

Trabajo de Fin de Grado  
Ingeniería Civil

**ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES  
RESIDUALES DE UN HORMIGÓN  
AUTOCOMPACTANTE DE ALTA RESISTENCIA  
REFORZADO CON FIBRAS DE  
POLIPROPILENO SOMETIDO A ALTAS  
TEMPERATURAS**

Autor: Eduardo Sánchez García-Miña

Tutor: Héctor Cifuentes Bulte

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

Sevilla, 2015





Proyecto Fin de Grado  
Ingeniería Civil

**ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES  
RESIDUALES DE UN H.A.R.  
AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON  
FIBRAS DE POLIPROPILENO SOMETIDO A  
ALTAS TEMPERATURAS**

Autor:

Eduardo Sánchez García-Miña

Tutor:

Héctor Cifuentes Bulte

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

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



Proyecto Fin de Grado: ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES RESIDUALES DE UN H.A.R.  
AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO SOMETIDO A ALTAS  
TEMPERATURAS

Autor: Eduardo Sánchez García-Miña

Tutor: Héctor Cifuentes Bulte

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 mi abuelo Eduardo Sánchez  
Rodríguez*











# Índice

<b>Índice</b>	<b>xii</b>
Índice de Tablas	<b>xv</b>
Índice de Figuras	<b>xvi</b>
<b>1 Introducción y Objetivos</b>	<b>1</b>
1.1 <i>INTRODUCCIÓN</i>	1
1.2 <i>OBJETIVOS</i>	1
1.3 <i>MORFOLOGÍA DEL CONTENIDO</i>	1
<b>2 Estado del Arte</b>	<b>3</b>
2.1 <i>HORMIGÓN CONVENCIONAL.</i>	3
2.1.1 <i>HISTORIA DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL.</i>	3
2.1.2 <i>RESUMEN TEÓRICO DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL</i>	4
2.2 <i>HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES</i>	5
2.2.1 <i>HISTORIA DEL HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES</i>	5
2.2.2 <i>RESUMEN TEÓRICO DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA</i>	6
2.3 <i>HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS</i>	8
2.3.1 <i>HISTORIA DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS</i>	8
2.3.2 <i>RESUMEN TEÓRICO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS</i>	9
2.4 <i>HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE</i>	11
2.4.1 <i>HISTORIA DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE</i>	11
2.4.2 <i>RESUMEN TEÓRICO DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE</i>	12
2.5 <i>COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN EN FRACTURA</i>	13
2.5.1 <i>INTRODUCCIÓN</i>	13
2.5.2 <i>ARGUMENTOS QUE JUSTIFICAN EL USO DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA PARA EL CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN (7)</i>	13
2.5.3 <i>MECÁNICA DE LA FRACTURA ELÁSTICO LINEAL</i>	14
2.5.4 <i>ENERGÍA DE FRACTURA (<math>G_F</math>)</i>	16
2.5.5 <i>ZONA DE PROCESO DE FRACTURA</i>	17
2.5.6 <i>EFFECTO TAMAÑO EN EL HORMIGÓN</i>	18
2.5.7 <i>DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ENERGÍA DE FRACTURA (<math>G_F</math>)</i>	19
2.6 <i>COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN A ALTAS TEMPERATURAS</i>	21
2.6.1 <i>INTRODUCCIÓN</i>	21
2.6.2 <i>COMPORTAMIENTO DEL H.A.R. FRENTE A ALTAS TEMPERATURAS</i>	22
2.6.3 <i>VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL H.A.R CON LA TEMPERATURA</i>	24
2.6.4 <i>MEJORA DE LA RESPUESTA AL FUEGO CON LA ADICIÓN DE FIBRAS DE POLIPROPILENO</i>	29
<b>3 Fabricación de las Probetas</b>	<b>31</b>
3.1 <i>INTRODUCCIÓN</i>	31
3.2 <i>MATERIALES</i>	31
3.3 <i>DOSIFICACIÓN</i>	38
3.4 <i>PREPARACIÓN DE LOS MOLDES</i>	38
3.5 <i>METODOLOGÍA DEL HORMIGONADO</i>	42

3.6	<i>CORTE DE LAS PROBETAS Y REALIZACIÓN DE LA ENTALLA</i>	46
<b>4</b>	<b>Ensayos</b>	<b>49</b>
4.1	<i>INTRODUCCIÓN</i>	49
4.2	<i>ENSAYO DE FLEXIÓN EN TRES PUNTOS</i>	49
4.3	<i>ENSAYO EN COMPRESIÓN UNIAXIAL</i>	55
4.4	<i>ENSAYO EN COMPRESIÓN UNIAXIAL CON TRANSDUCTORES CILÍNDRICOS</i>	57
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>60</b>
5.1	<i>INTRODUCCIÓN</i>	60
5.2	<i>ENSAYO A FLEXIÓN EN TRES PUNTOS</i>	61
5.2.1	<i>CURVAS CARGA – DESPLAZAMIENTO</i>	61
5.2.2	<i>CURVAS P –<math>\delta</math> DESPLAZAMIENTO D0, D1 Y D2 PARA TODO RANGO DE TEMPERATURA</i>	62
5.2.3	<i>INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE FIBRAS EN EL HORMIGÓN</i>	64
5.2.4	<i>EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA DE FRACTURA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA</i>	65
5.2.5	<i>EVOLUCIÓN DE LA CARGA DE PICO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA</i>	66
5.3	<i>ENSAYO A COMPRESIÓN UNIAXIAL</i>	67
5.4	<i>ENSAYO A COMPRESIÓN UNIAXIAL CON TRANSDUCTORES CILÍNDRICOS</i>	68
5.4.1	<i>MÓDULO ELÁSTICO ESTABILIZADO</i>	68
5.4.2	<i>MÓDULO ELÁSTICO. MODELO DE JENQ-SHAH</i>	69
5.5	<i>ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA</i>	70
<b>6</b>	<b>Análisis de Resultados</b>	<b>72</b>
6.1	<i>INTRODUCCIÓN</i>	72
6.2	<i>ENSAYO A FLEXIÓN EN TRES PUNTOS</i>	72
6.2.1	<i>CURVAS CARGA-DESPLAZAMIENTO</i>	72
6.2.2	<i>CURVAS P –<math>\delta</math> DESPLAZAMIENTO D0, D1 Y D2 PARA TODO RANGO DE TEMPERATURA</i>	72
6.2.3	<i>INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE FIBRAS EN EL HORMIGÓN</i>	76
6.2.4	<i>EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA DE FRACTURA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA</i>	79
6.2.5	<i>EVOLUCIÓN DE LA CARGA DE PICO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA</i>	80
6.3	<i>ENSAYO A COMPRESIÓN UNIAXIAL</i>	81
6.4	<i>ENSAYO A COMPRESIÓN UNIAXIAL CON TRANSDUCTORES CILÍNDRICOS</i>	81
6.5	<i>ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA</i>	82
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>83</b>
	<b>Referencias</b>	<b>85</b>



# Índice de Tablas

---

Tabla 2: Granulometría Arena Silícea	33
Tabla 3: Granulometría Arena Caliza	34
Tabla 4: Propiedades del Humo de Sílice	36
Tabla 5: Propiedades Fibras de Polipropileno	37
Tabla 6: Dosificación Final del Hormigón	38
Tabla 7: Energía de Fractura	65
Tabla 8: Carga de Pico frente a T <sup>a</sup>	66
Tabla 9: Resistencia a Compresión ( $f_c$ )	68
Tabla 10: Módulo elástico estabilizado (T <sup>a</sup> Ambiente)	68
Tabla 14: Módulo Elástico (T=500°C)	69
Tabla 11: Módulo Elástico (T=100°C)	69
Tabla 12: Módulo Elástico (T <sup>a</sup> Ambiente) y Factor de Correlación.	69
Tabla 13: Módulo Elástico (T=300°C)	69
Tabla 15: Carga de Pico. Resistencia a Tracción ( $f_{ct}$ ). Longitud Característica ( $l_{ch}$ ).	70
Tabla 16: Incremento Pendiente tramo prepico para D0	73
Tabla 17: Carga de Pico (D0)	73
Tabla 18: Desplazamiento último en función de la temperatura (D0)	73
Tabla 19: Incremento Pendiente tramo prepico para D1	74
Tabla 20: Carga de Pico (D1)	74
Tabla 21: Desplazamiento último en función de la temperatura (D1)	74
Tabla 22: Incremento Pendiente tramo prepico para D2	75
Tabla 23: Carga de Pico (D2)	75
Tabla 24: Desplazamiento último en función de la temperatura (D2)	75
Tabla 25: Energía de fractura (Gf) en función de la Temperatura para D0, D1 Y D2	79

