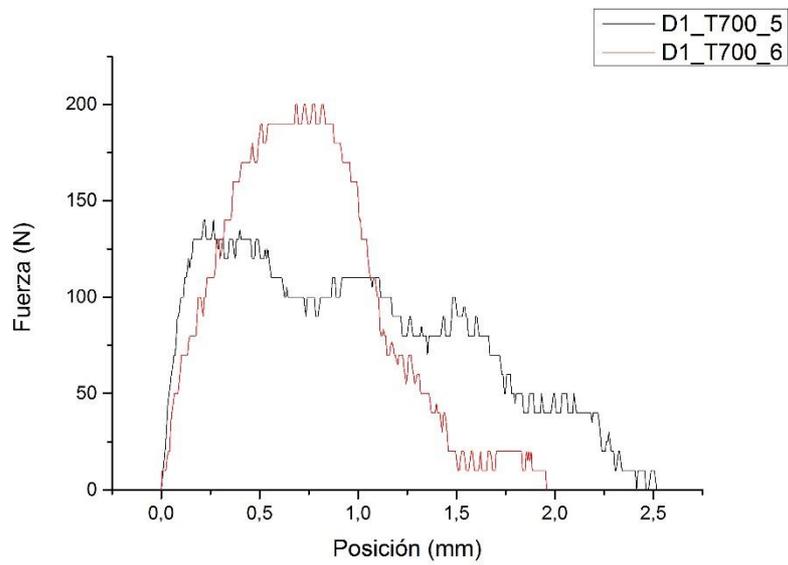


Figura 11.25. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 700 °C para un tiempo de exposición de 48h.

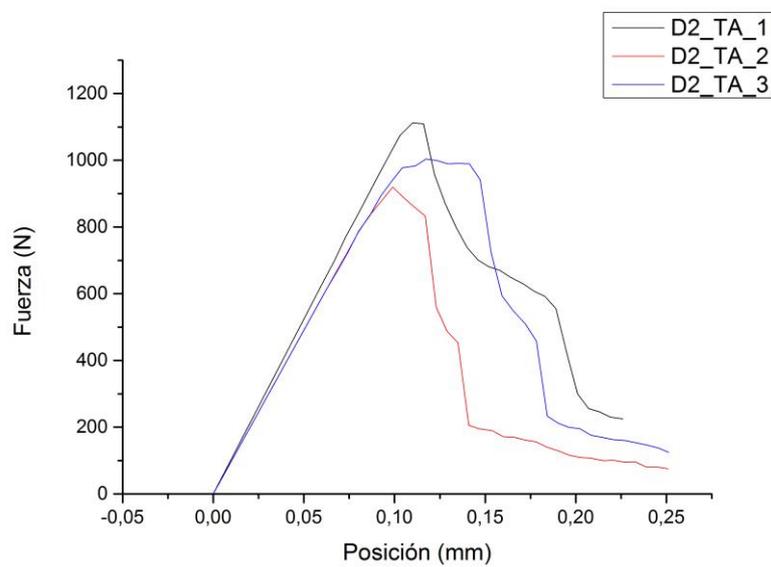


Figura 11.26. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a Temperatura Ambiente.

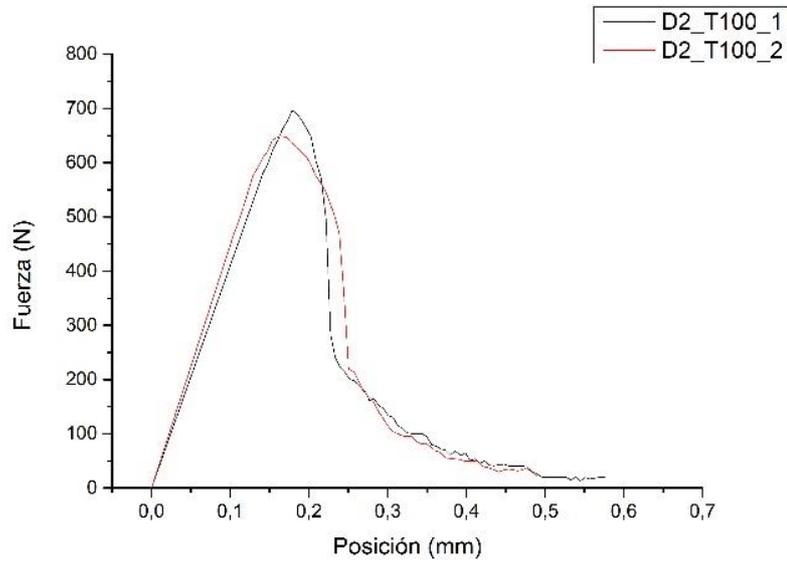


Figura 11.27. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 100 °C para un tiempo de exposición de 6h.

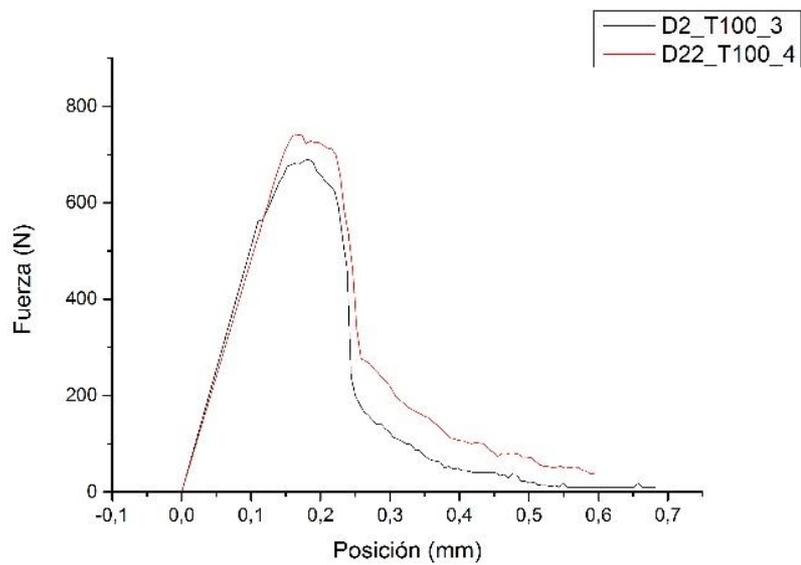


Figura 11.28. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 100 °C para un tiempo de exposición de 24h.

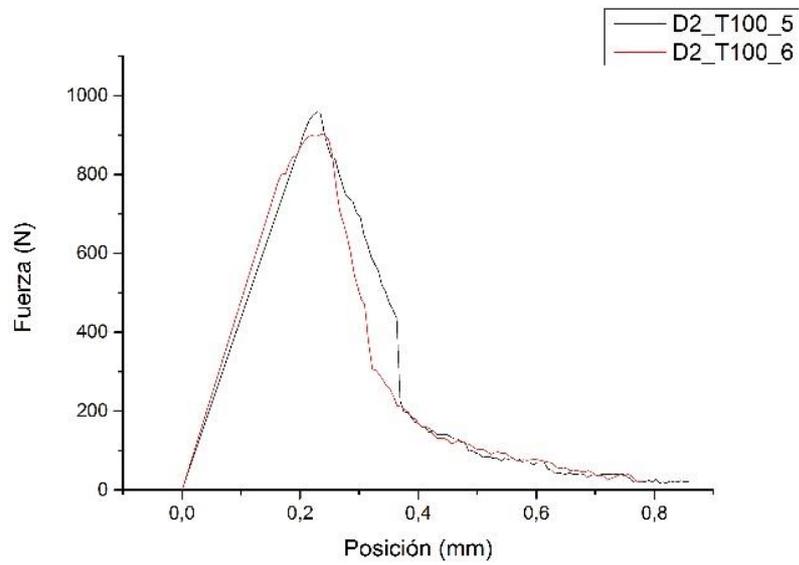


Figura 11.29. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 100 °C para un tiempo de exposición de 48h.

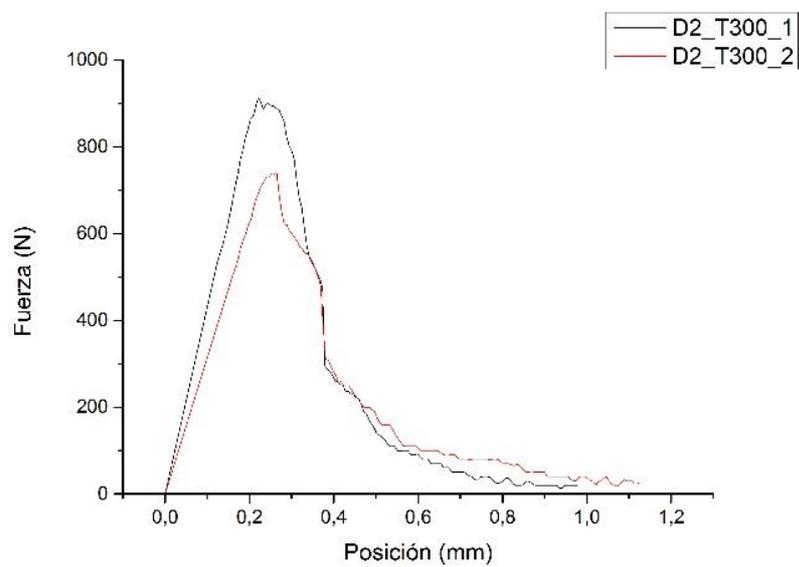


Figura 11.30. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 300 °C para un tiempo de exposición de 6h.

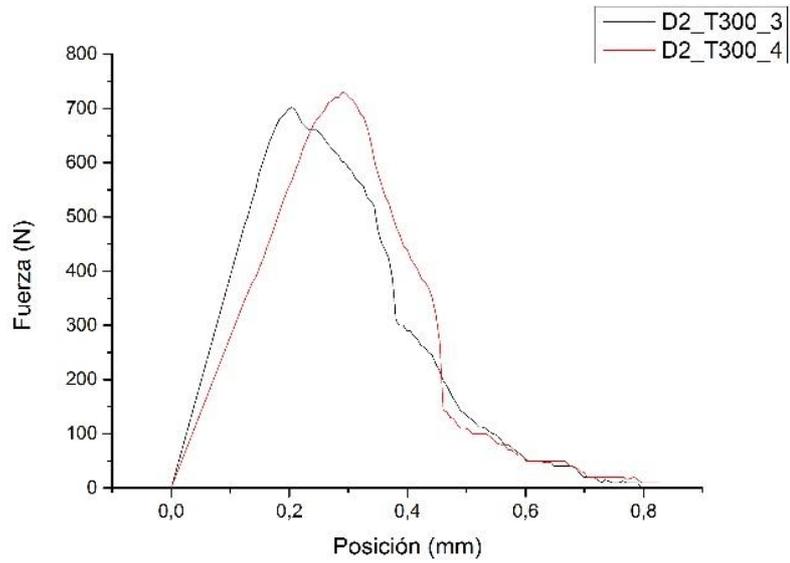


Figura 11.31. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 300 °C para un tiempo de exposición de 24h.

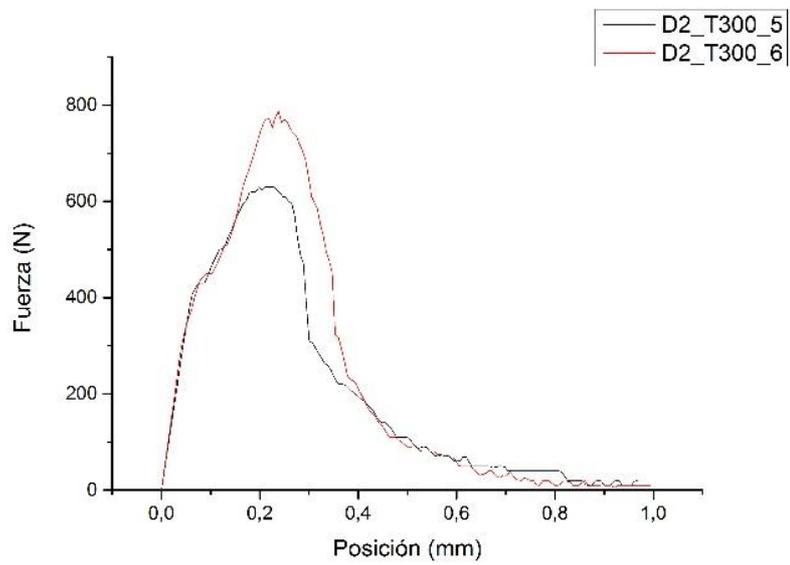


Figura 12.32. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 300 °C para un tiempo de exposición de 48h.

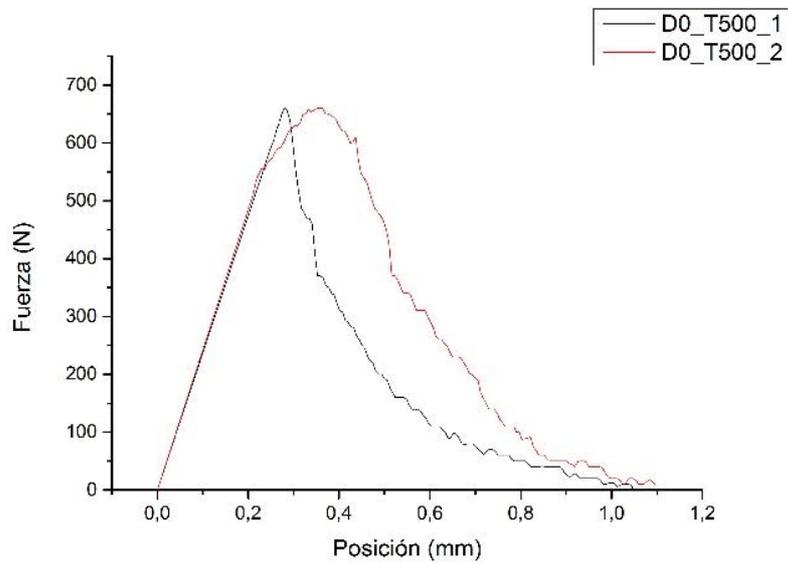


Figura 11.33. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 500 °C para un tiempo de exposición de 6h.

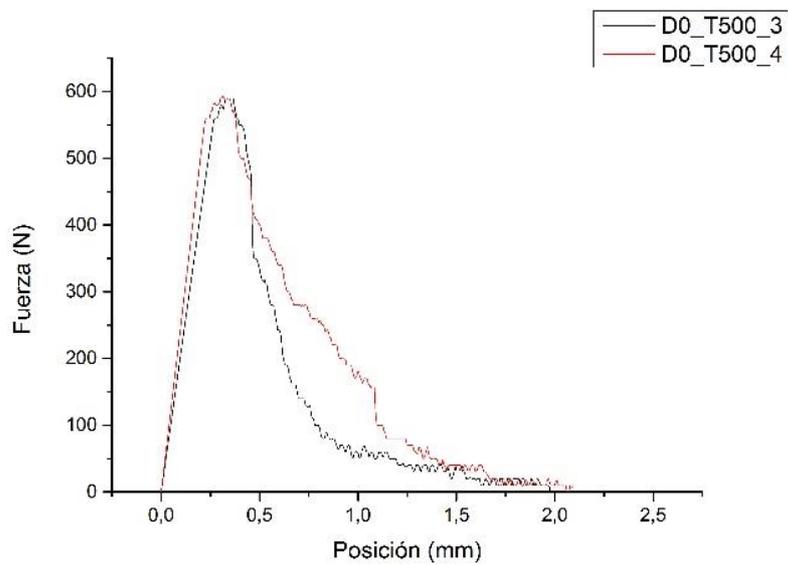


Figura 11.34. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 500 °C para un tiempo de exposición de 24h.

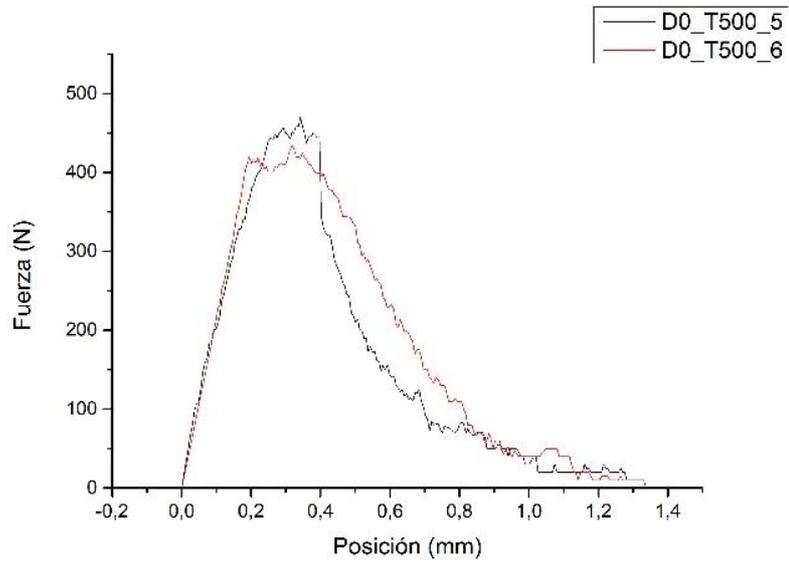


Figura 11.35. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 500 °C para un tiempo de exposición de 48h.