# Índice de Figuras

---

Ilustración 2.1: Curvas Carga – Desplazamiento para material dúctil, frágil y cuasi-frágil.	4
Ilustración 2.2: Rotura explosiva de un hormigón de alta resistencia (H.A.R.)	6
Ilustración 2.3: Diagramas tensión-deformación de hormigón, pasta de cemento y áridos en HC (Izq) y HAR (Der)	7
Ilustración 2.4: Formas de orientación de las fibras en el hormigón	10
Ilustración 2.5: Placa delgada ( $L \gg t$ ) con hueco elíptico bajo una tensión uniforme $s$ . Cuando $b \rightarrow 0$ el hueco se convierte en una grieta (Problema de Griffith)	14
Ilustración 2.6: Tres modos posibles de deformación en la punta de la grieta	15
Ilustración 2.7: Distinción de las características de fractura en (a) un material elástico lineal, (b)	17
Ilustración 2.8: Ley de Efecto Tamaño de Bazant (curva continua). En línea discontinua aparece lo que predice el Criterio de Resistencia (Strength failure criterion) y la MFEL (LEFM)	18
Ilustración 2.9: Esquema de la corrección de la zona inicial no lineal de la curva $P-\delta$	19
Ilustración 2.10: Energía de la cola que no se puede medir en un ensayo de flexión en tres puntos	20
Ilustración 2.11: Curva tensión-deformación de un H.A.R. a diversas temperaturas	22
Ilustración 2.12: Efecto de la temperatura en la resistencia a compresión del hormigón	23
Ilustración 2.13: de la temperatura en el módulo de elasticidad del hormigón	23
Ilustración 2.14: Temperaturas en el horno (furnace) y en el hormigón [centro (middle) y lateral(side)] a lo largo del proceso de calentamiento	24
Ilustración 2.15: Pérdida de peso a través del proceso completo de calentamiento-exposición-enfriamiento	25
Ilustración 2.16: Pérdida de peso última para diferentes temperaturas de calentamiento	26
Ilustración 2.17: Curvas carga- desplazamiento completas para varias temperaturas de calentamiento: (a) para las probetas de hormigón caliente, (b) para las probetas de hormigón frío	27
Ilustración 2.18: Energía de fractura para diferentes temperaturas de calentamiento	28
Ilustración 2.19: Energía de fractura frente a pérdida de peso última	29
Ilustración 3.1: Cemento Portland CEM II/B-L 32.5 N	31
Ilustración 3.2: Tamizadora de Grava (tamices de 2 y 10 mm)	32
Ilustración 3.3: % PASA – Arena Sílicea	33
Ilustración 3.4: % PASA – Arena Caliza	34
Ilustración 3.5: a) Grava. b) Arena Caliza. c) Arena Sílicea	35
Ilustración 3.6: Etiqueta y Características del Superplastificante Sike Viscocrete 20 HE	35
Ilustración 3.7: Humo de Sílice	36
Ilustración 3.8: Comparación tamaño de fibras (6 y 12 mm)	37
Ilustración 3.9: Dimensión de las Probetas. a) 218x48x48 mm. b) 48x48x48 mm	38
Ilustración 3.10: Planificación del número de probetas para los ensayos a realizar	39
Ilustración 3.11: Molde cubierto de desencofrante	39



Ilustración 3.12: Hormigonado	40
Ilustración 3.13: Relleno de Moldes Nivelados	40
Ilustración 3.14: Desencofrado de las Probetas de Hormigón	41
Ilustración 3.15: Fraguado del Hormigón	41
Ilustración 3.16: Limpieza de Moldes	42
Ilustración 3.17: Tamizado de la Grava	43
Ilustración 3.18: Pesado de los Elementos	43
Ilustración 3.19: Mezclado de los Materiales. 1º Fase (Izq). 2ª Fase (Der)	44
Ilustración 3.20: Relleno de Moldes	44
Ilustración 3.21: Desencofrado	45
Ilustración 3.22: Curado del Hormigón	45
Ilustración 3.23 Corte de Probeta Original en Ocho Probetas 218x48x48 mm	46
Ilustración 3.24: Máquina de corte. Modelo Bali Mekano. Empresa Simasa	46
Ilustración 3.25 Probeta Prismática Entallada de dimensiones 218x48x48 mm	47
Ilustración 3.26: Corte Probeta 218x48x48mm en Cuatro Probetas de 48x48x48 mm	47
Ilustración 4.1: Máquina servo hidráulica modelo ME 406/15 marca Servosis	49
Ilustración 4.2: Ensayo de flexión en tres puntos.	50
Ilustración 4.3: Generador de funciones (PCD 2k)	51
Ilustración 4.4: Controles, Media de Canal 1 y 2, Trazador y Generador de Funciones (PCD 2k)	51
Ilustración 4.5: Condiciones de Contorno Ensayo Flexión en tres puntos	52
Ilustración 4.6: Panel de control Servosis para máquina de F3P y de compresión uniaxial	53
Ilustración 4.7: Canales, salidas/entradas, auxiliares y parada de emergencia	53
Ilustración 4.8: Ventada de Alarmas (PCD 2k)	54
Ilustración 4.9: Toma de medida del área de ligadura	54
Ilustración 4.10: Prensa hidráulica Servosis modelo MES 300	55
Ilustración 4.11: Elemento de ayuda para acople de la probeta	56
Ilustración 4.12: Pestaña de parámetros a introducir (PCD 2k)	56
Ilustración 4.13: Pestaña de resultados (PCD 2k)	57
Ilustración 4.14: Trazador y generador de funciones (PCD 2k)	58
Ilustración 5.1: Hormigón sin fibras (D0)	61
Ilustración 5.2: Hormigón con fibras de 6 mm (D1)	61
Ilustración 5.3: Hormigón con fibras de 24 mm (D2)	62
Ilustración 5.4: Curvas P- $\delta$ para hormigones sin fibras (D0)	62
Ilustración 5.5: Curvas P- $\delta$ para hormigones con fibras de 6 mm (D1)	63
Ilustración 5.6: Curvas P- $\delta$ para hormigones con fibras de 24 mm (D2)	63
Ilustración 5.7: Influencia fibras sobre Gf - probetas a T=100°C (Medida Residual)	64
Ilustración 5.8: Influencia fibras sobre Gf - probetas a T=300°C (Medida Residual)	64

Ilustración 5.9: Influencia fibras sobre Gf - probetas a T=500°C (Medida Residual)	65
5.10: Energía de fractura (Gf Valores Medios) en función de la Temperatura para D0, D1 Y D2	66
Ilustración 5.11: Carga de Pico en función de la temperatura (D0, D1 y D2)	67
Ilustración 5.12: Resistencia a compresión frente a T <sup>a</sup> para D0, D1 y D2	67
Ilustración 5.13: Módulo Elástico frente a Temperatura	70
Ilustración 5.14: Longitud Característica frente a Temperatura	71
Ilustración 6.1: Influencia fibras sobre Gf - probetas a T=100°C (Medida Residual Corregida)	76
Ilustración 6.2: Influencia fibras sobre Gf - probetas a T=300°C (Medida Residual Corregida)	77
Ilustración 6.3: Influencia fibras sobre Gf - probetas a T=500°C (Medida Residual Corregida)	78
Ilustración 6.4: Energía de fractura (Gf) en función de la Temperatura para D0, D1 Y D2	79





# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

---

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El hormigón es el material de construcción más extendido del mundo, debido principalmente a dos causas: el bajo coste de fabricación y su capacidad de elaboración en cualquier parte del mundo.

Sus inicios se remontan a los tiempos de los griegos y romanos, sin embargo, no es hasta el siglo XVIII cuando se produce su sobresaliente revolución. A partir de este punto, el ser humano se ha volcado en su estudio, realizando grandes avances en la mejora de sus propiedades (resistencia a compresión, resistencia frente a la corrosión, resistencia a la rotura, docilidad, etc).

Dichos avances han hecho posible el desarrollo del hormigón que se va a estudiar en este proyecto: hormigón autocompactante de alta resistencia reforzado con fibras de polipropileno. Mediante la realización de ensayos en el laboratorio (ensayo de flexión en tres puntos, ensayo brasileño y ensayo a compresión uniaxial), se han obtenido las propiedades de fractura residuales de las probetas (energía de fractura, resistencia a la tracción, módulo de deformación longitudinal y longitud característica) y con ellas, se ha cumplido el objetivo del proyecto, aplicar la mecánica de la fractura en el hormigón para obtener su comportamiento residual frente a la fractura y determinar la influencia de la adición de fibras sobre dicho comportamiento.