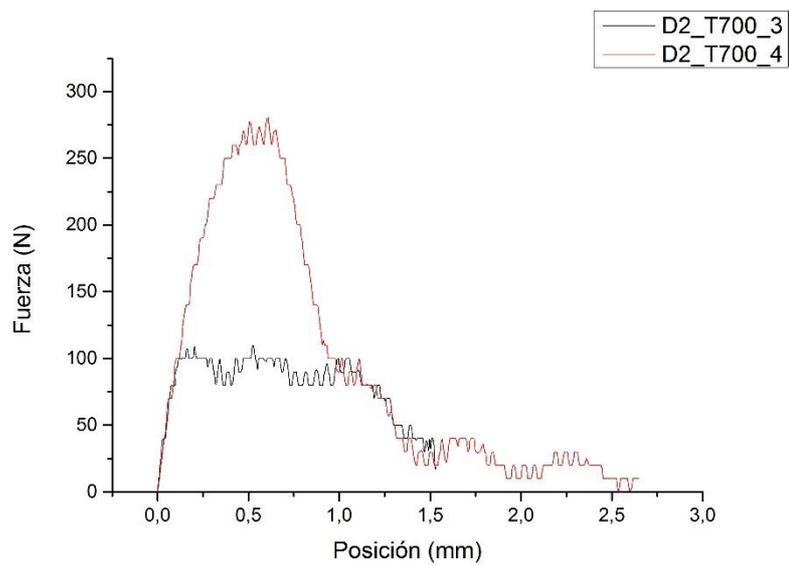


Figura 11.36. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 700 °C para un tiempo de exposición de 6h.

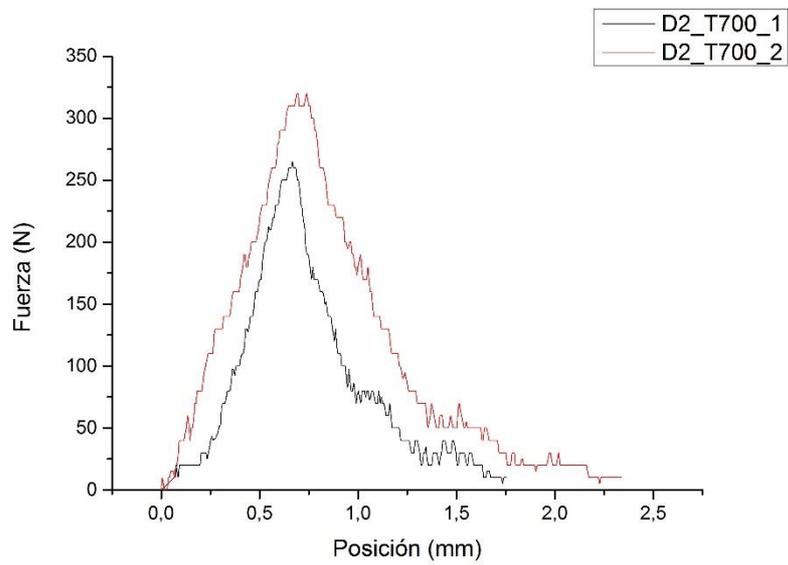


Figura 11.37. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 700 °C para un tiempo de exposición de 24h.

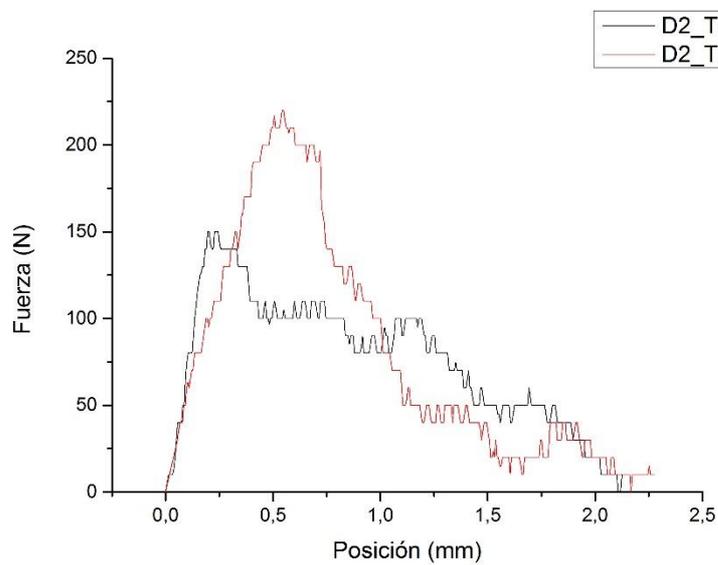


Figura 11.38. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 700 °C para un tiempo de exposición de 48h.

11.2.2. INFLUENCIA DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN DURANTE EL CALENTAMIENTO.

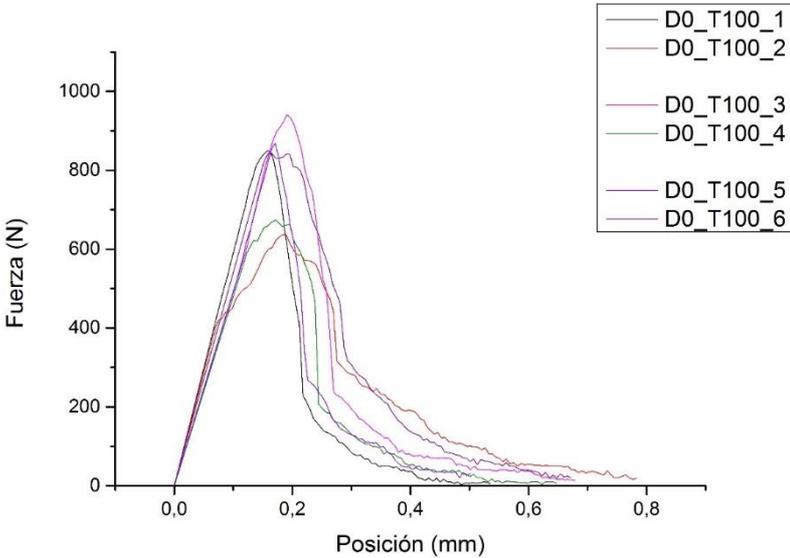


Figura 11.39. Hormigón sin fibras D0 a 100°C para los distintos tiempos de exposición.

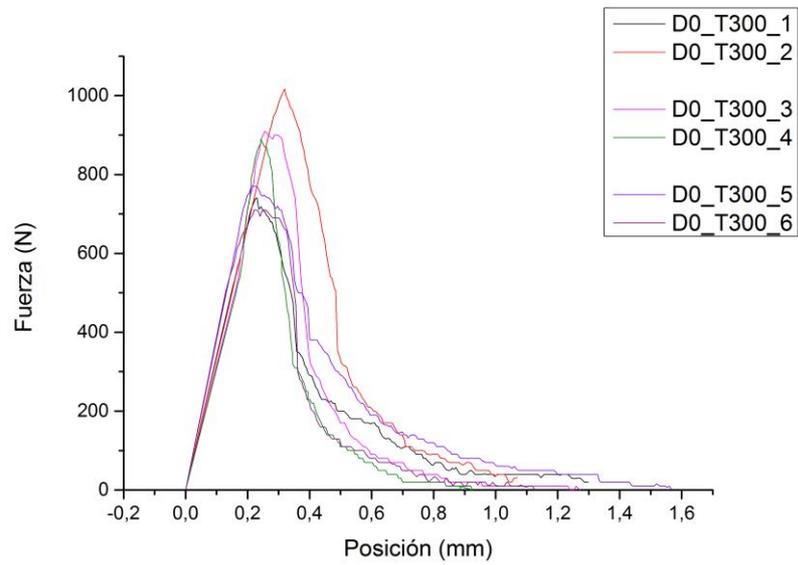


Figura 11.40. Hormigón sin fibras D0 a 300°C para los distintos tiempos de exposición.

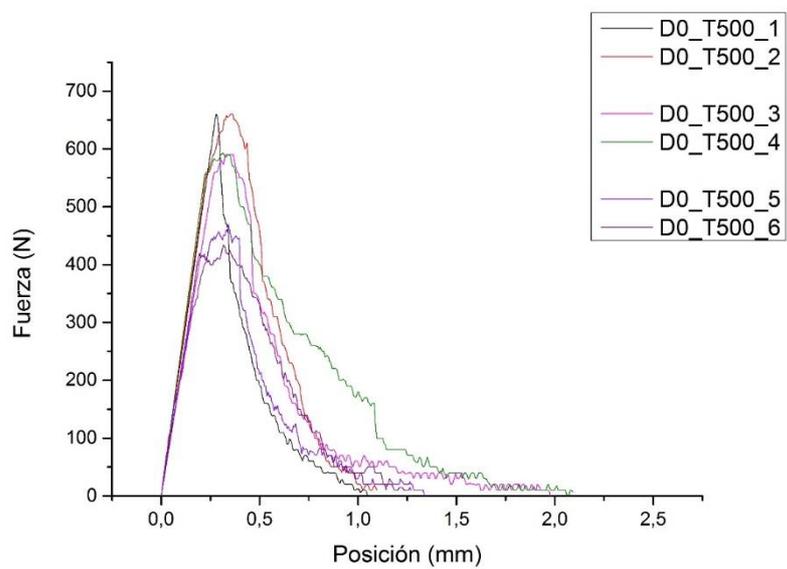


Figura 11.41. Hormigón sin fibras D0 a 500°C para los distintos tiempos de exposición.

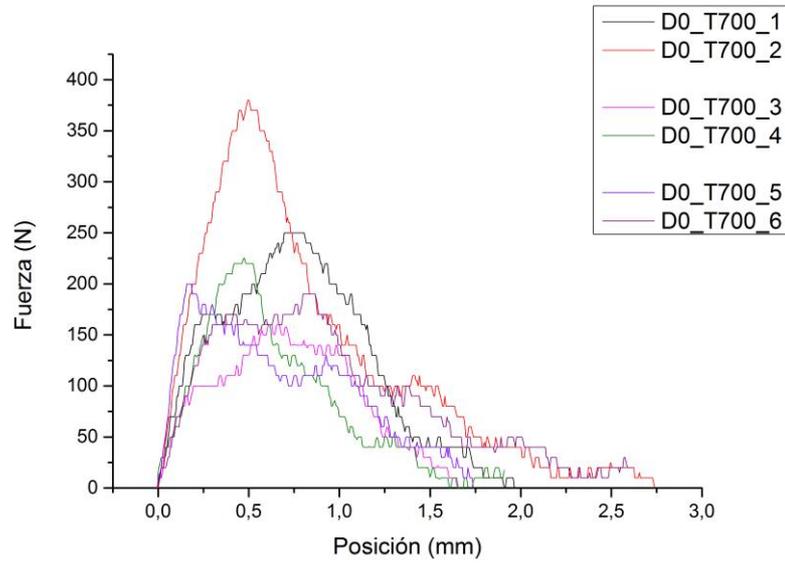


Figura 11.42. Hormigón sin fibras D0 a 700°C para los distintos tiempos de exposición.

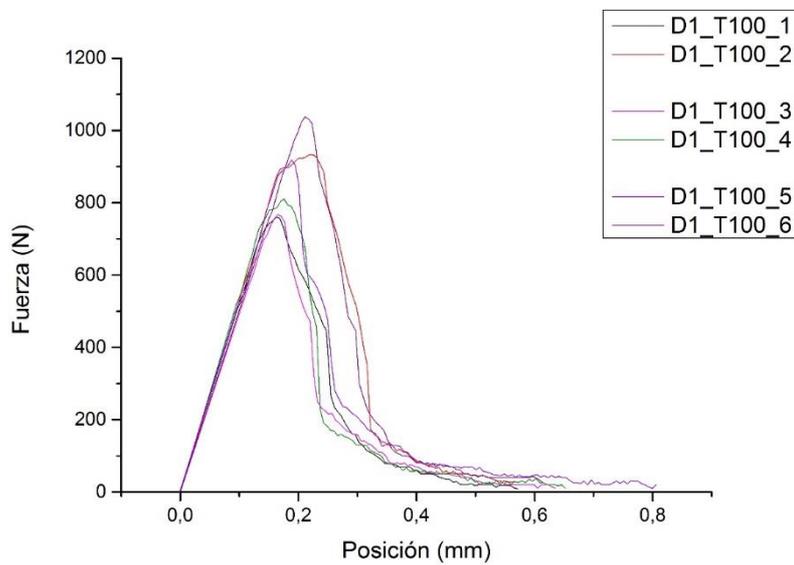


Figura 11.43. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 100°C para los distintos tiempos de exposición.

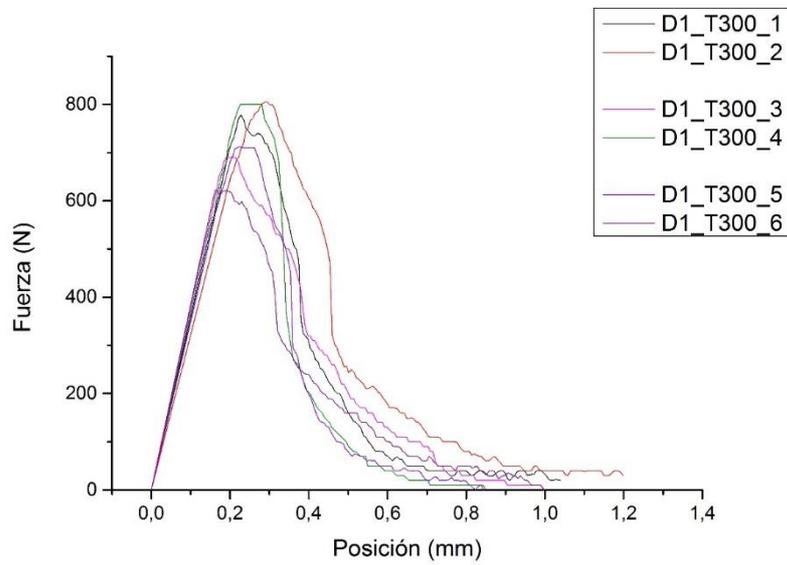


Figura 11.44. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 300°C para los distintos tiempos de exposición.

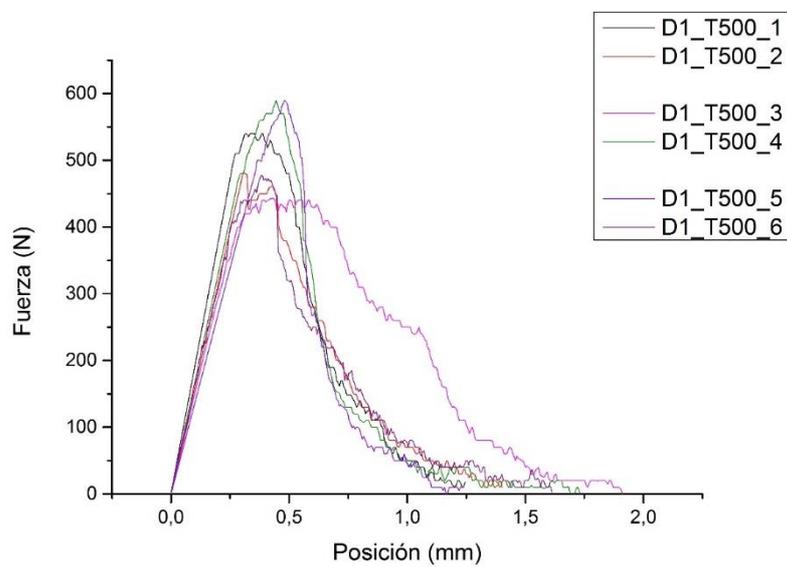


Figura 11.45. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 500°C para los distintos tiempos de exposición.

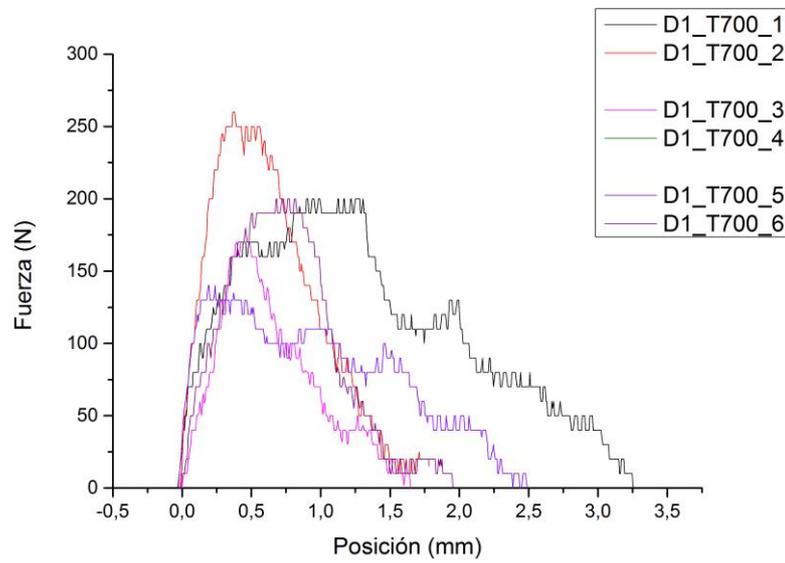


Figura 11.46. Hormigón con fibras de longitud 6 mm D1 a 700°C para los distintos tiempos de exposición.

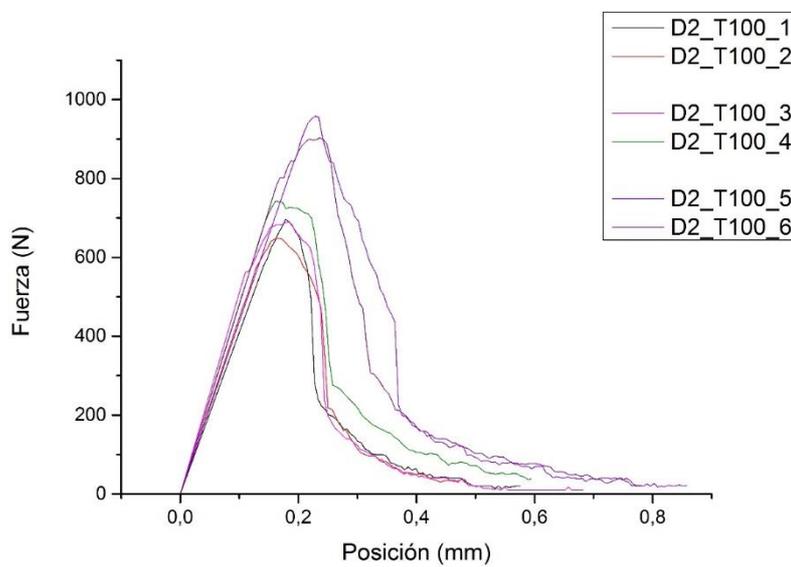


Figura 11.47. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 100°C para los distintos tiempos de exposición.

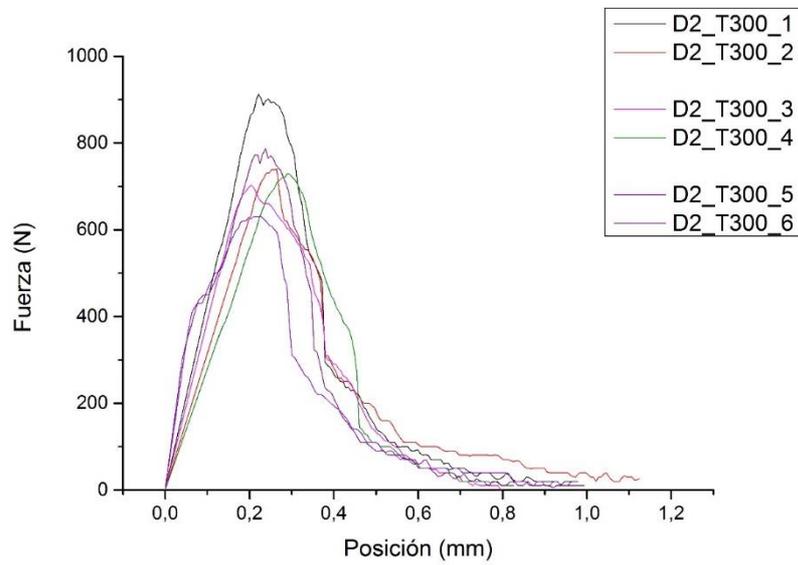


Figura 11.48. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 300°C para los distintos tiempos de exposición.

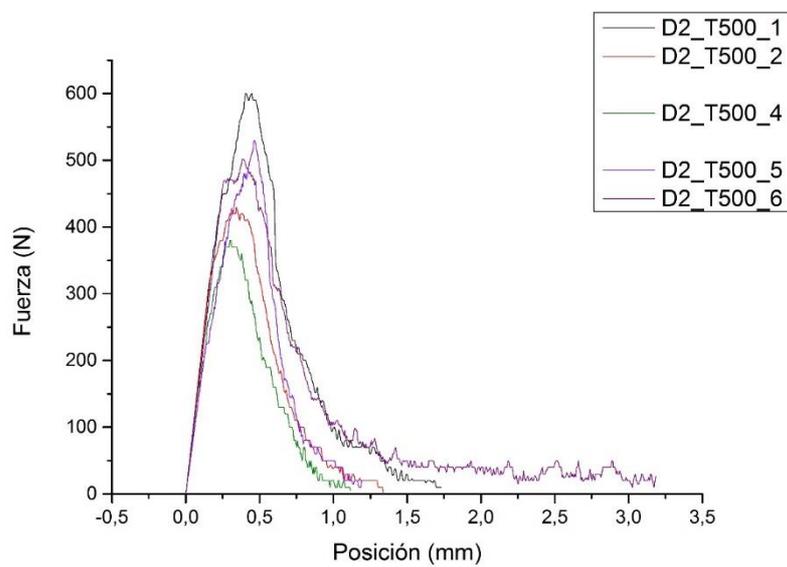


Figura 11.49. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 500°C para los distintos tiempos de exposición.

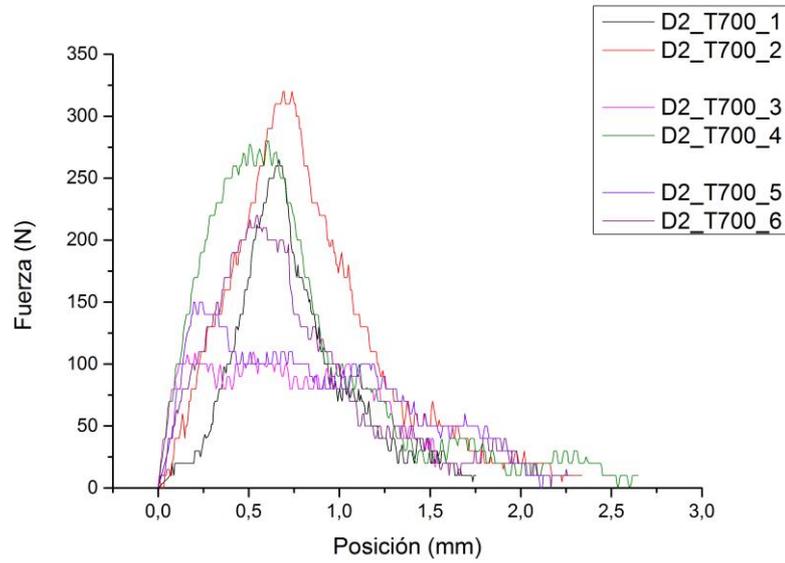


Figura 11.50. Hormigón con fibras de longitud 12 mm D2 a 700°C para los distintos tiempos de exposición.

11.2.3. EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA DE FRACTURA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

	A	Wf	du	Wfnm	WfT	Alig ()	Gf (N/mm)	Gf (N/m)	Gf media
DO_TA_1	7,309	113,542	0,381	38,327	151,869	1248,000	0,091	90,979	92,951
DO_TA_2	8,484	139,286	0,338	50,223	189,509	1336,500	0,104	104,217	
DO_TA_3	5,351	100,055	0,316	33,849	133,904	1196,000	0,084	83,658	
DO_T100_1	11,246	129,628	0,520	43,254	172,882	1326,000	0,098	97,759	97,759
DO_T100_2	53,493	181,598	0,816	131,110	312,708	1170,000	0,155	155,212	
DO_T100_3	19,792	179,361	0,665	59,526	238,887	1170,000	0,153	153,300	105,212
DO_T100_4	13,045	134,040	0,629	41,479	175,519	1274,000	0,105	105,212	
DO_T100_5	15,066	134,923	0,464	64,939	199,862	1175,000	0,115	114,828	114,828
DO_T100_6	21,315	201,326	0,592	72,011	273,337	1170,000	0,172	172,074	
DO_T300_1	66,560	265,824	1,263	105,400	371,224	1365,000	0,195	194,743	194,743
DO_T300_2	88,090	372,679	1,007	174,956	547,635	1300,000	0,287	286,676	
DO_T300_3	31,610	275,175	1,215	52,033	327,208	1271,700	0,216	216,384	190,832
DO_T300_4	33,807	214,179	0,916	73,815	287,993	1295,850	0,165	165,280	

DO_T300_5	76,192	339,958	1,569	97,121	437,079	1245,500	0,273	272,949	190,056
DO_T300_6	42,602	232,248	1,125	75,724	307,972	1222,000	0,190	190,056	
DO_T500_1	54,750	209,533	1,001	109,390	318,923	2162,000	0,097	96,916	249,010
DO_T500_2	106,149	308,972	1,019	208,339	517,311	1240,800	0,249	249,010	
DO_T500_3	94,380	299,881	2,045	92,303	392,185	1391,250	0,216	215,548	215,548
DO_T500_4	241,404	397,970	2,240	215,539	613,509	1248,000	0,319	318,886	
DO_T500_5	86,397	212,126	1,410	122,548	334,674	1248,000	0,170	169,972	193,009
DO_T500_6	134,909	240,875	1,337	201,809	442,684	1248,000	0,193	193,009	
DO_T700_1	282,392	247,163	2,020	279,596	526,759	1274,910	0,194	193,867	225,376
DO_T700_2	326,746	337,267	2,741	238,413	575,680	1312,903	0,257	256,886	
DO_T700_3	943,517	124,162	2,448	770,847	895,010	1216,726	0,102	102,046	139,193
DO_T700_4	128,495	160,519	1,904	134,973	295,493	1153,215	0,139	139,193	
DO_T700_5	264,040	172,946	1,727	305,778	478,725	1287,503	0,134	134,327	134,327
DO_T700_6	741,125	235,035	3,363	440,752	675,787	1298,970	0,181	180,940	
D1_TA_1	6,019	98,811	0,397	30,286	129,097	1326,000	0,075	74,518	95,775
D1_TA_2	4,224	87,618	0,266	31,753	119,371	1209,000	0,072	72,472	
D1_TA_3	27,458	175,138	0,451	121,694	296,832	1248,000	0,140	140,335	
D1_T100_1	20,789	144,802	0,586	70,952	215,754	1274,000	0,114	113,660	113,660
D1_T100_2	26,274	208,144	0,537	97,854	305,998	1274,000	0,163	163,378	
D1_T100_3	14,256	136,009	0,604	47,204	183,213	1248,000	0,109	108,982	114,868
D1_T100_4	14,467	148,870	0,641	45,138	194,007	1296,000	0,115	114,868	
D1_T100_5	21,262	178,750	0,806	52,759	231,509	1222,000	0,146	146,277	146,277
D1_T100_6	23,830	202,618	0,586	81,331	283,949	1296,000	0,156	156,341	
D1_T300_1	47,285	249,357	1,013	93,357	342,714	1325,000	0,188	188,194	188,194
D1_T300_2	60,754	321,670	1,135	107,056	428,726	1279,200	0,251	251,462	
D1_T300_3	60,161	256,943	0,983	122,403	379,346	1222,000	0,210	210,264	171,584
D1_T300_4	21,166	218,599	0,751	56,367	274,965	1274,000	0,172	171,584	
D1_T300_5	23,637	212,845	0,745	63,454	276,299	1248,000	0,171	170,549	171,653
D1_T300_6	41,332	224,583	0,995	83,080	307,663	1300,000	0,173	172,756	
D1_T500_1	123,209	288,520	1,364	180,658	469,178	1261,000	0,229	228,803	221,521
D1_T500_2	76,038	267,370	1,402	108,471	375,840	1248,000	0,214	214,239	
D1_T500_3	250,673	398,811	1,862	269,252	668,063	1296,000	0,308	307,725	200,000
D1_T500_4	92,482	294,278	1,758	105,213	399,491	1248,000	0,236	235,800	
D1_T500_5	104,614	259,568	1,238	169,019	428,587	1248,000	0,208	207,987	211,179
D1_T500_6	125,994	267,535	1,614	156,146	423,681	1248,000	0,214	214,371	
D1_T700_1	-	368,236	3,253	0,000	368,236	1227,135	0,300	300,077	175,781
D1_T700_2	-	227,676	1,782	0,000	227,676	1295,225	0,176	175,781	
D1_T700_3	-	123,708	3,217	0,000	123,708	1298,032	0,095	95,304	95,304
D1_T700_4	-			-	-	1209,000	0,000	0,000	
D1_T700_5	-	198,728	2,490	0,000	198,728	1237,510	0,161	160,587	152,330

D1_T700_6		187,874	1,953	0,000	187,874	1304,021	0,144	144,073	
D2_TA_1	66,734	134,257	0,226	590,514	724,771	1222,000	0,110	109,867	96,526
D2_TA_2	7,856	89,748	0,251	62,615	152,363	1162,500	0,077	77,203	
D2_TA_3	21,715	127,930	0,251	172,807	300,736	1248,000	0,103	102,508	
D2_T100_1	8,974	122,594	0,604	29,702	152,296	1222,000	0,100	100,322	98,683
D2_T100_2	31,984	126,157	0,489	130,687	256,844	1300,000	0,097	97,044	
D2_T100_3	14,412	136,667	0,676	42,637	179,304	1248,000	0,110	109,508	118,235
D2_T100_4	18,485	164,542	0,594	62,212	226,754	1296,000	0,127	126,961	
D2_T100_5	25,929	245,098	0,797	65,041	310,139	1274,000	0,192	192,385	122,000
D2_T100_6	52,915	264,097	0,830	127,552	391,648	1325,000	0,199	199,318	
D2_T300_1	49,170	272,360	0,978	100,552	372,911	1261,000	0,216	215,987	208,378
D2_T300_2	31,984	246,383	1,125	56,870	303,253	1227,200	0,201	200,769	
D0_T300_3	14,412	224,115	0,796	36,225	260,340	1261,000	0,178	177,728	178,462
D2_T300_4	18,485	218,979	0,827	44,720	263,699	1222,000	0,179	179,197	
D2_T300_5	36,817	239,656	0,967	76,152	315,807	1272,000	0,188	188,409	186,470
D2_T300_6	32,188	230,573	0,994	64,748	304,404	1249,500	0,185	184,532	
D2_T500_1	135,324	361,257	1,662	162,805	524,062	1224,000	0,295	295,145	236,011
D2_T500_2	80,439	233,478	1,298	123,953	357,431	1320,000	0,177	176,877	
D2_T500_3				#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	1248,000	0,000	0,000	180,000
D2_T500_4	75,363	180,530	1,093	137,902	318,432	1248,000	0,145	144,656	
D2_T500_5	92,048	249,875	3,273	56,255	306,130	1248,000	0,200	200,220	200,220
D2_T500_6	131,036	383,626	1,662	157,647	541,272	1248,000	0,307	307,393	
D2_T700_1	124,222	145,514	1,794	138,486	284,000	1274,910	0,114	114,137	158,165
D2_T700_2	230,289	252,933	2,344	196,492	449,425	1250,944	0,202	202,193	
D2_T700_3		122,918	1,544	0,000	122,918	1212,500	0,101	101,375	142,645
D2_T700_4	99,276	241,847	2,631	75,466	317,313	1315,000	0,184	183,914	
D2_T700_5		162,874	2,155	0,000	162,874	1187,595	0,137	137,146	140,802
D2_T700_6	94,864	178,969	2,216	85,617	264,586	1238,895	0,144	144,458	

Tabla 11.1. Energía de fractura.

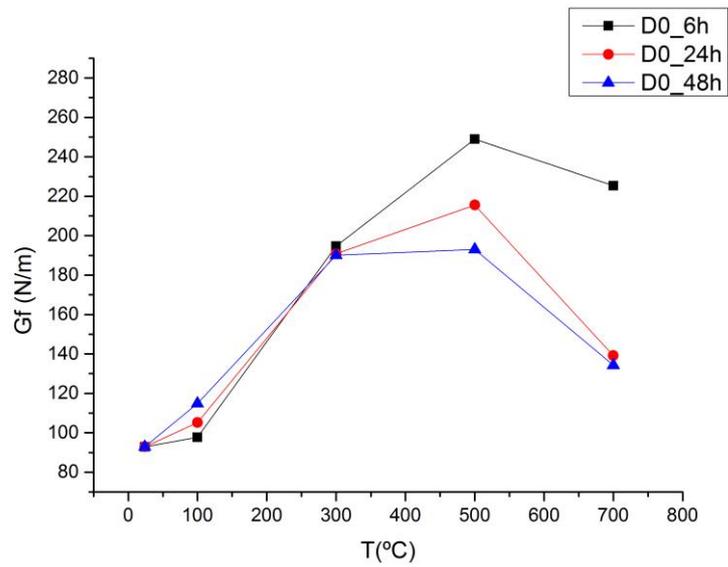


Figura 11.51. Evolución de la energía de fractura del hormigón sin fibras D0 en función de la temperatura, para los distintos tiempos de exposición.