## 1.2 OBJETIVOS

Es importante para la comprensión del objeto de mi estudio saber que este proyecto se realizó con el fin de complementar un estudio que trata la influencia del tiempo de exposición del hormigón a altas temperaturas (hot concrete, (1)). La idea inicial era exponer dicho proyecto antes para poder comparar el hot concrete-cold concrete, idea que no se ha podido llevar a cabo.

Como la comparación hot/cold concrete no se ha podido realizar, el objeto del proyecto presente ha abarcado finalmente el análisis de las propiedades en frío (propiedades residuales) con temperaturas de 100, 300 y 500°C. Además se ha estudiado la influencia de la adición de fibras de polipropileno de diferentes longitudes (6 y 24 mm) a la mezcla.

## 1.3 MORFOLOGÍA DEL CONTENIDO

El presente proyecto queda dividido en siete grandes bloques:

1. Bloque I: Introducción y Objetivos.

Se hace una breve introducción del proyecto y se expone el objetivo del mismo.

2. Bloque II: Estado del Arte.

Se da una visión global de la evolución del hormigón además de los conocimientos teóricos necesarios para la comprensión del presente proyecto. También se hace un breve resumen conceptual y teórico del comportamiento del hormigón en fractura y frente a altas temperaturas.

### 3. Bloque III: Fabricación de Probetas.

En este bloque queda recogido detalladamente todo el proceso de elaboración de las probetas llevado a cabo en el laboratorio.

### 4. Bloque IV: Ensayos.

Se enuncian los tipos de ensayos y se exponen los conocimientos necesarios para su comprensión por parte del lector.

### 5. Bloque V: Resultados.

Se enuncian los resultados recogidos de los ensayos.

### 6. Bloque VI: Análisis de Resultados.

Se analizan los resultados enunciados en el bloque anterior.

### 7. Bloque VII: Conclusiones.

Se exponen las principales conclusiones y resultados de la investigación.

## 2 ESTADO DEL ARTE

---

### 2.1 HORMIGÓN CONVENCIONAL.

#### 2.1.1 HISTORIA DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL.

En el siglo XVIII comienza la Revolución Industrial, que trae consigo una revolución en el ámbito de la construcción debido al comienzo de fabricación en masa de algunos materiales de construcción. Uno de esos materiales fue el hormigón.

En 1812, Louis Vicat fabrica el primer cemento portland que luego patentaría Joseph Aspdin en 1824. Aunque su aplicación en el hormigón fue tímida inicialmente, antes de que finalizara el siglo XIX ya se habían realizado construcciones importantes de hormigón armado y con la llegada del siglo XX, el hormigón pasó a convertirse en el material de construcción más empleado en todo el mundo. El éxito del hormigón como material de construcción reside en la facilidad para fabricarlo en cantidades abundantes y en cualquier lugar del mundo, sin dejar de ser un material económico.

Otro hecho significativo en la evolución del hormigón fue la mejora del proceso de producción del cemento Portland llevada a cabo por Isaac Johnson en 1845. Tomando como referencia sus avances, se empezaron a abrir fábricas por toda Europa.

Sin embargo, hasta el año 1900 aproximadamente, no empezó el crecimiento notable de la industria del cemento, debido fundamentalmente a dos factores: en primer lugar, los experimentos realizados por los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y por el alemán Michaélis, con los que se logró producir cemento de calidad uniforme, que pudiera ser usado en la industria de la construcción. En segundo lugar, dos invenciones mecánicas muy importantes se hicieron al principio del siglo: los hornos rotatorios para la calcinación y el molino tubular para la molienda. Con estas dos máquinas, pudo producirse el cemento Portland en cantidades comerciales. A partir de ese momento, se desarrolla el rápido crecimiento de esta industria, que hoy produce un material de construcción imprescindible, dentro del actual sistema de vida.

La principal característica del hormigón es su alta resistencia frente a esfuerzos de compresión. Sin embargo, su comportamiento a tracción no es bueno por lo que se añaden armaduras. Así nace el hormigón armado, patentado por Joseph Monier en 1867. Históricamente el mérito del desarrollo del hormigón armado se atribuye al constructor William Wilkinson.

En 1903 en la ciudad de Hamburgo, Alemania, se transportó el primer metro cúbico de hormigón

durante 11 km. Este hecho lo logró el ingeniero Juergen Hinrich Magens,

Con el fin de la Primera Guerra Mundial, la escasez de acero en toda Europa propició el desarrollo del hormigón pretensado. Su inventor fue Eugene Freyssinet que registró su primera patente y desarrollo su teoría sobre el hormigón pretensado en 1928.

### 2.1.2 RESUMEN TEÓRICO DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL

Desde el punto de vista teórico, el hormigón es un material de origen pétreo obtenido a través de la mezcla de árido grueso (gravas), árido fino (arenas), agua, cemento y una serie de aditivos. El hormigón presenta una serie de defectos y fisuras internas desde sus primeras horas e incluso antes de estar sometido a cargas externas. Estos defectos o grietas van creciendo de manera estable como respuesta a la aplicación de una carga estable, uniéndose con otras grietas nuevas o ya existentes y dando lugar a una macrogrieta, que son las causantes del colapso de la estructura (2).

Si se observa la curva tensión-deformación del hormigón, se puede ver claramente que el comportamiento del hormigón no es ni frágil, ni dúctil, sino que presenta un comportamiento cuasi-frágil.

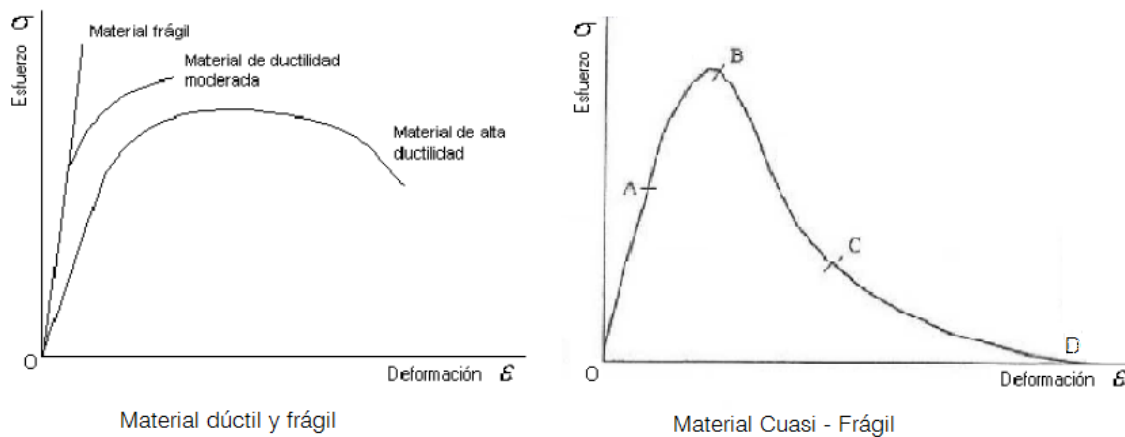


Ilustración 2.1: Curvas Carga – Desplazamiento para material dúctil, frágil y cuasi-frágil.

Fijándose en la curva tensión-deformación para materiales cuasi-frágiles, se observan cuatro tramos bien diferenciados:



- Tramo OA: Tramo elástico lineal.
- Tramo AB: Tramo de no linealidad que precede al pico de la curva. Aparecen microfisuras internas que culminan en la formación de una macrofisura en el máximo (B).
- Tramo BC: Tramo de no linealidad en el que se produce el ablandamiento del material.
- Tramo CD: Tramo de no linealidad. Esta cola final se origina por los efectos de fricción y la conexión entre los granos de agregado.

## **2.2 HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES**

### **2.2.1 HISTORIA DEL HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES**

Los hormigones llamados de alta resistencia llegan con las primeras reducciones de la habitual relación agua/cemento (0.45-0.5), llevadas a cabo en Japón en 1950. Dicha reducción trajo consigo una mejora en algunas propiedades del hormigón, principalmente en la plasticidad, compacidad y resistencia. Durante estos años, se desarrollaron también los aditivos oclusores de aire, que permitieron mejorar aspectos relativos a la resistencia del material frente a la acción del hielo y su docilidad.

Durante los años 70, se produce un avance en la tecnología utilizada para fabricar cementos y se produce la llegada de una nueva generación de aditivos químicos en Alemania y Japón, los agentes dispersantes de alto poder. Estos aditivos reciben el nombre de superfluidificantes o reductores de agua de alta eficiencia, y como su propio nombre indica, permiten reducir notablemente la relación agua/cemento y por consiguiente aumentar significativamente los valores de resistencia.

Al mismo tiempo, comienza la utilización del humo de sílice o microsílíce en la fabricación de los hormigones, estas partículas al ser tan pequeñas, actúan como un filler llenando los espacios vacíos en la pasta haciendo que el hormigón tenga mayores propiedades adherentes, creando mayor compacidad a la vez que brinda más fluidez a la mezcla. Además ayuda a reducir la exudación de agua en la superficie y proporciona reducciones significativas en la permeabilidad del hormigón, hecho que acarrea la mejora en la durabilidad del mismo.

En cuanto a la resistencia del hormigón, se han determinado aumentos significativos desde 20 a 50 % [Silica Fume Association - Concrete], obteniéndose mayores beneficios con el uso de superplastificantes. Cuando éstos se usan, el contenido de microsílíce varía entre el 5 y el 15 % del peso del cemento.

Otra de las propiedades que ofrece el uso del humo de sílice es el incremento de la resistencia al

ataque de los sulfatos y cloruros, lo que produce una mejora del comportamiento del hormigón en climas ricos en dichos elementos.

Estos desarrollos han incrementado la resistencia del hormigón desde 40 MPa a principios de los años 80, hasta 200 MPa en la actualidad.

### 2.2.2 RESUMEN TEÓRICO DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA

Los hormigones de alta resistencia además de presentar una alta resistencia a compresión, también presentan un aumento de la resistencia a la tracción, pero éste es menos proporcional. La energía específica de fractura también aumenta en este tipo de hormigones, sin embargo, las deformaciones a las que se alcanzan las tensiones últimas son inferiores. Por este motivo el comportamiento de los hormigones de alta resistencia es más frágil que el de los hormigones convencionales (3).

La dosificación de los hormigones de alta resistencia también varía frente a la de los hormigones convencionales, ya que el contenido de cemento y el porcentaje de finos aumenta frente a estos últimos. Por este motivo, los hormigones de alta resistencia sufren más retracción y son más sensibles al efecto spalling.

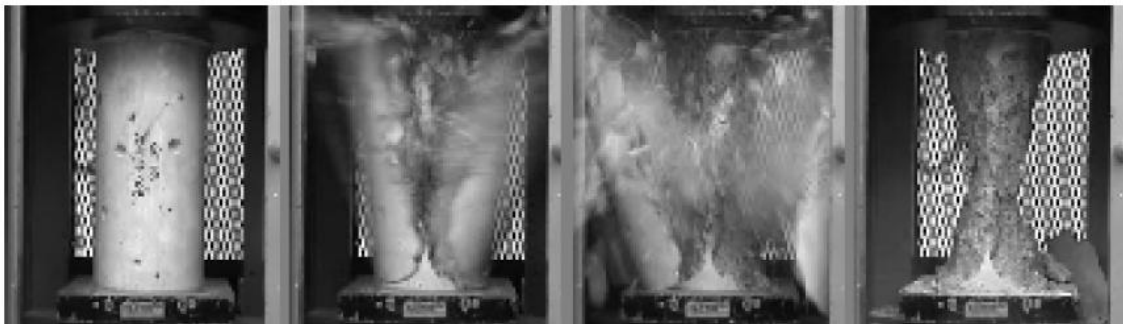


Ilustración 2.2: Rotura explosiva de un hormigón de alta resistencia (H.A.R.)

La forma que presenta la curva tensión-deformación en el H.A.R. tiene ciertos cambios si la comparamos con la de hormigones convencionales. Este diagrama tiene igualmente una primera zona ascendente, pero posee mayor pendiente y mayor longitud, siendo lineal hasta prácticamente alcanzar la tensión máxima. Además la pendiente de la rama descendente resulta más pronunciada, vertical en algunos casos, con un brusco descenso de la capacidad de carga al sobrepasar la tensión (4). Por otro lado, la deformación para la máxima tensión es ligeramente mayor. Estas variaciones se deben principalmente a:

- Cualquier tipo de hormigón está formado por dos materiales frágiles: la pasta de cemento y los áridos. La pendiente de la parte ascendente de la curva (E), es función de la rigidez de ambos componentes, estando su valor comprendido entre el del árido y el de la pasta. Como en el H.A.R. la rigidez de la pasta aumenta, la rigidez del hormigón aumenta también, acercándose más a la rigidez del árido. Por este motivo el valor de E crece.
- Por otro lado, la menor linealidad existente en la curva ascendente para los hormigones convencionales se debe a que debido a la gran diferencia de rigideces entre la pasta y los áridos antes descrita, al cargar se producen deformaciones relativas en la superficie de contacto que rompen la adherencia en la interfaz y generan microfisuración. A partir de este momento, la curva pierde linealidad, debido a que parte de la energía se invierte en propagar la microfisuración y no en seguir aumentando la deformación.
- En el H.A.R., los áridos y la pasta tienen rigideces muy parecidas y la adherencia es mejor, por lo que se retrasa la microfisuración y el comportamiento elástico se mantiene hasta un porcentaje de carga de rotura mayor.
- Por el contrario, al desarrollarse menos la microfisuración interna en los H.A.R., hace que sea más difícil la redistribución de tensiones en el material ante un aumento de carga posterior, conduciendo a la rotura frágil del hormigón de manera más brusca. Por esta razón, la pendiente del tramo descendente es mayor.

Para entender los puntos anteriores se adjunta la siguiente figura.

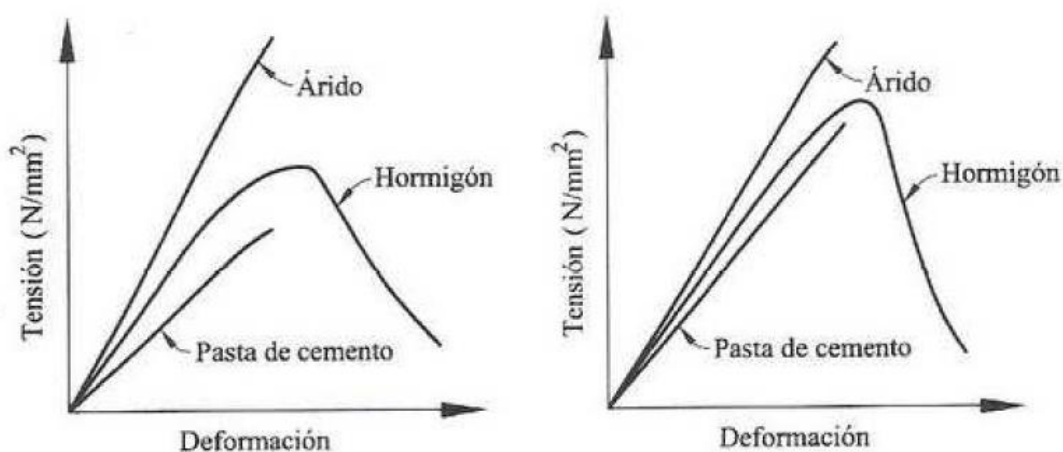


Ilustración 2.3: Diagramas tensión-deformación de hormigón, pasta de cemento y áridos en HC (Izq) y HAR (Der)

Existen algunos parámetros característicos del hormigón que tienen ciertas variaciones cuando se trata de H.A.R. A continuación se exponen brevemente los cambios mencionados.

En primer lugar, el módulo de deformación longitudinal del hormigón o módulo de elasticidad ( $E_c$ ), crece en menor medida que la resistencia a compresión ( $f_c$ ). Si comparamos el diagrama tensión-deformación del H.A.R. con los de los hormigones convencionales, resulta evidente que el módulo de elasticidad de los primeros es sensiblemente mayor. Esto es consecuencia de la mayor rigidez del mortero en los hormigones de alta resistencia y su mayor adherencia entre mortero y árido. El alto valor de  $E_c$  junto con el de la resistencia a tracción, aumentan la rigidez y el momento de fisuración.

Por otro lado, la resistencia a cortante de elementos de H.A.R. también varía debido a la microestructura de este tipo de hormigón. En concreto, el término  $V_{cu}$  que representa la contribución del hormigón frente al esfuerzo cortante, se reduce en términos relativos frente a un hormigón convencional, debido a que es menor el efecto del engranamiento entre caras, al ser la superficie de rotura más lisa, siendo menor, por tanto la capacidad de transmisión de esfuerzos tangenciales.