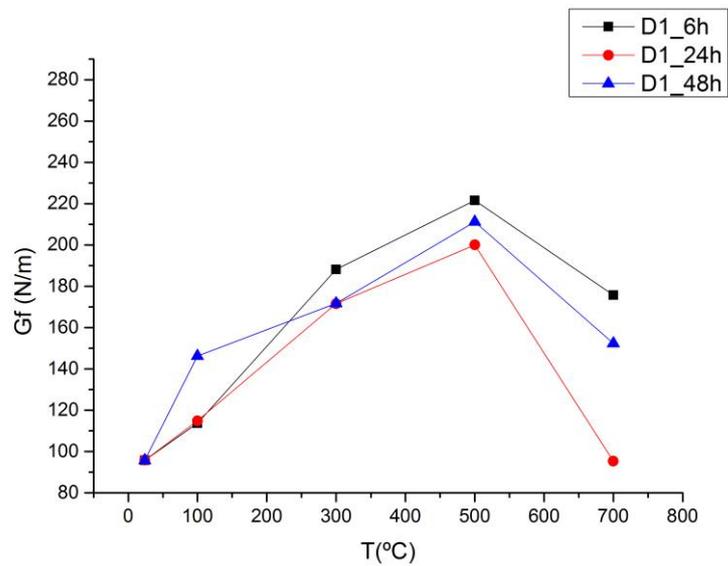


Figura 11.52. Evolución de la energía de fractura del hormigón con fibra corta D1 en función de la temperatura, para los distintos tiempos de exposición.

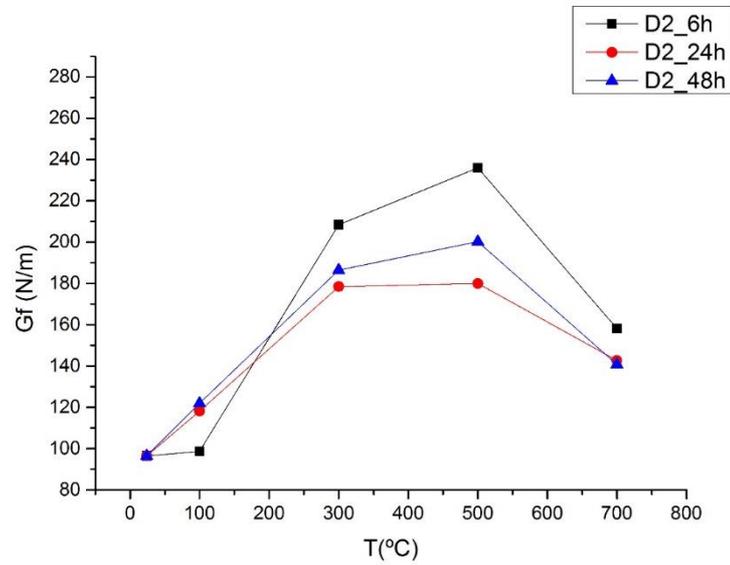


Figura 11.53. Evolución de la energía de fractura del hormigón con fibra larga D2 en función de la temperatura, para los distintos tiempos de exposición.

12.2.1. EVOLUCIÓN DE LA CARGA DE PICO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

	Carga de pico (N)	Carga de pico media (N)	Desviación (%)
DO_TA_1	1034,55	1133,60	9,40%
DO_TA_2	1246,25		
DO_TA_3	1120,00		
DO_T100_1	848,60	742,81	20,14%
DO_T100_2	637,02		
DO_T100_3	940,69		
DO_T100_4	673,86	807,28	23,37%
DO_T100_5	868,30		
DO_T100_6	843,75		
DO_T300_1	741,21	1017,06	19,18%
DO_T300_2	1017,06		
DO_T300_3	910,00		
		900,00	1,57%

D0_T300_4	890,00		
D0_T300_5	770,00	740,00	5,73%
D0_T300_6	710,00		
D0_T500_1	660,00	660,00	0,00%
D0_T500_2	660,00		
D0_T500_3	590,00	591,79	0,43%
D0_T500_4	593,57		
D0_T500_5	470,00	452,14	5,59%
D0_T500_6	434,28		
D0_T700_1	250,00	315,00	29,18%
D0_T700_2	380,00		
D0_T700_3	160,00	225,58	20,56%
D0_T700_4	225,58		
D0_T700_5	200,00	195,00	3,63%
D0_T700_6	190,00		
D1_TA_1	875,28	1023,29	15,20%
D1_TA_2	1095,28		
D1_TA_3	1099,30		
D1_T100_1	760,97	760,97	15,96%
D1_T100_2	932,73		
D1_T100_3	766,94	788,62	3,89%
D1_T100_4	810,29		
D1_T100_5	918,08	977,64	8,62%
D1_T100_6	1037,20		
D1_T300_1	778,05	791,78	2,45%
D1_T300_2	805,50		
D1_T300_3	690,00	745,00	10,44%
D1_T300_4	800,00		
D1_T300_5	712,72	667,61	9,56%
D1_T300_6	622,50		
D1_T500_1	540,00	510,00	8,32%
D1_T500_2	480,00		
D1_T500_3	443,63	516,82	20,03%
D1_T500_4	590,00		
D1_T500_5	590,00	477,50	16,66%
D1_T500_6	477,50		

D1_T700_1	200,00	230,00	18,45%
D1_T700_2	260,00		
D1_T700_3	170,00	170,00	12,48%
D1_T700_4			
D1_T700_5	140,00	170,00	24,96%
D1_T700_6	200,00		
D2_TA_1	1112,00	1011,93	9,53%
D2_TA_2	919,50		
D2_TA_3	1004,30		
D2_T100_1	696,50	672,45	5,06%
D2_T100_2	648,41		
D2_T100_3	689,72	715,93	5,18%
D2_T100_4	742,14		
D2_T100_5	956,85	930,04	4,08%
D2_T100_6	903,23		
D2_T300_1	912,85	826,43	14,79%
D2_T300_2	740,00		
D0_T300_3	702,50	716,25	2,71%
D2_T300_4	730,00		
D2_T300_5	630,00	708,50	15,67%
D2_T300_6	787,00		
D2_T500_1	600,00	515,00	23,34%
D2_T500_2	430,00		
D2_T500_3	--	380,00	-
D2_T500_4	380,00		
D2_T500_5	530,00	515,71	3,92%
D2_T500_6	501,42		
D2_T700_1	265,00	292,50	13,30%
D2_T700_2	320,00		
D2_T700_3	110,00	195,00	61,65%
D2_T700_4	280,00		
D2_T700_5	150,00	185,00	26,76%
D2_T700_6	220,00		

Tabla 11.2. Carga de pico.

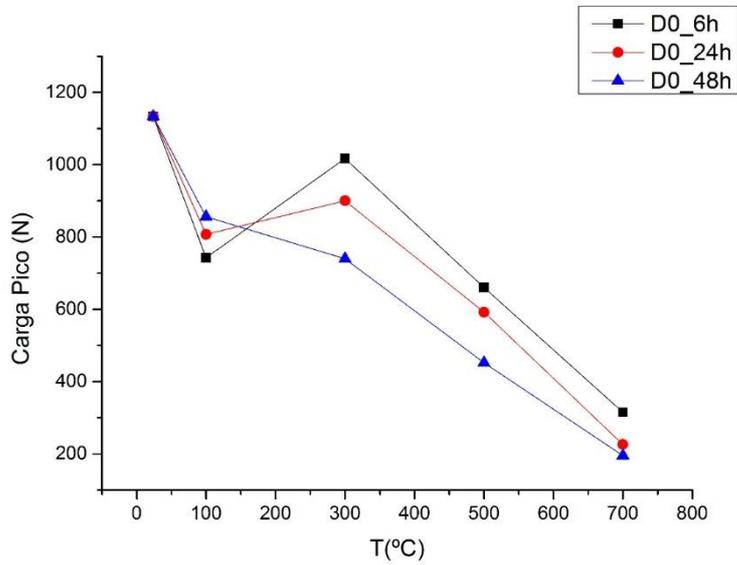


Figura 11.54. Evolución carga de pico en función de la temperatura para hormigón sin fibras D0 según tiempo de exposición.

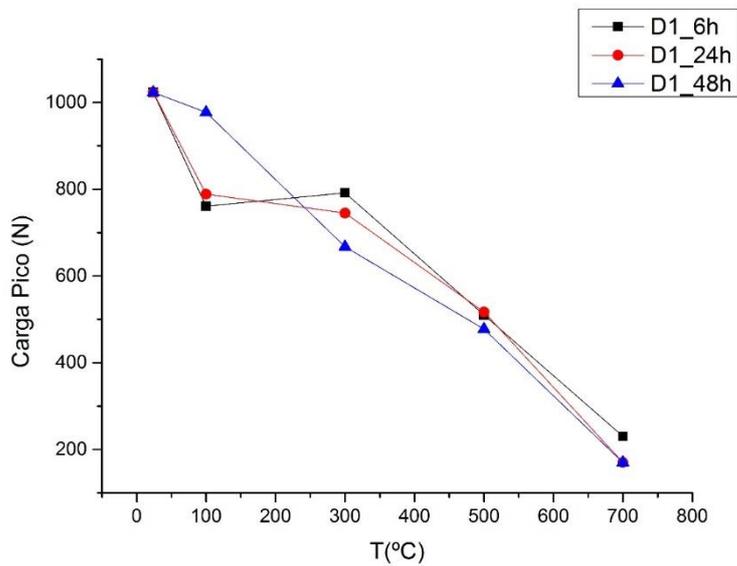


Figura 11.55. Evolución carga de pico en función de la temperatura para hormigón con fibras cortas D1 según tiempo de exposición.

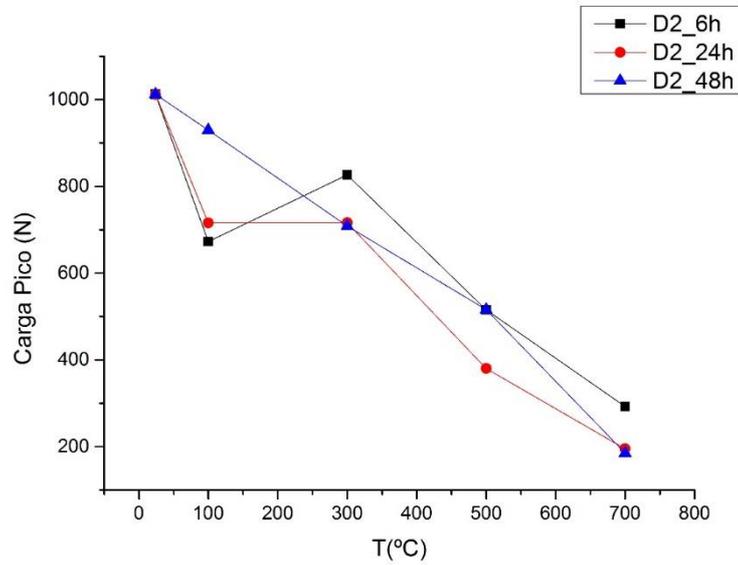


Figura 11.56. Evolución carga de pico en función de la temperatura para hormigón con fibras largas D2 según tiempo de exposición.

11.3. ENSAYO A COMPRESIÓN UNIAXIAL.

	Carga de rotura (kN)	Tension de Rotura - Fc (Mpa)	Media Tension de Rotura - Fc (Mpa)	Desviación (%)
D0_TA_1	0,107	46,763	59,048	13,49%
D0_TA_2	0,132	57,558		
D0_TA_3	0,133	57,909		
D0_TA_4	0,099	43,139		
D0_TA_5	0,149	64,767		
D0_TA_6	0,128	55,960		
D0_T100_1	0,164	71,236	69,833	2,84%
D0_T100_2	0,157	68,430	82,323	16,17%
D0_T100_3	0,168	72,912		
D0_T100_4	0,211	91,734		
D0_T100_5	0,168	73,301		
D0_T100_6	0,235	102,373		
D0_T300_1	0,171	74,198		
D0_T300_2	0,233	101,281		

D0_T300_3	0,251	103,164	103,164	58,64%
D0_T300_4	0,045	17,605		
D0_T300_5	0,168	74,821	110,000	1,72%
D0_T300_6	0,180	72,152		
D0_T500_1			103,369	-
D0_T500_2	0,216	103,369		
D0_T500_3	0,238	96,787	97,576	1,14%
D0_T500_4	0,243	98,364		
D0_T500_5	0,185	81,988	89,204	11,44%
D0_T500_6	0,209	96,419		
D0_T700_1	0,112	48,595	48,283	0,91%
D0_T700_2	0,111	47,971		
D0_T700_3	0,099	43,100	45,886	8,59%
D0_T700_4	0,112	48,673		
D0_T700_5	0,100	43,256	43,256	16,37%
D0_T700_6	0,123	53,271		
D1_TA_1	0,146	63,520	59,594	5,05%
D1_TA_2	0,134	58,376		
D1_TA_3	0,136	56,428		
D1_TA_4	0,138	60,052		
D1_T100_1	0,164	71,314	77,958	12,05%
D1_T100_2	0,194	84,603		
D1_T100_3	0,203	88,149	88,149	4,10%
D1_T100_4	0,214	93,254		
D1_T100_5	0,176	76,458	76,458	26,06%
D1_T100_6	0,241	104,633		
D1_T300_1	0,184	79,809	83,609	6,43%
D1_T300_2	0,201	87,408		
D1_T300_3	0,183	70,732	76,232	10,20%
D1_T300_4	0,182	81,732		
D1_T300_5	0,228	90,102	73,515	31,91%
D1_T300_6	0,145	56,929		
D1_T500_1	0,192	77,765	75,213	4,80%
D1_T500_2	0,179	72,662		
D1_T500_3	0,186	75,984	77,940	3,55%
D1_T500_4	0,197	79,895		
D1_T500_5	0,178	72,517	70,659	3,72%
D1_T500_6	0,167	68,801		
D1_T700_1	0,104	45,127	42,866	7,46%
D1_T700_2	0,094	40,606		

D1_T700_3	0,107	46,568	35,228	45,52%
D1_T700_4	0,055	23,888		
D1_T700_5	0,090	38,853	35,501	13,35%
D1_T700_6	0,074	32,150		
D2_TA_1	0,173	75,250	63,208	12,89%
D2_TA_2	0,131	57,207		
D2_TA_3	0,138	60,208		
D2_TA_4	0,138	60,169		
D2_T100_1	0,139	60,675	54,362	11,16%
D2_T100_2	0,110	48,049		
D2_T100_3	0,087	38,034	41,892	7,27%
D2_T100_4	0,105	45,750		
D2_T100_5	0,154	66,910	68,917	4,12%
D2_T100_6	0,163	70,924		
D2_T300_1	0,215	91,812	91,812	18,88%
D2_T300_2	0,156	67,300		
D0_T300_3	0,233	91,211	89,785	1,12%
D2_T300_4	0,223	89,785		
D2_T300_5	0,219	86,837	86,837	22,82%
D2_T300_6	0,132	58,816		
D2_T500_1	0,194	80,480	80,480	38,82%
D2_T500_2	0,315	124,666		
D2_T500_3	0,146	62,179	70,304	16,34%
D2_T500_4	0,204	78,429		
D2_T500_5	0,194	81,072	74,965	11,52%
D2_T500_6	0,170	68,859		
D2_T700_1	0,079	34,254	39,944	20,14%
D2_T700_2	0,105	45,633		
D2_T700_3	0,087	37,878	32,890	21,45%
D2_T700_4	0,064	27,902		
D2_T700_5	0,069	29,851	33,221	14,35%
D2_T700_6	0,084	36,592		

Tabla 11.3. Resistencia a compresion.

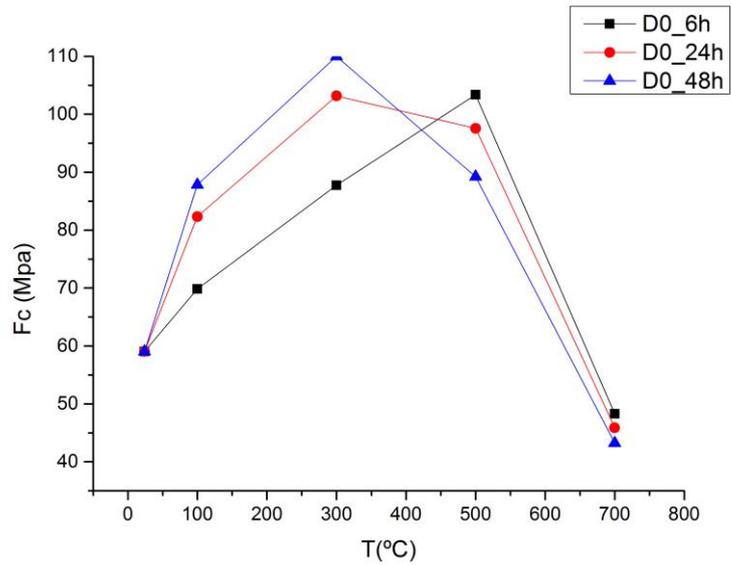


Figura 11.57. Evolución tensión de rotura en función de la temperatura para hormigón sin fibras D0 según tiempo de exposición.