En cuanto a acciones, conviene tener en cuenta el posible mayor peso propio del H.A.R., derivado de su mayor compacidad, siendo razonable adoptar un peso específico próximo a  $\gamma=24\text{kN/m}^3$  sin armaduras.

## **2.3 HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS**

### **2.3.1 HISTORIA DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS**

En la antigüedad, las fibras ya se usaron para reforzar materiales de construcción. La paja se utilizaba para reforzar los ladrillos, mientras que la crin de caballo reforzaba el yeso de enlucido.

En 1910 y en 1911, Porter y Grahan respectivamente, ya promovían el armado del hormigón mediante barras y fibras como solución al problema de la baja resistencia a la tracción del hormigón. La primera patente mundial del reforzado con fibras llega en 1927 de la mano de G.Martin. En la década de los cincuenta, se produjo un gran avance en el conocimiento del refuerzo con fibras, gracias a las investigaciones de Romualdi & Bastón y Romualdi & Mandel.

A principio de 1960, se usaban fibras de plástico para experimentos en hormigones con y sin refuerzos por armaduras longitudinales o mallas. Experimentos con fibras de vidrio se llevaron a cabo en los Estados Unidos a principios de 1950, además de en Inglaterra y Rusia. El hormigón reforzado con fibras se ha empezado a utilizar desde mediados de 1960, principalmente sobre pavimentos, losas de hormigón, materiales refractarios y productos en general de hormigón. La mayoría de las experiencias

en los Estados Unidos se han realizado con fibras de acero con grava de peso medio y cemento portland. Los métodos de mezclado, colocación, consolidación y finalización han sido desarrollados principalmente para pavimentos.

### 2.3.2 RESUMEN TEÓRICO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

El hormigón reforzado con fibras (HRF), del anglosajón ‘FRC’ (Fiber Reinforced Concrete), es un hormigón con cemento hidráulico que contiene grava fina, áridos gruesos y una distribución discontinua de fibras (5). Elementos de refuerzo como mallas continuas o largas barras no entran dentro de la definición de fibras de refuerzo.

Las fibras que se utilizan en el proyecto son de polipropileno, un polímero formado por la polimerización de un monómero, el polipropileno ( $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$ ). Se obtiene a partir del petróleo mediante una reacción de adición. Es absolutamente inerte y estable, no se corroe y posee una resistencia a los álcalis muy alta. Además es antiestático y no magnético y tiene una vida útil limitada, por lo que su compatibilidad con morteros cementosos y hormigones es muy alta (6).

En el marco teórico, las fibras poseen propiedades que pueden influir en el comportamiento del hormigón (6):

- Longitud Crítica ( $l_c$ ): Este parámetro depende del diámetro “d” de la fibra, de la resistencia a la tracción “ $\sigma_f$ ” y de la resistencia de la unión matriz-fibra “ $\tau_c$ ”.

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

Existen dos tipos de fibras según su longitud: fibras continuas ( $l > 15 l_c$ ) y fibras de menor longitud llamadas fibras discontinuas o fibras cortas. Cuando  $l \ll l_c$ , la matriz se deforma en torno a la fibra, por lo que apenas existe transferencia del esfuerzo y la contribución de la fibra es casi inexistente.

- Orientación de la fibra: Existen dos situaciones definidas según la orientación: la alineación paralela de los ejes longitudinales de las fibras, y el posicionamiento de las fibras al azar. Normalmente las fibras del tipo continuas se alinean según la orientación

(a), mientras que las fibras discontinuas o cortas toman la orientación (b), (c) o una orientación media entre las dos situaciones.

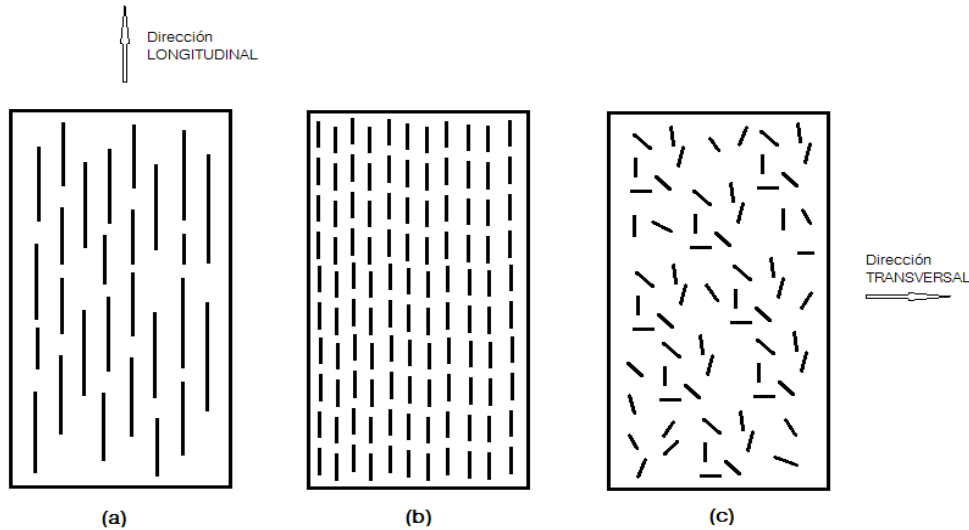


Ilustración 2.4: Formas de orientación de las fibras en el hormigón

- Volumen de la fibra: cuanto mayor es la fracción de volumen de la fibra, mayor es el módulo elástico del material reforzado.

La adición de fibras a la mezcla de fibras de polipropileno en nuestro caso, trae consigo una serie de mejoras:

- Formación de grietas por la retracción plástica del hormigón. La adición de fibras de polipropileno a la mezcla proporciona un comportamiento muy beneficioso en la prevención de las grietas formadas a temprana edad durante la retracción, esto se debe a la gran compatibilidad que existe entre el módulo de elasticidad de las fibras y el del hormigón a temprana edad (7).
- Propiedades de Fractura. Existen estudios en los que se ha analizado la evolución de dos parámetros que definen la fractura: energía de fractura ( $G_F$ ) y la longitud característica ( $l_{ch}$ ). En todos ellos se concluye que la adición de fibras en el hormigón incrementa la energía de fractura y la longitud característica (8), es decir, el hormigón reforzado con fibras de polipropileno presenta un comportamiento más dúctil que un hormigón que carezca de dicha adición.

En el citado estudio se puede observar un aumento en la resistencia a compresión, a tracción y a flexo-tracción. Las fibras de baja tenacidad y alta elongación aportan mejores

características mecánicas que las de alta tenacidad y baja elongación. Esto se debe a que la mayoría de las fibras fallan por arrancamiento y no por rotura.

En lo que respecta al efecto tamaño, en el estudio citado también se comprueba que la adición de fibras ayuda a minimizarlo.

## **2.4 HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE**

### **2.4.1 HISTORIA DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE**

Durante la década de los años 80 en Japón, los problemas asociados a la falta de homogeneidad y, consecuentemente pérdida de durabilidad del hormigón, tuvieron una gran importancia en numerosas estructuras. La principal causa de este problema fue asociada con una mala compactación del hormigón. En una situación de reducción de trabajadores calificados, la solución para el problema de durabilidad fue desvincular, en la etapa de vibración, la calidad del hormigón de posibles errores humanos.

Inicialmente, la tarea parecía fácil, pues ya se habían utilizado con éxito hormigones sin compactación en los hormigonados sumergidos, y en los hormigonados de recintos estancos. Sin embargo, la cantidad de cemento utilizada en estos casos era elevada, y normalmente este procedimiento se hacía para el hormigón en masa, es decir, sin la presencia de armaduras. Con la introducción de los aditivos superplastificantes fue posible el diseño de mezclas fluidas en estado fresco sin la necesidad de una elevada cantidad de cemento.

Como respuesta a estos problemas, se desarrolló el concepto de Hormigón Autocompactante (HAC), introducido inicialmente por Okamura en Japón en el año 1988. A partir de este período, numerosas investigaciones se han llevado a cabo en diferentes países, con el objetivo de encontrar una dosificación óptima y económica, que garantice un buen comportamiento del hormigón fresco, así como sus propiedades mecánicas (Skarendahl y Petersson, 1999; Ozawa y Ouchi, 2001; Wallevik y Nielson 2003; Shah, 2005; De Schutter y Boel, 2007, entre otros).

El rápido desarrollo experimentado, especialmente en elementos prefabricados, se debe a las grandes ventajas que presenta el HAC frente al hormigón convencional, debido principalmente a sus propiedades en fresco. Esto conduce a la posibilidad de realizar proyectos más complejos y exigentes en lo que respecta al diseño, y puesta en obra. Asimismo, presenta un coste global reducido, pues el mayor coste de material y encofrados que requiere este hormigón, se compensa con un menor coste de personal y equipos asociados a la compactación, además de la reducción de los plazos de ejecución de modo considerable (9).

Las ventajas del HAC también inciden en los aspectos medioambientales, al reducir los ruidos, especialmente importante en plantas de prefabricación y obras en entornos urbanos (10) y sobretodo, en aspectos relativos al ambiente de trabajo y la salud laboral, mejorando las condiciones ambientales y eliminando los riesgos laborales imputables a la compactación.

Sin embargo, la dosificación de este tipo de hormigón es más compleja que la de un hormigón vibrado (11) debido a la necesidad de encontrar un equilibrio entre sus propiedades en fresco. Éstas dependen de distintos mecanismos: elevada trabajabilidad, estabilidad después de transportado, y capacidad de paso entre armaduras sin retención de los áridos. Una alta trabajabilidad, suele requerir un elevado volumen de pasta, el cual conduce a un incremento de la retracción y de la fluencia. Además, los diferentes materiales existentes en el mercado y sus diferencias entre distintas regiones geográficas, hacen el proceso de dosificación aún más complejo.

#### **2.4.2 RESUMEN TEÓRICO DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE**

Desde el punto de vista teórico, el hormigón autocompactante se puede definir como aquel hormigón 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.

Estas prestaciones son consecuencias de la fluidez, viscosidad y cohesión apropiadas en las mezclas de estos hormigones y que dan lugar a las tres propiedades básicas del HAC: capacidad de relleno, capacidad de paso y resistencia a segregación. La capacidad de relleno o fluidez no limitada, se refiere a la capacidad del HAC de fluir y rellenar completamente todos los espacios del encofrado, por su propio peso sin vibración. La capacidad de paso es la posibilidad del HAC de fluir a través del armado sin segregación o bloqueos. La resistencia a segregación o estabilidad, es la capacidad del HAC para mantener homogénea su composición, durante el transporte y la puesta en obra.

En el año 2000, Okamura et al. (2000) definen como “hormigón autocompactante de altas prestaciones” aquél hormigón que además de lo anterior también satisface los dos requisitos citados a continuación. Primero, los efectos derivados de la generación de calor, endurecimiento o retracción por secado deben ser mínimos y, segundo, la permeabilidad del hormigón frente a la penetración del oxígeno, cloruros y agua debe ser mínima. Dicha definición se da en el contexto de la primera década de investigaciones en HAC (1989–1999), cuando los primeros HAC diseñados dieron como resultado hormigones de altas prestaciones debido a los cambios necesarios en la dosificación para obtener la autocompactabilidad (12). Dado los buenos resultados experimentados en la práctica ingenieril (ya sea en prefabricados o en aplicaciones *in situ*) surge la necesidad de un desarrollo de HAC también en



bajas prestaciones (a partir de 30 MPa).

Actualmente, la definición del HAC se da únicamente en función de su estado fresco, ya que se considera que el HAC añade a las propiedades del hormigón convencional, en cualquiera de las clases resistentes, la propiedad de autocompactabilidad (EHE-08).

## **2.5 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN EN FRACTURA**

### **2.5.1 INTRODUCCIÓN**

A continuación, se van a exponer una serie de conceptos teóricos necesarios para poder comprender este proyecto.

Dichas conceptos se redactarán de forma breve y concisa debido a que el estudio de la fractura no es el principal objetivo del trabajo.

### **2.5.2 ARGUMENTOS QUE JUSTIFICAN EL USO DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA PARA EL CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN (7)**

Energía necesaria para el crecimiento de la grieta: El crecimiento de una grieta requiere el consumo de cierta cantidad de energía, por lo que es necesario un criterio de fallo por energía. No obstante la grieta puede ser creada por que el material supere su límite de resistencia. Es irrelevante como se inicia la grieta, lo importante es saber cómo se propaga la grieta bajo unas cargas determinadas. Esto sólo puede ser estudiado basándose en un criterio de energía.

- Objetividad en el cálculo de la carga y respuesta: La MFEL es aplicable para analizar el comportamiento de estructuras de hormigón con grietas. Se puede modelar de dos formas: una mediante el llamado “smearing” sobre elementos enteros y otra mediante concentraciones de tensión entre elementos discretos contiguos. El camino para obtener los resultados, los cuales son independientes del tamaño del elemento con el que se modele, requiere que la energía disipada durante el proceso de fractura sea constante. Esta energía constante de disipación es la llamada energía de fractura y forma el fundamento de la teoría de la Mecánica de la Fractura.
- Falta de zona de cadencia: 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: El área que hay bajo la curva carga-deformación representa la energía absorbida por la estructura durante el proceso de fallo, despreciándose las pérdidas en soportes y puntos de aplicación de cargas. La mayor parte de la energía es absorbida tras el pico que presenta la respuesta, en la zona de ablandamiento por deformación. Esto determina la ductilidad de la estructura.
- 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, que 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. (8), (13).

### 2.5.3 MECÁNICA DE LA FRACTURA ELÁSTICO LINEAL

Para poder posteriormente hablar sobre la Mecánica de Fractura aplicada al hormigón estructural, se introducen muy brevemente en este apartado las teorías y modelos en los que se fundamenta la MFEL, como son las teorías de Griffith e Irwin con sus consideraciones energéticas.

- Teoría de Griffith para materiales frágiles.

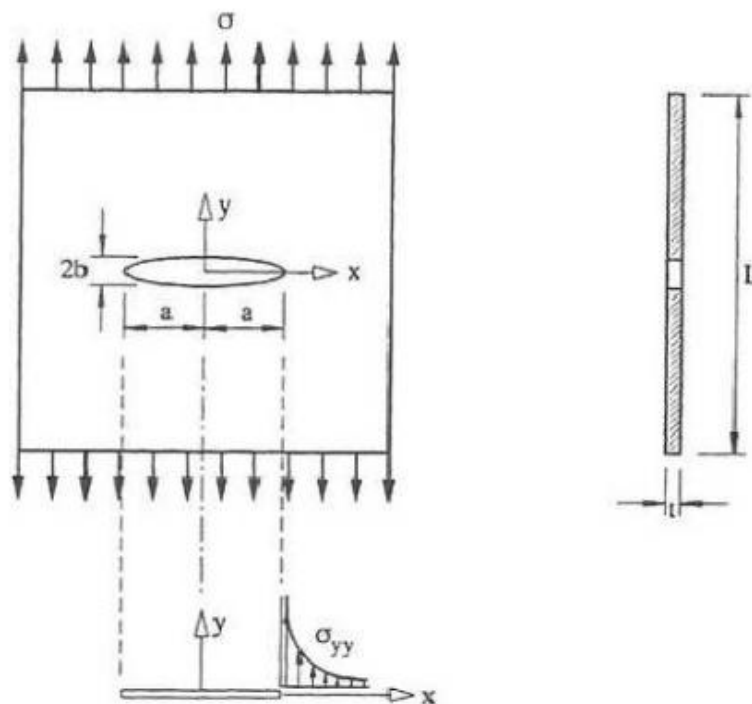


Ilustración 2.5: Placa delgada ( $L \gg t$ ) con hueco elíptico bajo una tensión uniforme  $s$ . Cuando  $b \rightarrow 0$  el hueco se convierte en una grieta (Problema de Griffith)

Mediante la aplicación de un balance de energía para un espesor unidad y suponiendo que la grieta crecía una cantidad “da” por cada lado, Griffith llegó a la expresión (2):

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

Donde:

Y: Densidad de energía superficial. Energía necesaria para separar en una unidad las caras de la grieta.

E': toma el valor de E o de  $E/(1-\nu^2)$  para tensión plana y deformación plana respectivamente.

- Teoría de Irwin para materiales frágiles.

Existen para esta teoría tres estados de cargas elementales.