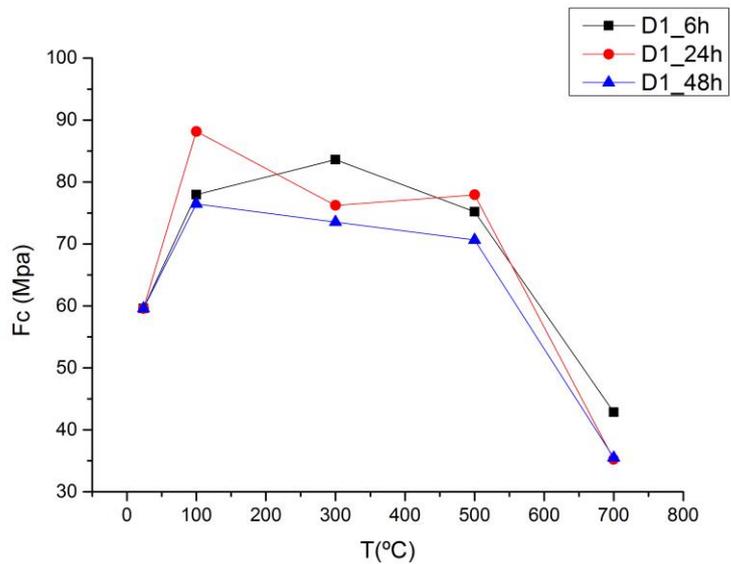


Figura 11.58. Evolución tensión de rotura en función de la temperatura para hormigón con fibras largas D1 según tiempo de exposición.

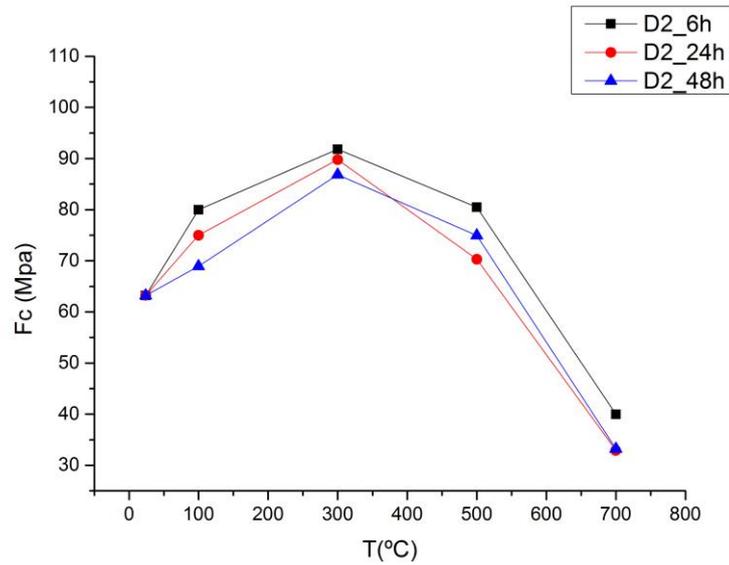


Figura 11.59. Evolución tensión de rotura en función de la temperatura para hormigón con fibras largas D2 según tiempo de exposición.

11.4. ENSAYO A COMPRESIÓN UNIAxIAL CON TRANSDUCTORES CILÍNDRICOS.

11.4.1. MÓDULO ELÁSTICO ESTABILIZADO.

	D	a0	B	S	α	V1(α)	Ei	Ec (Mpa)	Ec Medio (Mpa)	Desviación
D0_TA_1	48	22	48	200	0,46	2,507	9319,44	5576,51	5896,73	8,73%
D0_TA_2	47	22	46	200	0,47	2,574	9707,30	6490,47		
D0_TA_3	48	22	46	200	0,46	2,507	9005,95	5623,22		
D0_T100_1	48	22	51	200	0,46	2,507	5949,21	3350,45	3550,58	7,97%
D0_T100_2	48	22	44	200	0,46	2,507	5745,83	3750,71		
D0_T100_3	48	22	45	200	0,46	2,507	4899,47	3127,16		
D0_T100_4	48	22	49	200	0,46	2,507	4798,33	2812,60	2969,88	7,49%
D0_T100_5	48	23	47	200	0,48	2,646	4940,83	3332,18		
D0_T100_6	48	22	45	200	0,46	2,507	4790,77	3057,78	3194,98	6,07%
D0_T300_1	48	22	52,5	200	0,46	2,507	3383,64	1851,13	1886,24	2,63%
D0_T300_2	48	22	50	200	0,46	2,507	3344,74	1921,35		

D0_T300_3	48	21	47,1	200	0,44	2,385	3157,89	1748,72	1735,26	1,10%
D0_T300_4	48	21,5	48,9	200	0,45	2,444	3076,92	1721,80		
D0_T300_5	48	21,5	47	200	0,45	2,444	3822,18	2225,30	2297,78	4,46%
D0_T300_6	48	22	47	200	0,46	2,507	3878,65	2370,26		
D0_T500_1	48	22	47	200	0,46	2,507	2368,42	1447,35	1435,29	1,19%
D0_T500_2	48	21,6	47	200	0,45	2,456	2421,05	1423,22		
D0_T500_3	48	21,5	52,5	200	0,45	2,444	2078,33	1083,26	1289,60	22,63%
D0_T500_4	48	22	48	200	0,46	2,507	2500,00	1495,93		
D0_T500_5	48	22	48	200	0,46	2,507	2638,89	1579,04	1431,43	14,58%
D0_T500_6	48	22	48	200	0,46	2,507	2145,52	1283,82		
D0_T700_1	48	20,7	46,6	200	0,43	2,351	875,00	475,94	510,13	9,48%
D0_T700_2	48	22,13	44,1	200	0,46	2,524	825,24	544,33		
D0_T700_3	48	21,89	46,7	200	0,46	2,492	684,93	416,77	392,81	8,63%
D0_T700_4	48	21,85	50,75	200	0,46	2,487	661,30	368,84		
D0_T700_5	48	20,98	50,8	200	0,44	2,382	1272,73	652,21	388,53	47,99%
D0_T700_6	48	22,53	48	200	0,47	2,578	616,44	388,53		
D1_TA_1	50	26	51	200	0,52	2,974	10149,44	7386,19	7594,15	2,69%
D1_TA_2	50	26	51	200	0,52	2,974	10444,52	7600,93		
D1_TA_3	50	26	48	200	0,52	2,974	10081,54	7795,32		
D1_T100_1	50	26	49	200	0,52	2,974	5253,03	3978,89	4002,11	0,82%
D1_T100_2	50	26	49	200	0,52	2,974	5314,32	4025,32		
D1_T100_3	50	26	48	200	0,52	2,974	4938,04	3818,22	4244,95	14,22%
D1_T100_4	50	27	48	200	0,54	3,178	5445,16	4671,68		
D1_T100_5	50	26	47	200	0,52	2,974	5279,27	4168,93	4353,03	5,98%
D1_T100_6	50	27	48	200	0,54	3,178	5288,33	4537,13		
D1_T300_1	50	26,5	50	200	0,53	3,072	3569,81	2789,92	2521,75	15,04%
D1_T300_2	50	26	49,2	200	0,52	2,974	2987,38	2253,58		
D1_T300_3	50	26	47	200	0,52	2,974	3061,22	2417,38	2597,35	9,80%
D1_T300_4	50	26	49	200	0,52	2,974	3666,67	2777,31		
D1_T300_5	50	26	48	200	0,52	2,974	2976,12	2301,22	2212,96	5,64%
D1_T300_6	50	26	50	200	0,52	2,974	2862,33	2124,70		
D1_T500_1	50	26	48,5	200	0,52	2,974	1885,00	1442,51	1331,70	11,77%
D1_T500_2	50	26	48	200	0,52	2,974	1578,95	1220,89		
D1_T500_3	50	27	48	200	0,54	3,178	1491,58	1279,70	1277,12	0,29%
D1_T500_4	50	26	48	200	0,52	2,974	1648,33	1274,54		
D1_T500_5	50	26	48	200	0,52	2,974	1353,16	1046,30	1268,76	24,80%
D1_T500_6	50	26	48	200	0,52	2,974	1928,57	1491,22		
D1_T700_1	50	26,39	48	200	0,53	3,050	810,81	652,59	699,06	9,40%
D1_T700_2	50	25,75	48	200	0,52	2,927	989,01	745,54		
D1_T700_3	50	26,17	48	200	0,52	3,007	539,29	424,32	424,32	70,71%

D1_T700_4	50	26	48	200	0,52	2,974	-	-		
D1_T700_5	50	26,33	48	200	0,53	3,038	981,77	785,30	711,13	14,75%
D1_T700_6	50	27,06	48	200	0,54	3,191	737,70	636,96		
D2_TA_1	50	26	48	200	0,52	2,974	10480,33	8103,68	7755,84	3,88%
D2_TA_2	50	26	48	200	0,52	2,974	9797,92	7576,02		
	50	26	48	200	0,52	2,974	9813,19	7587,83		
D2_T100_1	50	26	47	200	0,52	2,974	4047,14	3195,94	3259,33	2,75%
D2_T100_2	50	26	50	200	0,52	2,974	4476,25	3322,71		
D2_T100_3	50	26	48	200	0,52	2,974	5095,00	3939,59	4037,17	3,42%
D2_T100_4	50	27	48	200	0,54	3,178	4819,33	4134,75		
D2_T100_5	50	26	48	200	0,52	2,974	4368,89	3378,14	3544,17	6,62%
D2_T100_6	50	26	48	200	0,52	2,974	4798,33	3710,20		
D2_T300_1	50	26	48,5	200	0,52	2,974	4321,09	3306,74	2889,29	20,43%
D2_T300_2	50	26	47,2	200	0,52	2,974	3143,51	2471,85		
D0_T300_3	50	26	48,5	200	0,52	2,974	3900,00	2984,50	2698,70	14,98%
D2_T300_4	50	26	47	200	0,52	2,974	3055,56	2412,91		
D2_T300_5	50	26,5	48	200	0,53	3,072	3350,77	2727,85	2611,54	6,30%
D2_T300_6	50	25,5	49	200	0,51	2,883	3465,26	2495,22		
D2_T500_1	50	25,5	48	200	0,51	2,883	1945,00	1429,71	1488,32	5,57%
D2_T500_2	50	26,4	50	200	0,53	3,052	2000,00	1546,93		
D2_T500_3	50	26	48	200	0,52	2,974		0,00	1503,50	70,71%
D2_T500_4	50	26	48	200	0,52	2,974	1944,44	1503,50		
D2_T500_5	50	26	48	200	0,52	2,974	1648,46	1274,64	1350,62	7,96%
D2_T500_6	50	26	48	200	0,52	2,974	1845,00	1426,60		
D2_T700_1	50	27,3	48	200	0,55	3,245	950,00	841,53	841,53	#¡DIV/0!
D2_T700_2	50	26,96	48	200	0,54	3,169	-	-		
D2_T700_3	50	25	48	200	0,50	2,798	1033,39	722,73	779,11	10,23%
D2_T700_4	50	26,3	48	200	0,53	3,032	1047,76	835,49		
D2_T700_5	50	25,65	48	200	0,51	2,909	755,81	564,02	618,13	12,38%
D2_T700_6	50	26,22	48	200	0,52	3,016	850,00	672,23		

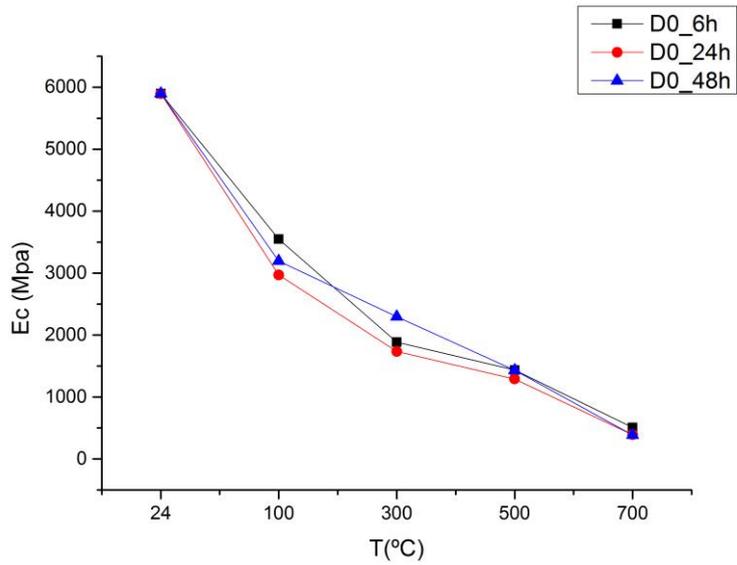


Figura 11.60. Evolución del módulo elástico estabilizado en función de la temperatura para hormigón sin fibras D0 según tiempo de exposición.

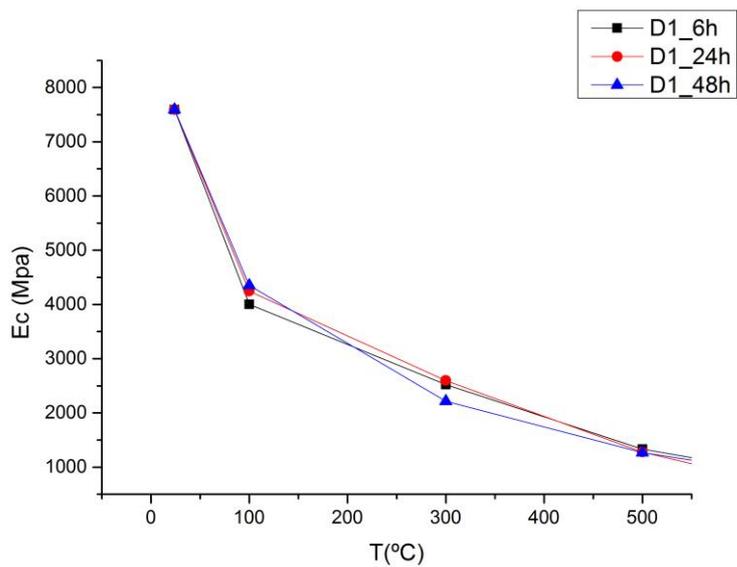


Figura 11.61. Evolución del módulo elástico estabilizado en función de la temperatura para hormigón con fibra corta D1 según tiempo de exposición.

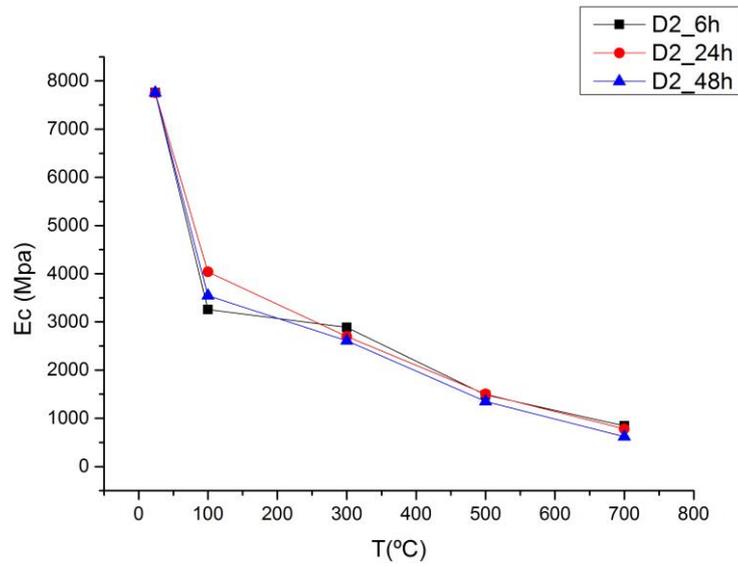


Figura 11.62. Evolución del módulo elástico estabilizado en función de la temperatura para hormigón con fibra larga D2 según tiempo de exposición.

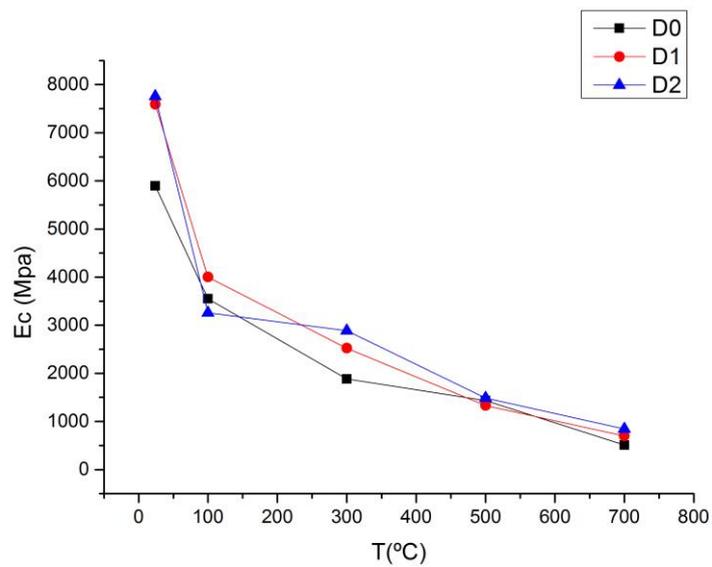


Figura 11.63. Evolución del módulo elástico estabilizado en función de la temperatura para hormigón con fibra larga D2 según tiempo de exposición.

11.5. ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA.