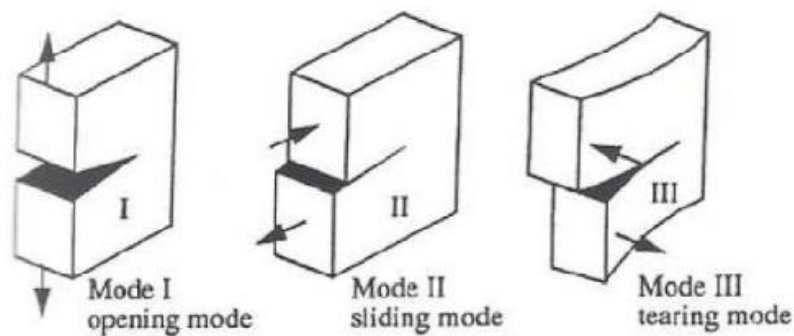


Ilustración 2.6: Tres modos posibles de deformación en la punta de la grieta

Para cada uno de los modos, Irwin calculó el campo de tensiones y definió el Factor de

Intensidad de Tensiones, que para el modo I es:

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

A partir de este parámetro se define el criterio de Irwin: una grieta en un material frágil, se propagará cuando el factor de intensidad de tensiones  $K_I$  supere el valor crítico  $K_{IC}$ . Este valor crítico es una constante del material y es llamado *Resistencia a la Fractura*. Por tanto el criterio de fractura se expresa como:

$$K_{IC} = \sigma\sqrt{\pi a}$$

Con esto se llega al resultado fundamental de la Mecánica de Fractura Elástico Lineal, que establece que el criterio local de tensión de Irwin es igual que el criterio global de energía de Griffith.

$$\left. \begin{array}{l} \sigma\sqrt{\pi a} = \sqrt{2E'\gamma} = \text{cte} \\ K_{IC} = \sigma\sqrt{\pi a} \end{array} \right\} \boxed{K_{IC}^2 = E'G_C} : G_C = 2\gamma$$

Donde  $G_C$  es la densidad de energía superficial de Griffith.

#### 2.5.4 ENERGÍA DE FRACTURA ( $G_F$ )

La energía específica de fractura, es la energía necesaria para crear una grieta de un área unidad y su expresión es la siguiente:

$$G_F = \frac{W_F}{A_{lig}}$$

Donde:

$W_F$ : Área bajo la curva carga-desplazamiento. Trabajo realizado por la carga exterior que se emplea en aumentar el tamaño de la grieta.

$A_{lig}$ : Área de ligamento.

Para un material elástico y frágil la energía de fractura  $G_F$  debe ser igual al valor  $G_C$  (densidad de energía superficial de Griffith). Resultados de diversos ensayos [ M. Espinar, H. Cifuentes. *Hormigones de baja resistencia reforzados con fibras de polipropileno: Análisis experimental de la geometría de la fibra sobre las propiedades de la fractura*. Grupo de Estructuras. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla, 2008.] muestran que ambos valores no son iguales incluso tratándose del mismo hormigón.

La variación que se ha observado en los resultados experimentales es debida a la violación de dos de las suposiciones que se hicieron para definir la energía específica de fractura  $G_F$ . Estas dos son:

- El trabajo realizado por la carga externa se emplea sólo en la extensión estable de la grieta.
- La energía requerida por esta es independiente de la geometría de la probeta y de la forma de aplicación de la carga.

### 2.5.5 ZONA DE PROCESO DE FRACTURA

Como se ha anunciado anteriormente, se ha demostrado que el comportamiento del hormigón se desvía significativamente de las predicciones de la MFEL (7), excepto para el caso de estructuras de grandes dimensiones.

La primera razón que aleja el comportamiento del hormigón de esta teoría, es la formación de una extensa zona de proceso de fractura por delante de la preexistente grieta. Esta zona suele ser pequeña tanto en materiales dúctiles como en frágiles, y es sólo en los cuasi-frágiles donde tiene unas dimensiones importantes.

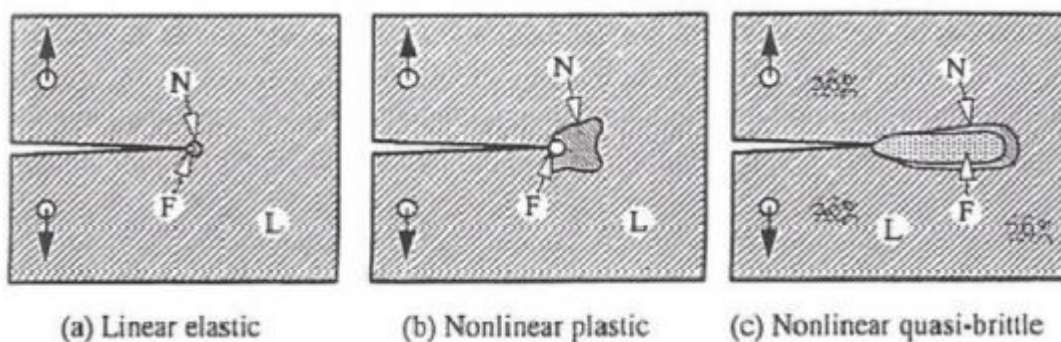


Ilustración 2.7: Distinción de las características de fractura en (a) un material elástico lineal, (b) un metal dúctil, (c) un material cuasi-frágil. L es la región elástica lineal, N la zona no-lineal y F la zona de proceso de fractura

Es importante también conocer la extensión de la zona donde tiene lugar el proceso de fractura en el hormigón. Dicha extensión se denomina  $l_{ch}$ . Mediante la teoría de Irwin se puede hacer una aproximación de ésta para materiales con base de cemento.

$$l_{ch} \approx \frac{E' G_F}{f_t'^2}$$

Mediante el estudio de la mecánica de la fractura se llega a los siguientes conceptos importantes (2):

- Hormigones con mayor  $l_{ch}$ , presentan mayor longitud de la zona de progreso de fractura (ZPF).
- Hormigones con valores similares de  $l_{ch}$ , presentan comportamientos similares a fractura.

- La  $l_{ch}$  tiene relación con la curva de comportamiento carga-desplazamiento. En nuestro caso este aspecto es importante, ya que los H.A.R. presentan curvas más altas y afiladas, es decir, tienen un valor de  $l_{ch}$  menor, y por tanto, una ZPF menor y un comportamiento más frágil.
- Cuanto más basta sea la microestructura del material mayor será el tamaño de ZPF, y mayor por tanto, la  $l_{ch}$ . Así para un cristal esta zona tiene un tamaño muy reducido, mientras que para un hormigón con agregados de gran tamaño es muy superior.

### 2.5.6 EFECTO TAMAÑO EN EL HORMIGÓN

Son muchos los estudios que han demostrado el llamado “*efecto tamaño*” en las estructuras de hormigón (14), (13). Dicho efecto demuestra porque una probeta de la misma geometría y proporciones que otra, soporta una menor carga máxima a medida que su tamaño aumenta. Además la tensión última y la deformación última también disminuyen con el aumento de tamaño, lo que implica un comportamiento menos dúctil para probetas grandes.

Este fenómeno fue descubierto por Bazant, quien determino la ley que regía dicho comportamiento y que podemos apreciar en la siguiente figura, junto con las predicciones de la MFEL (materiales frágiles) y el Criterio de Resistencia (materiales dúctiles).

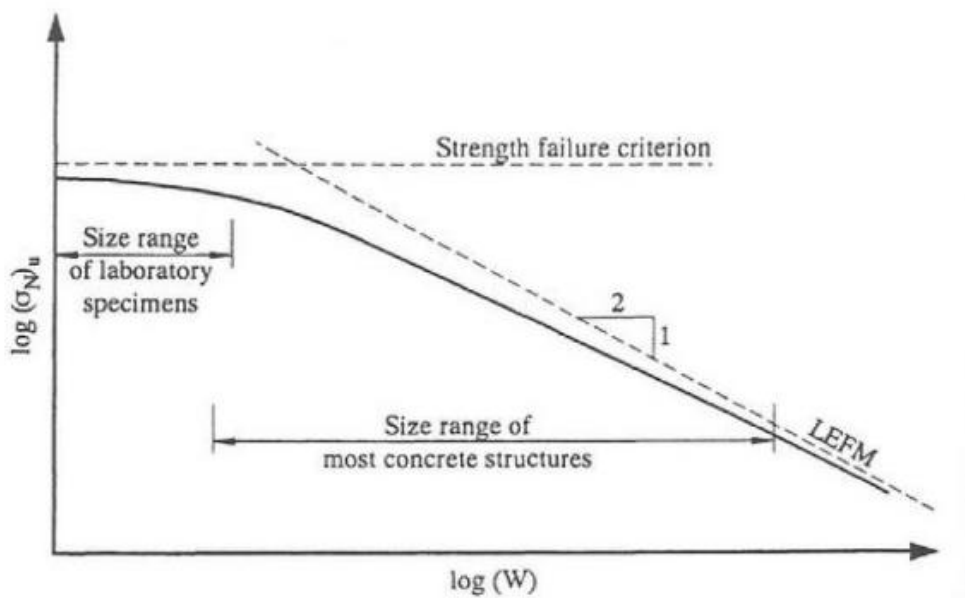


Ilustración 2.8: Ley de Efecto Tamaño de Bazant (curva continua). En línea discontinua aparece lo que predice el Criterio de Resistencia (Strength failure criterion) y la MFEL (LEFM)

En la gráfica se expone en escala logarítmica la tensión nominal última frente a la longitud característica.