	Carga de Rotura (N)	Media Carga Rotura (N)	Media Carga Máxima (N)	fct (Mpa)	Media fct	β
DO_TA_1	198,9	205,23	1133,60	6,33	6,53	0,005760
DO_TA_2	200,9			6,39		
DO_TA_3	211,3			6,72		
DO_TA_4	209,8			6,68		
DO_T100_1			742,81	4,28	4,62	
DO_T100_2			807,28	4,65		
DO_T100_3			856,03	4,93		
DO_T100_4					5,10	
DO_T100_5			1017,06	5,86		
DO_T100_6			900,00	5,18		
DO_T300_1					3,27	
DO_T300_2			740,00	4,26		
DO_T300_3			660,00	3,80		
DO_T300_4					1,41	
DO_T300_5			591,79	3,41		
DO_T300_6			452,14	2,60		
DO_T500_1					1,41	
DO_T500_2			315,00	1,81		
DO_T500_3			225,58	1,30		
DO_T500_4					1,12	
DO_T500_5			195,00	1,12		
DO_T500_6						
D1_TA_1	197,8	197,05	1023,29	6,30	6,28	0,006132
D1_TA_2	175,9			5,60		

D1_TA_3	221,4			7,05		
D1_TA_4	193,1			6,15		
D1_T100_1			760,97	4,67	5,17	
D1_T100_2						
D1_T100_3			788,62	4,84		
D1_T100_4						
D1_T100_5			977,64	6,00		
D1_T100_6						
D1_T300_1			791,78	4,86	4,51	
D1_T300_2						
D1_T300_3			745,00	4,57		
D1_T300_4						
D1_T300_5			667,61	4,09		
D1_T300_6						
D1_T500_1			510,00	3,13	3,07	
D1_T500_2						
D1_T500_3			516,82	3,17		
D1_T500_4						
D1_T500_5			477,50	2,93		
D1_T500_6						
D1_T700_1			230,00	1,41	1,17	
D1_T700_2						
D1_T700_3			170,00	1,04		
D1_T700_4						
D1_T700_5			170,00	1,04		
D1_T700_6						
D2_TA_1	194,3	184,63	1011,93	6,18	5,88	0,005805
D2_TA_2	196,3			6,25		
D2_TA_3	163,1			5,19		
D2_TA_4	184,8			5,88		
D2_T100_1			672,45	3,90	4,49	
D2_T100_2						
D2_T100_3			715,93	4,16		
D2_T100_4						
D2_T100_5			930,04	5,40		
D2_T100_6						
D2_T300_1			826,43	4,80	4,36	
D2_T300_2						
D0_T300_3			716,25	4,16		

D2_T300_4			
D2_T300_5			
D2_T300_6	708,50	4,11	
D2_T500_1			
D2_T500_2	515,00	2,99	
D2_T500_3	380,00	2,21	2,73
D2_T500_4			
D2_T500_5	515,71	2,99	
D2_T500_6			
D2_T700_1	292,50	1,70	
D2_T700_2			
D2_T700_3	195,00	1,13	1,30
D2_T700_4			
D2_T700_5	185,00	1,07	
D2_T700_6			

Tabla 11.4. Resistencia de tracción indirecta.

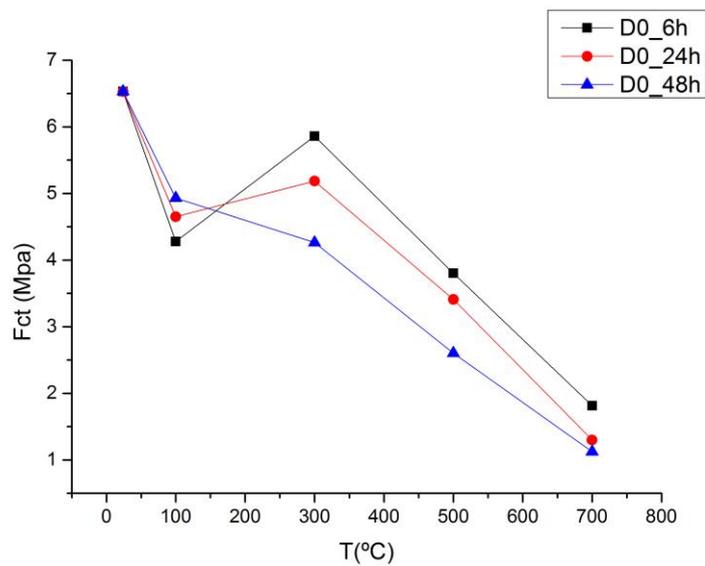


Figura 11.64. Evolución de la resistencia a tracción indirecta en función de la temperatura para hormigón sin fibras DO según tiempo de exposición.

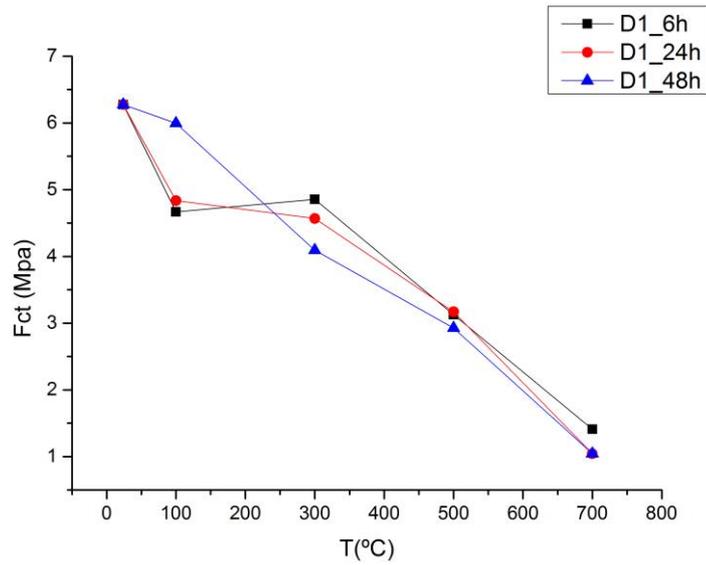


Figura 11.65. Evolución de la resistencia a tracción indirecta en función de la temperatura para hormigón con fibras cortas D1 según tiempo de exposición.

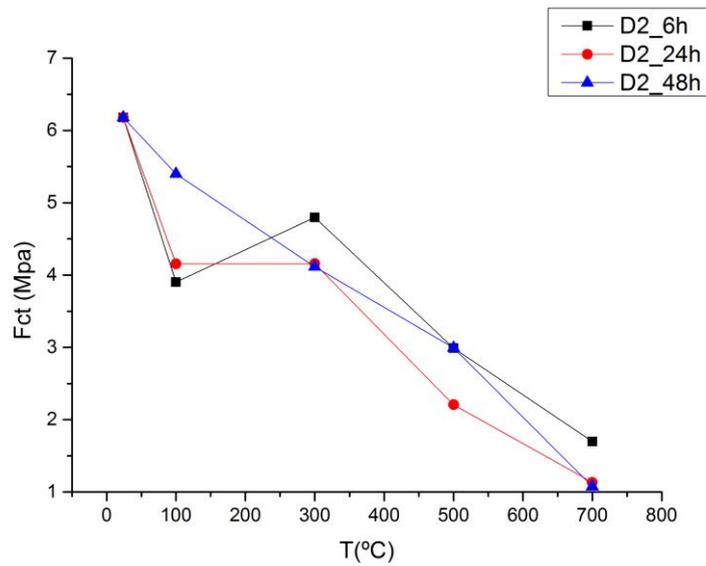


Figura 11.66. Evolución de la resistencia a tracción indirecta en función de la temperatura para hormigón con fibra larga D2 según tiempo de exposición.

11.6. LONGITUD CARACTERÍSTICA.

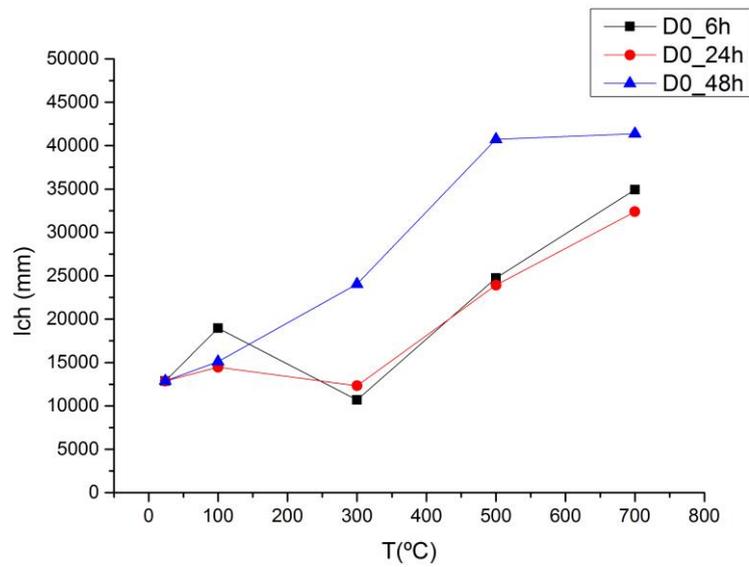


Figura 11.67. Evolución de la longitud característica en función de la temperatura para hormigón sin fibra DO según tiempo de exposición.

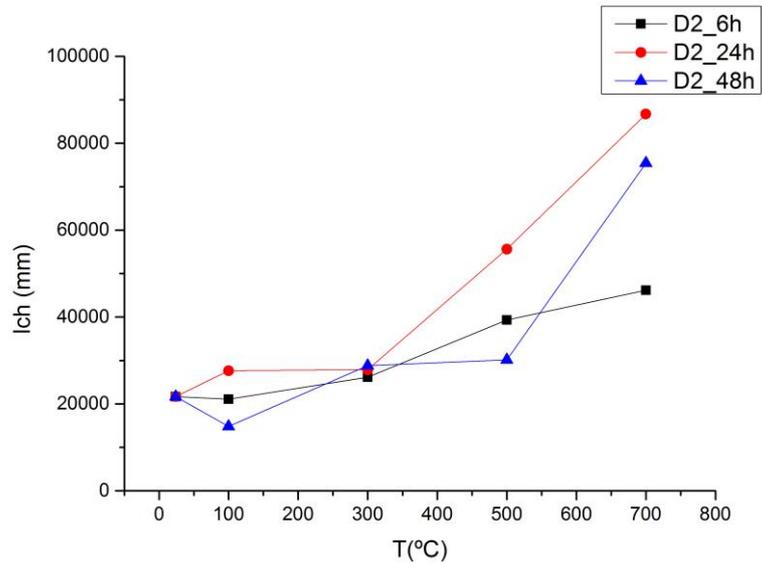


Figura 11.68. Evolución de la longitud característica en función de la temperatura para hormigón con fibra corta D1 según tiempo de exposición.

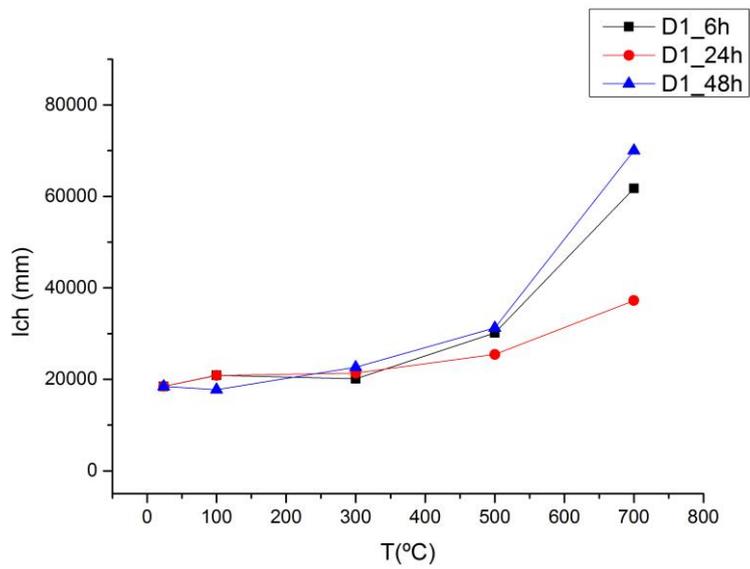


Figura 11.69. Evolución de la longitud característica en función de la temperatura para hormigón con fibra larga D2 según tiempo de exposición

11.7. ANÁLISIS DSC-TG.

	25°-300°C		
	T (°C)	TIPO	%w
DO-M	48.6	Endoter.	4.30
	93.1	Agua Superficial de silicatos y aluminatos	

Tabla 11.5. Análisis DSC-TG para un rango de temperaturas comprendido entre 25°C y 300°C.

	300°-500°C		
	T (°C)	TIPO	%w
DO-M	385.2	Endoter. Descomposición de aluminosilicatos cálcicos y formación de una disolución de Fe ₂ O ₃	0.82
	442.8	Endoter. Deshidrata. portlandita	

Tabla 11.6. Análisis DSC-TG para un rango de temperaturas comprendido entre 300°C y 500°C.

	500°-750°C		
	T (°C)	TIPO	%w
DO-M	573.3	Endoter. Descomposición CaCO ₃ poco cristalino y deshidratación de Ca(OH) ₂	5.56
	720.7	Endoter. Descomposición C-S-H, CaCO ₃ cris. y carboaluminato	

Tabla 11.7. Análisis DSC-TG para un rango de temperaturas comprendido entre 500°C y 750°C

750°-1000°C			
	T (°C)	TIPO	%w
DO-M	890.9	Exoter.y endoter.	0.40
	967.5	Cristalización de nuevas fases	

Tabla 11.8 . Análisis DSC-TG para un rango de temperaturas comprendido entre 750°C y 1000°C.

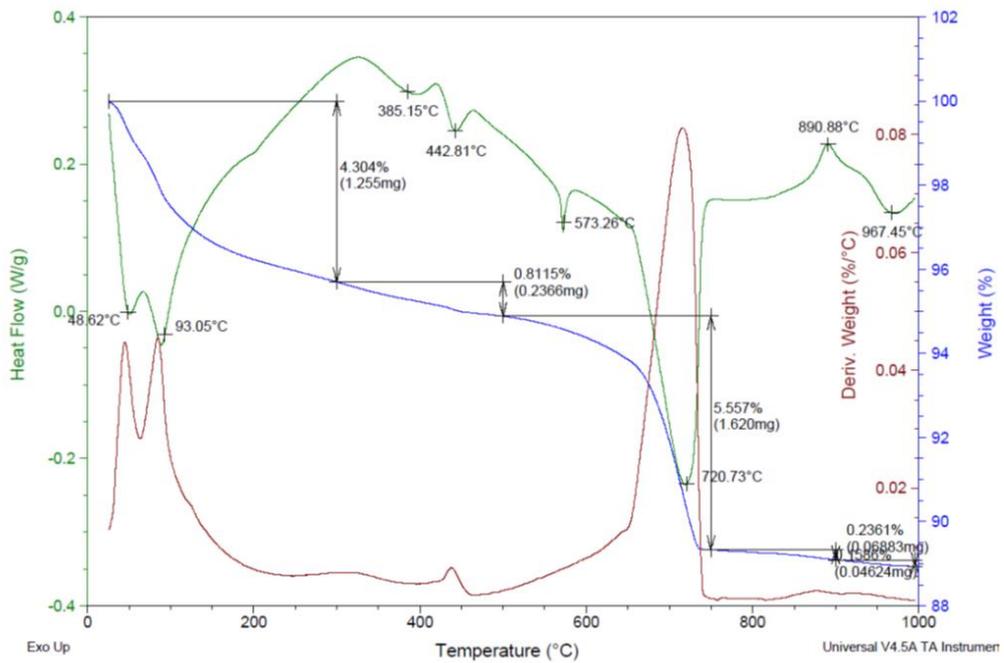


Figura 11.70. Efectos de la temperatura en la matriz del hormigón.

BLOQUE IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

12. ANÁLISIS DE RESULTADOS

12.1. INTRODUCCIÓN.

Tras exponer los resultados obtenidos experimentalmente de la forma más comprensible posible, es el momento de analizarlos. Para ello se sigue el mismo orden que en el bloque anterior *Resultados*.

Se pretende obtener la influencia del tiempo de exposición a altas temperaturas sobre el comportamiento en fractura de un hormigón autocompactante de alta resistencia reforzado con fibras de polipropileno. Además de obtener la influencia de la adición de fibras y los distintos rangos de temperatura a las propiedades mecánicas de dicho hormigón. Se comentarán detalladamente todos los resultados obtenidos, contrastando éstos con investigaciones previamente realizadas. Obteniendo, así, posteriormente unas conclusiones certeras.

12.2. ENSAYO DE FLEXIÓN EN TRES PUNTOS.

12.2.1. CURVAS CARGA-DESPLAZAMIENTO.

En el ensayo de flexión en tres puntos se llevan las probetas prismáticas hasta rotura. Para acelerar este proceso, las probetas se presentan entalladas. A través del crecimiento de grieta se llevan las probetas al colapso (Figura 12.1).



Figura 12.1. Ensayo de flexión en tres puntos donde aparece el crecimiento de grieta.

Destacar que, en los H.A.R., como consecuencia del fuerte incremento experimentado por la capacidad resistente de la pasta de cemento, es factible, en ocasiones, agotar la capacidad portante del arido grueso (rotura transgranular o clivaje). Por este motivo, al observar la sección de rotura de un H.A.R. se aprecia como la mayoría de los aridos han sido atravesados, hecho que puede observarse en las probetas rotas (figura 12.2).



Figura 12.2. Rotura transgranular propia de los H.A.R.

Los datos obtenidos directamente de los transductores en el ensayo de flexión en tres puntos (canal 1 y canal 2) han de ser tratados para corregirlos y representarlos correctamente. Es necesario realizare el ajuste de las unidades al rango en el que se mueven los resultados. La carga se medirá en Newtons y el desplazamiento en milímetros. Además se corrigen posibles errores iniciales tanto en medidas de carga como en medidas de desplazamientos.

Debido al alto número de datos que se tiene para cada probeta, se utiliza un programa informático (*OriginPro*) para el tratamiento de éstos, obteniendo las curvas experimentales fuerza-desplazamiento (Figuras 11.1-11.50), lo que facilita y mejora el análisis de los datos. De este modo se pueden calcular parámetros como la carga de pico y la energía de fractura.

Del estudio de las gráficas mostradas en el apartado 11.2.1 (Figuras 11.1-11.38), se puede observar que para la misma dosificación y temperatura, hay diferencias importantes en las curvas. A pesar de haber sido rigurosos en el procedimiento de fabricación y ensayos, es muy difícil obtener resultados idénticos para hormigones iguales y con el mismo historial. Esto se debe principalmente a la heterogeneidad que tienen las estructuras de hormigón, debido a que la distribución interior de los áridos, de la arena, del cemento y en nuestro caso de las fibras, presentan una aleatoriedad incontrolable.

Hay casos que cuentan con dos curvas con diferencias muy significativas (Figuras 11.2, 11.11, 11.15). En este tipo de casos es necesario estudiar las condiciones particulares del ensayo, para poder desechar una de las dos. Puede ser debido a que una de las dos presente irregularidades

próximas a la zona entallada y esto hace que la fractura sea irregular (Figuras 12.3 y 12.4).



Figura 12.3. *Fractura irregular debido a áridos de mayor resistencia en la zona de entalla lo que obliga un crecimiento de grieta irregular o grieta iniciada en el enfriamiento de la propia probeta.*



Figura 12.4. *Fractura irregular debido a defectos cercanos a la zona entallada, porosidad en este caso.*

En el caso de no ser visibles estos defectos, se toma como referencia la curva que tenga mejores propiedades (carga de pico, trabajo de fractura, etc). Dicha afirmación se justifica con el razonamiento de que es siempre más difícil mejorar algo que empeorarlo, y por tanto, cualquier error en cualquiera de las fases de la realización o ensayo de una probeta, puede acarrear un empeoramiento de las propiedades reflejadas en las curvas. Para evitar esta elección forzosa, es

conveniente tener más de dos muestras, ya que en este caso se desecha la curva que más se aleje de la media.

Realizando un análisis global de las curvas carga-desplazamiento se observa que poseen tres tramos:

- *Tramo inicial prepico*: este tramo es lineal cuya pendiente está directamente relacionada con el módulo elástico del hormigón, es decir, un descenso de la pendiente acarrea un descenso del módulo elástico y por lo tanto una pérdida de rigidez. Debe considerarse una corrección en el tramo inicial de la curva $P - \delta$ para obtener una pendiente constante, ya que los datos obtenidos tras los ensayos reflejan el aplastamiento del hormigón en los apoyos y en el punto de aplicación de la carga.
- *Pico de la curva*: de este tramo se obtiene la carga de pico, o carga última. Por ser un hormigón de alta resistencia, esta carga máxima es mayor que la de un hormigón convencional, aunque éstos últimos presentan este tramo más suavizado y no tan puntiagudo como ocurre con los H.A.R.
- *Cola de la curva*: es el tramo anterior a que se produzca la rotura total del espécimen. Es necesario realizar el ajuste de la cola de la curva $P - \delta$ para determinar la energía de fractura no medida al finalizar el ensayo. Esta corrección está basada en el hecho de que sobre una probeta entallada sin accón de peso propio es imposible medir el trabajo total necesario para romper el ligamento del hormigón, ya que la fisura no llegaría a abrirse nunca. Por lo tanto se utiliza una fórmula de correlación de cola de curva experimental:

$$P' = A \left(\frac{1}{\delta^2} - \frac{1}{\delta_u^2} \right)$$

Mediante la consideración de $P' = 0$ para $\delta = \delta_u$ se obtiene la constante A en cada caso, por lo que la integración de la curva $P' - \delta$ de la que se obtiene el trabajo de fractura medido introduce un trabajo de fractura no medido.

A partir del trabajo de fractura, área encerrada por la curva $P - \delta$, se obtiene la energía de fractura. Por lo tanto, modificaciones considerables en ésta induce a distintos valores de energía de fractura. Los siguientes apartados se centrarán en comentar detalladamente cada uno de estos parámetros.

12.2.2. INFLUENCIA DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN DURANTE EL CALENTAMIENTO.

En este apartado se lleva a cabo un estudio de la influencia que ejerce el tiempo de exposición a alta temperatura para cada dosificación. Para ello se han expuesto las curvas carga-desplazamiento de las dosificaciones D0, D1 y D2 para cada temperatura en las que aparecen los tres tiempos de exposición que se han tenido en cuenta: 6 h, 24 h y 48 h de calentamiento.

En primer lugar, no se aprecia efecto alguno del tiempo de exposición sobre la pendiente de la curva $P - \delta$. Obteniéndose una pendiente similar para cada teperatura.

Este hecho lo podemos observar, por ejemplo, en la gráfica 11.41: Hormigón sin fibras D0 a una temperatura de calentamiento de 500°C.

	Pendiente	Δ Pendiente
D0_T500_1 (6h)	2368,42	9,03%
D0_T500_2 (6h)	2421,05	
D0_T500_3 (24h)	2078,33	
D0_T500_4 (24h)	2500,87	
D0_T500_5 (48h)	2638,88	
D0_T500_6 (48h)	2145,52	

Tabla 12.1. Pendiente curva $P - \delta$ de hormigón sin fibras D0 a 500°C.

Respecto al estudio de la carga de pico o carga última, se puede observar una disminución de la misma con el incremento del tiempo de exposición.

A medida que va aumentando el tiempo de exposición, también aumenta el desplazamiento máximo (δ_u).

12.2.3. EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA DE FRACTURA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

Como ya se ha comentado anteriormente, la energía de fractura del hormigón se define como la cantidad de energía necesaria para la creación de una grieta de superficie unidad en el hormigón. Experimentalmente se calcula como el trabajo necesario que hay que realizar para romper la zona de ligamento de la probeta ensayada. El trabajo viene dado por el área encerrada por la curva $P - \delta$. Por lo tanto, modificaciones en los parámetros de la curva pueden que no generen modificaciones en la energía de fractura, ya que si disminuye la carga de pico pero aumenta el desplazamiento último, para una misma área no variará el valor de la energía disipada en la fractura.

Muchos son los investigadores que han tratado este tema [24-25]. Tal y como se recoge en los estudios realizados por Bicanic et al, con el aumento de la temperatura la carga de pico disminuye, curva menos esbelta, y el desplazamiento máximo va aumentando, curvas más extendidas, es decir, la probeta toma un compartamiento más dúctil. Esto hace que aumente la energía de fractura.

Observando las gráficas 11.51 11.52 Y 11.53 se puede afirmar que la energía de fractura, G_F , aumenta hasta los 500°C. Se considera que se produce debido a que a medida que aumenta la temperatura, el daño producido en el hormigón es mayor, dejando escapar la humedad más fácilmente. El agua que se evapora es el agua capilar. Por lo tanto, el resultado de someter el hormigón a temperatura es un hormigón más dúctil, que proporciona una mayor energía de fractura a medida que la temperatura del ensayo aumenta. El spalling producido a alta temperatura es considerable, permitiendo realizar un daño adecuado para que salga la humedad, pero aun no suficiente para que G_F disminuya.

A partir de los 500°C, la energía de fractura sufre una caída. Esta disminución se debe a que a estas temperaturas el agua capilar ya se ha evaporado produciéndose la descomposición del CaCO_3 pococristalino y empieza a evaporarse primero el agua gel y más tarde el agua combinada, que causan la deshidratación del Ca(OH)_2 , degradación del hormigón como se recoge en el TG (Figura 11.70 Y Tabla 11.8), así como el aumento de las microgrietas. Este efecto se suma al del daño causado por el spalling.

En el presente proyecto, además, se estudia la relación entre las distintas dosificaciones. Para temperaturas menores de 100 °C el hormigón que ha sido sometido a un tiempo de exposición corto, 6 h, presenta peor comportamiento que los hormigones expuestos durante 24 y 48 h ya que presenta una menor energía de fractura, siendo esta mayor cuanto mayor es el tiempo de exposición.

A partir de 300 °C esta relación no se cumple, presentando las probetas expuestas durante 6 h mayor energía de fractura que el resto. Esto es debido a que a altas temperaturas, un tiempo de exposición de 6 h no llega a producir el suficiente daño como e periodos más largos de calentamiento.

Se realiza una comparación entre las distintas dosificaciones para obtener la influencia de la adición de fibras (figura 12.5-12.7).

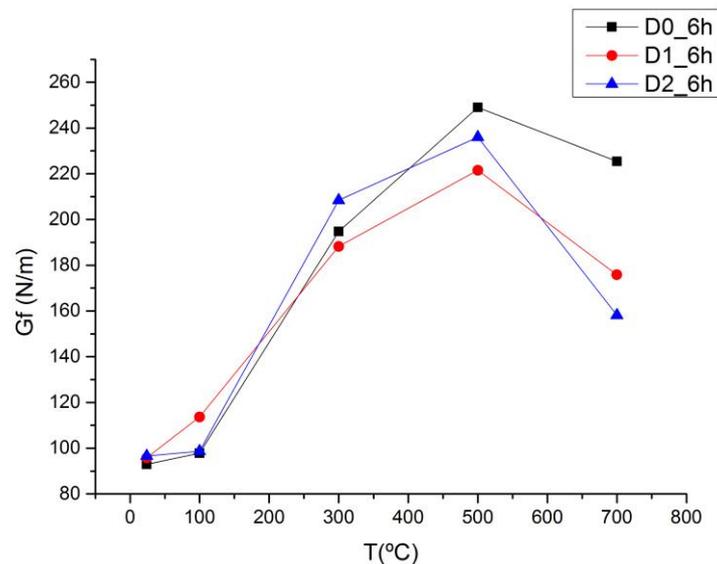


Figura 12.5. Influencia de la adición de fibra en la energía de fractura.

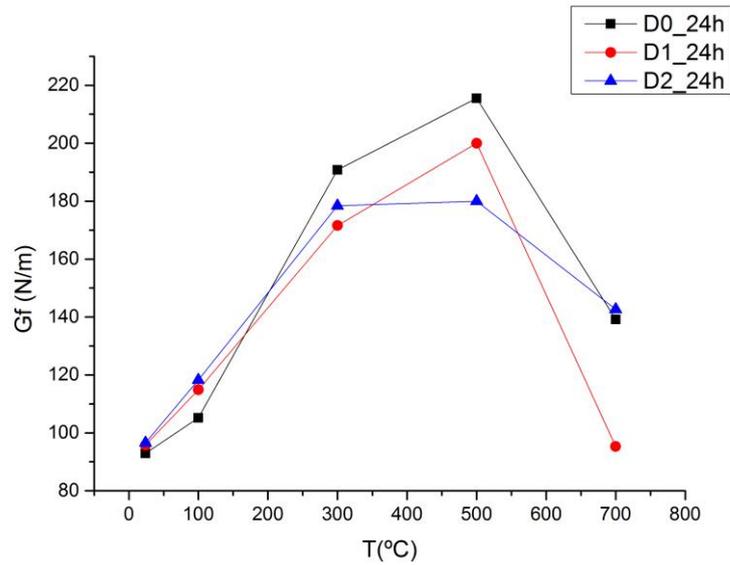


Figura 12.6. Influencia de la adición de fibra en la energía de fractura.

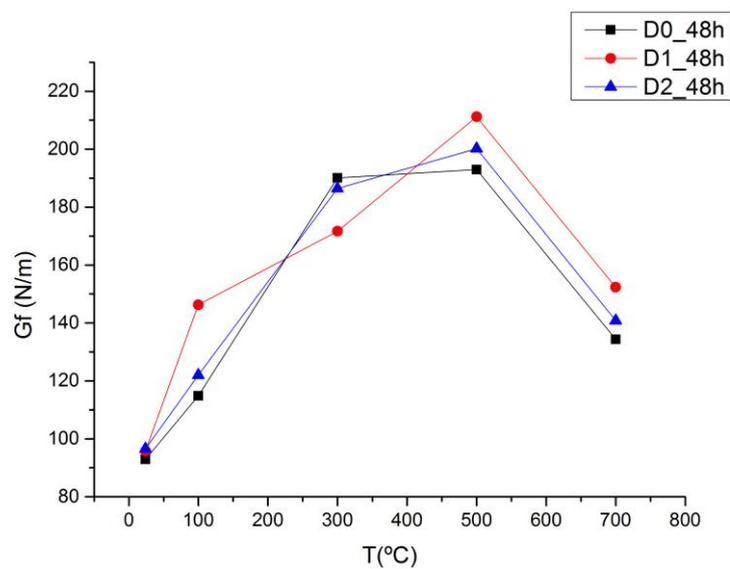


Figura 12.7. Influencia de la adición de fibra en la energía de fractura.

Hasta los 100°C puede observarse que la energía de fractura es mayor para hormigones reforzados con fibras D1 y D2 que para hormigones sin fibras D2. Hecho que recoge Cifuentes H. et al (2012)

en sus investigaciones [25]. Este comportamiento se justifica con el hecho de que las fibras presentan el efecto cosido comentado en el Bloque I, aumentando la energía absorbida por la probeta antes de romperse. Puede ser debido a que a partir de 160 °C las fibras de polipropileno se descomponen dejando cavidades sin resistencia alguna en la matriz del hormigón.

12.2.4. EVOLUCIÓN DE LA CARGA DE PICO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

En este apartado se analiza la evolución de la carga de pico en función de la temperatura. Se observa que las curvas primero decrecen hasta los 100°C, de 100°C a 300°C se mantienen con los mismos valores, incluso se observan un incremento de la carga de pico en algunos casos concretos, y por último, un decrecimiento generalizado a partir de 300°C (ver figuras 11.54-11.56). Esta evolución coincide con las expuestas por Cifuentes et al [24].

Como ocurría con la energía de fractura, a partir de 300°C se observa como las dosificaciones que se exponen a alta temperatura un tiempo mayor presentan una carga de pico menor que la del hormigón expuesto a 6 h de calentamiento.

Se realiza una comparación de las distintas dosificaciones para los distintos tiempos de exposición para obtener la influencia de la adición de fibras (Figuras 12.8-12.10).

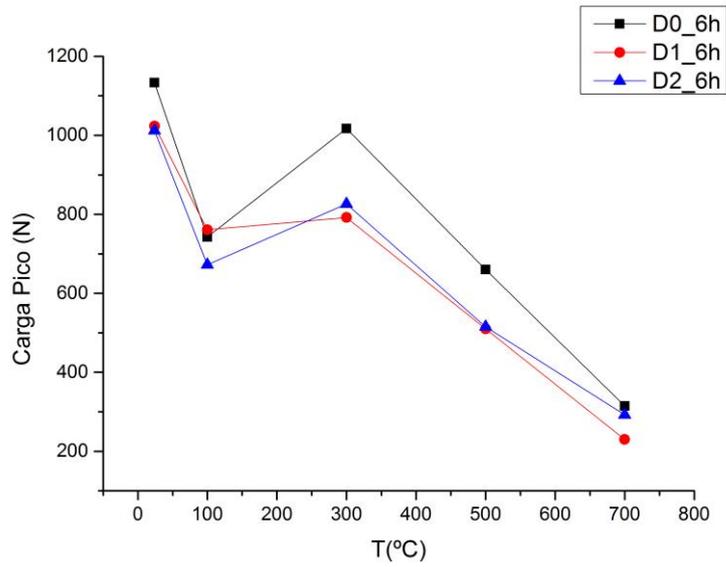


Figura 12.8. Influencia de la adición de fibra en la carga de pico para un tiempo de exposición de 6h.

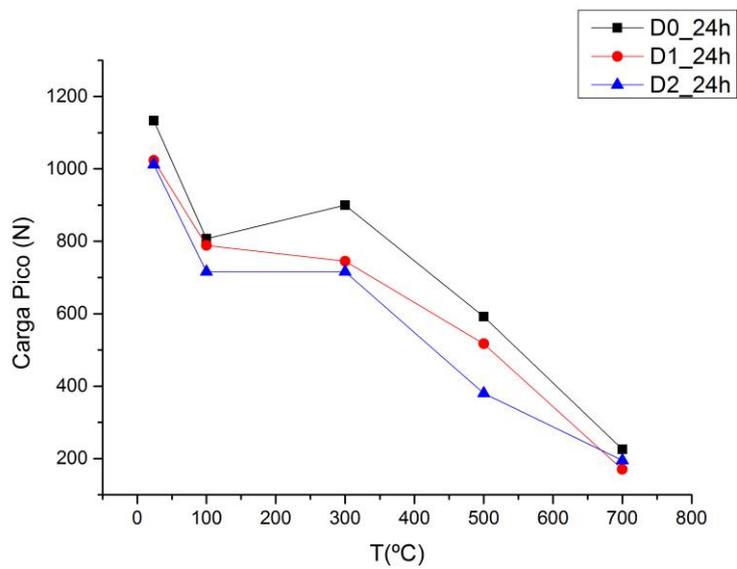


Figura 12.9. Influencia de la adición de fibra en la carga de pico para un tiempo de exposición de 24h.

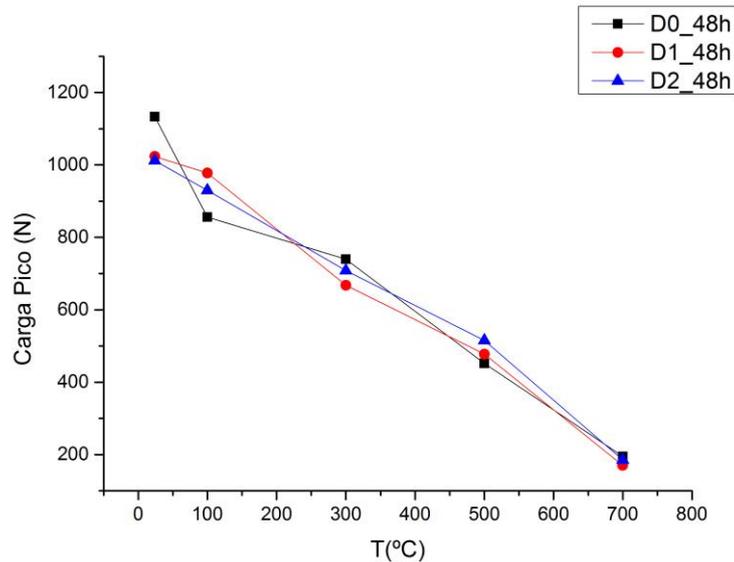


Figura 12.10. Influencia de la adición de fibra en la carga de pico para un tiempo de exposición de 48h.

Se observan mayores valores de carga de pico en las dosificaciones sin refuerzo de fibras, D0, que en las dosificaciones en las que se ha añadido fibras para todo el rango de tiempos de exposición. Un elevado porcentaje de adición de fibras, puede repercutir negativamente sobre el valor de la carga de pico.

12.3. ENSAYO A COMPRESIÓN UNIAXIAL.

El comportamiento general del hormigón es la presentación de un mayor valor de resistencia a compresión a medida que aumenta la temperatura, hasta 300°C, a partir de la cual comienza a disminuir hasta alcanzar una Resistencia casi nula a 700°C.

Por una parte, someter a las probetas a temperatura es positivo por el hecho de pérdida de humedad que pueda encontrarse en la matriz del hormigón además de mecanismo descrito por Nielsan y Bicanic, por el cual se produce un aumento de resistencia extra debido al engranamiento de las partículas. Por otra parte, llega un punto en el que la deshidratación del hormigón es tal que produce consecuencias negativas en los parámetros de Resistencia.

En las curvas obtenidas se observa un aumento de Resistencia a fractura con la temperatura excesivo, no haiendo encontrado referencias en las que se encuentre ante una situación similar. Existe una gran dispersion en los valores obtenidos. Este hecho se debe a que no se han refrentado las probetas tras el corte por falta de medios. Por lo tanto se concluye que sería necesaria la repetición de dichos ensayos en un future para obtener unos valores más certeros de los ensayos a compression uniaxial.

12.4. ENSAYO A COMPRESIÓN UNIAXIAL CON TRANSDUCTORES CILÍNDRICOS.

A medida que aumenta la temperatura, la pendiente de las curvas de evolución del módulo elástico va disminuyendo. Este hecho acarrea que para conseguir un mismo desplazamiento en el punto medio de la probeta, hay que ir aplicando una carga cada vez menor, debido a que al ir aumentando la temperatura en el hormigón, éste se va debilitando por el fenómeno de spalling. Como ya se ha comentado la pendiente de la curva $P-\delta$, está directamente relacionada con el módulo elástico, es decir, un descenso de la pendiente acarrea un descenso del módulo elástico y por lo tanto una pérdida de de rigidez originada por el aumento de temperatura. Al aumentar la temperatura, la pendiente decrece y la probeta toma un compartamiento más dúctil, tal y como recogen los estudios de Cifuentes et al [24].

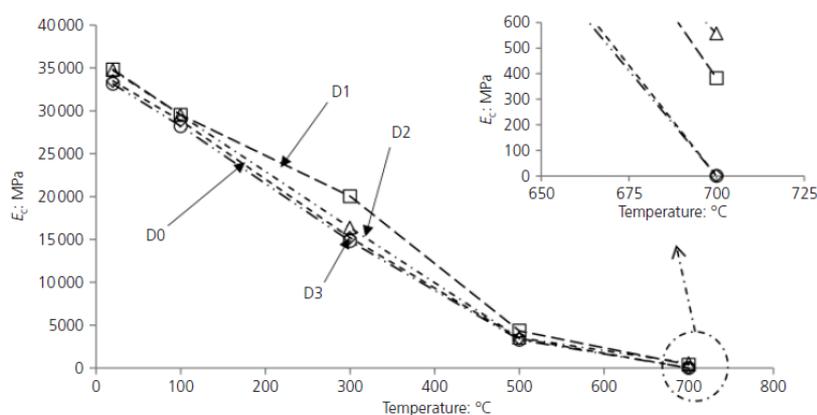


Figura 12.11. Evolución del módulo elástico recogido por ensayos experimentales por Cifuentes H. et al (2012) para distintas dosificaciones.

12.5. ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA.

El ensayo de Resistencia a tracción indirecta (Ensayo Brasileño) solo se realiza para probetas a Temperatura Ambiente. Existe una relación entre la carga máxima soportada por las probetas en el ensayo de flexión y el resultado obtenido en el ensayo brasileño. Por lo tanto, los valores de f_{ct} a altas temperaturas se calculan a partir de la carga de pico por un coeficiente β obtenido a partir de los resultados a T_a .

Las curvas obtenidas poseen la misma tendencia que las curvas de evolución de la carga de pico con la temperatura. Observándose menores valores de resistencia a tracción a partir de 300°C para dosificaciones que se exponen a alta temperatura un tiempo mayor, 24 h y 48 h, que a 6 h. Se considera que es a causa del tiempo necesario para hacer el suficiente daño en la pasta de cemento.

12.6. LONGITUD CARACTERÍSTICA.

La medida de longitud característica para probetas del mismo tamaño es un parámetro importante en el estudio del comportamiento en fractura del material ya que indica la ductilidad del propio hormigón, directamente relacionada con la ZPF (Zona de Proceso de Fractura).

Materiales con curvas $P-\delta$ más altas y afiladas presentarán menores valores de la longitud característica, comportamiento más frágil, y por lo tanto menor valor de ZPF [1].

En las curvas obtenidas se observa como la influencia de fibra se hace evidente en la longitud característica. Las curvas de D1 y D2, dosificaciones reforzadas con fibras, son muy similares. Sin embargo, las curvas de D0, dosificación sin fibra, la longitud característica de probetas expuestas durante 48 h a alta temperatura es mayor que las que han sido expuestas un tiempo menor. Esto es debido a que en este caso se produce una notable disminución de la resistencia a tracción del hormigón no reforzado con fibras con la temperatura.

BLOQUE V.
CONCLUSIONES Y
DESARROLLOS FUTUROS

13. CONCLUSIONES.

En el presente proyecto se han analizado las propiedades en caliente de un hormigón autocompactante de alta resistencia reforzado con fibras de polipropileno calentado a distintas temperaturas mediante distintos tiempos de exposición.

De dicho estudio cabe destacar las siguientes conclusiones:

- A pesar de cuidar aspectos como la fabricación de las probetas o la realización de los ensayos, la alta heterogeneidad del hormigón hace muy difícil obtener resultados idénticos para hormigones iguales y con el mismo historial. La aleatoriedad de los resultados debe ser contrapuesta con un alto número de muestras que permitan realizar una media adecuada.
- El aumento de la temperatura en el hormigón provoca una caída en la pendiente del

tramo prepico de la curva P- δ . Esta pendiente está íntimamente relacionada con el módulo de deformación longitudinal, es decir, cuando se aumenta la temperatura, E_c también disminuye. Un mismo hormigón a mayor temperatura presenta menor rigidez.

- A medida que la temperatura aumenta, las curvas se van haciendo menos esbeltas, los valores de la pendiente inicial y la carga de pico van disminuyendo, mientras que los desplazamientos van aumentando. A mayor temperatura las curvas P- δ se hacen más bajas y prolongadas.
- Este efecto también se observa con el aumento del tiempo de exposición. A mayor tiempo de exposición, se produce una mayor ductilidad del material.
- La adición de fibras a la mezcla hace que el descenso de la pendiente de la curva P- δ al aumentar la temperatura sea menos brusco. Las fibras ayudan a mejorar el comportamiento del hormigón frente al fenómeno de spalling al derretirse y crear conductos de evacuación para los gases obstruidos que generan dicho fenómeno.
- Un exceso en la adición de fibras a la muestra puede acarrear una disminución de los valores de la carga de pico. Las fibras al derretirse no dejan de ser huecos o poros carecientes de resistencia alguna, por lo que es lógico que un porcentaje de adición inadecuado traiga consecuencias negativas reflejadas en los valores de la carga de pico. Este hecho se ve reflejado a la temperatura de 300°C. A 100°C las fibras todavía no se han derretido por lo que no se ve reflejado, y a 500°C, el mayor efecto del spalling sobre la dosificación sin fibras es mayor que el efecto producido por el exceso de adición de fibras a la mezcla, por lo que la carga de pico de D0 es menor que la de D1 y D2.
- La adición de fibras a la mezcla genera un aumento de la energía de fractura en el hormigón. Esto se debe al efecto cosido que las fibras ejercen sobre las fisuras y a la generación de los conductos de escape de gases que las fibras crean al derretirse, disminuyendo el efecto de spalling.
- A mayor longitud de la fibra, mayor energía de fractura. Este efecto se observa de manera

más clara a partir de los 100°C de temperatura. Las fibras de mayor longitud crean conductos de escape de gases mayores, por lo que reducen en mayor medida el spalling y por tanto, aumentan la energía de fractura.

- No se aprecia efecto del tiempo de exposición a partir de las 24 horas de calentamiento sobre la energía de fractura.
- A mayor temperatura, el módulo de deformación longitudinal (E_c) disminuye. Al aumentar la temperatura, también aumenta la microfisuración debida a ella, por lo que la rigidez del material disminuye. El aumento de la longitud de la fibra, produce un efecto beneficioso, ya dicho aumento, provoca una mejor unión de las microfisuras.
- La longitud característica está íntimamente relacionada con el comportamiento frágil o dúctil del hormigón, es decir, cuanto mayor sea el valor de la longitud característica, más dúctil es el hormigón. Por esta razón, las dosificaciones con fibras (D1 y D2), presentan una longitud característica mayor que la dosificación sin fibras (D0).
- El tiempo de exposición se refleja sólo en las probetas que no se encuentran reforzadas con fibras de polipropileno. Siendo mayor la longitud característica para D2, dosificación con fibras largas.

14. DESARROLLOS FUTUROS

A continuación se proponen una serie de futuros desarrollos que pueden partir del estudio realizado en el presente proyecto y de los resultados aquí obtenidos.

Como ya se ha comentado en el análisis de resultados, sería interesante la repetición de ensayos a compresión con hormigón de la misma dosificación aquí estudiada, refrentando las probetas en el caso en el que éstas hayan sido cortadas, para obtener resultados certeros.

Es necesario la ampliación de esta investigación introduciendo en el estudio distintos tipos de fibras, como por ejemplo, fibras metálicas, para poder evaluar la influencia de fibras de distintos materiales a alta temperatura. Así como ampliar el rango de tiempo de exposición.

Cobra especial importancia evaluar los resultados en conjunto para diferentes dosificaciones,

modificando, por ejemplo, el tipo de superplastificante.

Por último, para evitar la dispersión de resultados de cada parámetro para probetas de la misma dosificación y mismo historial, ampliar la campaña experimental realizada con un número de probetas más extensor, al menos cuatro probetas del mismo tipo para cada ensayo.

REFERENCIAS

- [1] **Cifuentes H., and Medina F.** Mecánica de la fractura aplicada al hormigón. *Secretariado de publicaciones de la Universidad de Sevilla*, En imprenta.

- [2] **Okamura H., and Ouchi M.** Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. Vol. 1, No. 1, 5-15, April 2003.

- [3] **Vargas R., and Sciaraffia R.** Diseño y evaluación de hormigones autocompactantes (HAC). *Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, Universidad de Chile, CHILE*. 10/ 04/2006, PAG. 57 – 100.

- [4] **Burón M., Fernández J., and Garrido L.** Hormigón autocompactante. Criterios para su utilización. *Hormigón*. Abril 2006 / N° 887 ISSN: 0008-8919. PP.: 52-64.

- [5] Recomendaciones para la utilización de hormigones autocompactantes. *Ministerio de Fomento, España*.

- [6] **Sivakumar A., and Santhanam M.** Mechanical properties of high strength concrete reinforced

with metallic and non-metallic fibres. *Cement and concrete*. 29 (2007) 603–608.

- [7] **Oliveros Santiago M., Galán Marín C., and Roa Fernández J.** Los composites: características y aplicaciones en la edificación. *Dpto. Construcciones Arquitectónicas 1. Escuela T. Superior de Arquitectura de la Universidad de Sevilla*. 605-I, 24 N-03.
- [8] **Espinar González M.** Hormigones de baja resistencia reforzados con fibras de polipropileno: Análisis experimental de la influencia de la geometría de la fibra sobre las propiedades de fractura. *Proyecto fin de carrera*. Profesor tutor: Cifuentes H. 2007-2008.
- [9] **Alhozaimy A. M., Soroushiad P., and Mirza F.** Mechanical Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete and the Effects of Pozzolanic Materials. *Cement and concrete*. 18 (1996) 85-92.
- [10] **ACI Cimmitte 446.** Fracture Mechanics of Concrete: *Concepts, Models and Determination of Materials Properties*. American Concrete Institute, 1192.
- [11] **RILEM DRAFT RECOMMENDATIONS.** Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete. *Materials and Structures/ M ateriaux et Constructions*. 23, 461-465.
- [12] **Beygi M., Taghi Kazemi M., Vaseghi J., Nikbin I.M., Rabbanifar S. and Rahmani E.** Evaluation of the effect of maximum aggregate size on fracture behavior of self compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 55 (2014) 202–211.

-
- [13] **Gettu R. and Saldivar H.**, Implications of the size effect method for analyzing the fracture of concrete. *Int. J. Solids Structures* Vol 35 Nos 31-32, pp. 4121-4132, 1998.
- [14] **Khoury G.A.** Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2000; 2:429-447.
- [15] **Castillo E.** Análisis del artículo "Effect of fire on concrete structures".
- [16] **Martínez A.J.** Estudio teórico-experimental de la resistencia al fuego del hormigón armado. *Proyecto fin de carrera*. Profesor tutor: Medina F. 2003.
- [17] **Kodur V.** Properties of Concrete at Elevated Temperatures. *Hindawi Publishing Corporation, ISRN Civil Engineering*. Volume 2014, Article ID 468510.
- [18] **Beyg M., Taghi Kazemi M., Vaseghi Amiri J., Nikbin I., Rabbanifar S., and Rahmani E.** Evaluation of the effect of maximum aggregate size on fracture behavior of self compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 55 (2014) 202-211.
- [19] **Martínez A.J.** Estudio teórico-experimental de la resistencia al fuego del hormigón armado. *Proyecto fin de carrera*. Profesor tutor: Medina F. 2003.
- [20] **Allauca L., Amen H., and Lung J.** Uso de sílice en hormigones de alto desempeño. *Artículos*

de Tesis de Grado-FICT. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/7684>

- [21] **Deeb R., Ghanbari A., and Karihaloo B.L.** Development of self-compacting high and ultra high performance concretes with and without steel fibres. *Cement & Concrete Composites*. 34 (2012) 185–190.
- [22] **Ghanbari A., and Karihaloo B.L.** Mix proportioning of selfcompacting high- and ultrahigh-performance concretes with and without steel fibres. *Magazine of Concrete Research*. 2012, 64(12), 1089–1100.
- [23] **Deeb R., and Karihaloo B.L.** Mix proportioning of self-compacting normal and high-strength concretes. *Magazine of Concrete Research*. 2013, 65(9), 546–556.
- [24] **Cifuentes H., Medina F., Leiva C. and Fernández-Pereira C.** Effects of fibres and rice husk ash on properties of heated HSC. *Magazine of Concrete Research*, 2012, 64(5), 457–470
- [25] **Zhang B. and Bicanic N.** Fracture energy of high-performance concrete at high temperatures up to 450°C: the effects of heating temperatures and testing conditions (hot and cold). *Magazine of Concrete Research*, 2006, 58, No. 5, June, 277–288