### 2.5.7 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ENERGÍA DE FRACTURA ( $G_F$ )

La energía de fractura  $G_F$  se obtiene midiendo el trabajo necesario para abrir completamente una fisura de área unidad.

A continuación, se expone el tratamiento dado a las curvas carga-desplazamiento con el fin de obtener la energía de fractura  $G_F$ .

1. Se corrige la zona inicial de la curva.
2. Corrección por ajuste de la cola de la curva.
3. Obtención de  $G_F$ .

La finalidad del primer paso es eliminar la no linealidad inicial de la curva debida al acomodo o incrustación en los apoyos. Esta corrección consiste en tomar el tramo lineal ya estabilizado como recta inicial del registro P- $\delta$ . Posteriormente hay que corregir el cero en  $\delta$ , para que la curva comience en el punto (0,0). Esto se consigue restando a todo el registro el valor  $\delta_a^m$ , valor correspondiente a la carga nula en la curva modificada.

$$\delta = \delta^m - \delta_0^m$$

Donde  $\delta^m$  es el valor original de la flecha en el registro.

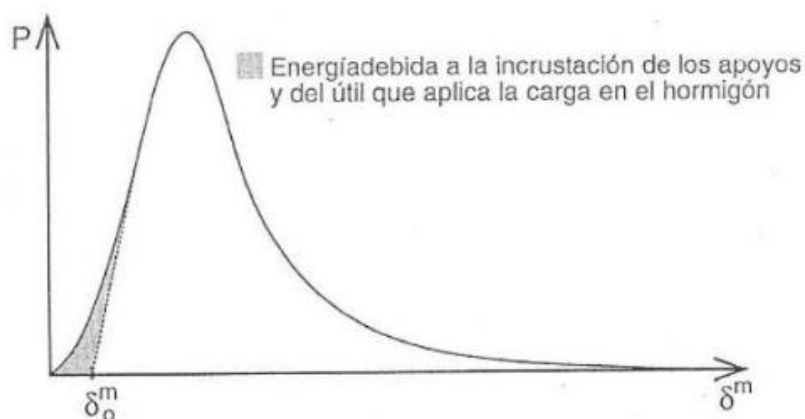


Ilustración 2.9: Esquema de la corrección de la zona inicial no lineal de la curva P-  $\delta$

En segundo lugar hay que tener en cuenta que normalmente en el ensayo de flexión resulta imposible medir la totalidad del trabajo necesario para romper el ligamento de hormigón, puesto que la fisura no

llega a abrirse completamente. El ensayo se detiene en una flecha final a la que se asigna la carga nula en la curva  $P-\delta$  experimental, llamada  $\delta_u$ . Sin embargo, si fuera posible continuar midiendo se obtendría un registro de la flecha que tiende hacia una asíntota horizontal que marca la rotura completa del ligamento y la verdadera resistencia exterior nula. A esta energía no registrada se le llama energía no medida, que se encuentra representada en la siguiente figura.



Ilustración 2.10: Energía de la cola que no se puede medir en un ensayo de flexión en tres puntos

Para obtener el valor del trabajo no medido ( $\Delta W_{nm}$ ) en la práctica, hay que realizar lo siguiente:

- Ajustar la cola de la curva carga-desplazamiento.

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

El valor de  $A$ , es aquel que minimice el error absoluto entre la cola de la curva real y la aproximada por la función anterior.

- La energía no medida en el ensayo tiene la siguiente expresión:

$$\Delta W_{nm} = \frac{2A}{\delta_u}$$

Para finalizar, el trabajo medido ( $W_m$ ) puede definirse como el área encerrada por la curva carga-desplazamiento, tras la realización de los ajustes comentados anteriormente.

La expresión de la energía de fractura quedaría de la siguiente forma:

$$G_F = \frac{W_m + \Delta W_{nm}}{A_{lig}}$$



## 2.6 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN A ALTAS TEMPERATURAS

### 2.6.1 INTRODUCCIÓN

El hormigón presenta un gran comportamiento frente al fuego y por consiguiente presenta unos niveles excepcionales de protección y seguridad en caso de incendio. Los principales motivos son (15):

- El hormigón no arde (incombustible) y no aumenta la carga de fuego.
- Tiene una elevada resistencia al fuego y detiene la propagación del mismo.
- Protege eficazmente, proporcionando unos recorridos de emergencia seguros a los ocupantes y una protección a los bomberos.
- El hormigón no produce humo ni gases tóxicos, lo que contribuye a disminuir el riesgo de los ocupantes.
- Disminuye la magnitud del incendio, y con ello también el riesgo de contaminación ambiental.
- Proporciona una protección intrínseca contra el fuego, normalmente no se precisan medidas complementarias.
- La solidez del hormigón frente al fuego facilita la extinción de los incendios y reduce el riesgo de colapso estructural.
- El hormigón es fácil de reparar después de un incendio, y con ello ayuda a que se reanuden antes las actividades.
- No se ve afectado por el agua utilizada para sofocar un incendio.

Dicho esto, se puede observar que ningún otro material es un ejemplo tan complejo de seguridad en su comportamiento en caso de incendio.

Sin embargo, 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 pueden producir una rotura explosiva (16), (17), (18), (19). Este fenómeno es conocido como “*spalling*”.

Si el *spalling* afecta a las capas externas, éste provoca un desprendimiento del recubrimiento que se conoce por el nombre de “desconchado”. El desconchado forma parte de la respuesta normal del hormigón frente al fuego y las altas temperaturas que éste acarrea. Por ello, en edificios normales e incendios normales (p.ej. escuelas, hospitales, viviendas, oficinas), los códigos de diseño como el Eurocódigo 2 permiten ya que se produzcan desconchados en estas aplicaciones.

Es importante saber que, en ocasiones, estructuras visiblemente poco afectadas por la acción directa

del fuego, pueden haber sufrido daños físicos y químicos que requieran costosos procesos de reparación o que incluso sean ya imposibles de reparar.

En lo que respecta a las armaduras, en el caso del hormigón armado, la prematura fisuración que se produce en la superficie del hormigón de recubrimiento durante las primeras fases del proceso del incendio y el posterior enfriamiento brusco superficial también causa daños de igual o mayor envergadura que los antes mencionados.

En el que concierne al hormigón de alta resistencia, éste es especialmente susceptible a la rotura antes descrita, debido a la poca permeabilidad de la masa cementícea que lo conforma. La baja permeabilidad impide la salida de los gases que elevan de manera extrema las presiones interiores y generan tracciones en el material (18).

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 (20). El proceso de rotura es la conjunción de fenómenos termo-hidromecánicos.

Por último, mencionar que el fenómeno de spalling comienza a manifestarse en el hormigón bajo una amplia gama de temperaturas. Esta temperatura es función de la porosidad de la matriz, el contenido en agua, velocidad de calentamiento y temperatura máxima alcanzada (21).

## 2.6.2 COMPORTAMIENTO DEL H.A.R. FRENTE A ALTAS TEMPERATURAS

Investigaciones llevadas a cabo por Diederichs en 1988 nos permitieron saber más acerca del comportamiento del H.A.R. frente al fuego. A continuación se expone la curva tensión-deformación obtenida a diversas temperaturas. Dicha curva es para un H.A.R. de cemento portland y cenizas volantes de  $f_c=91.8$  MPa.

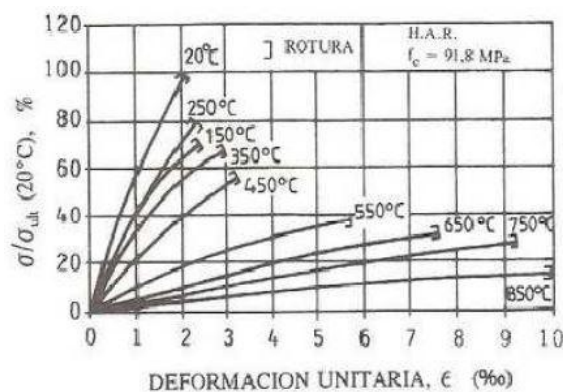


Ilustración 2.11: Curva tensión-deformación de un H.A.R. a diversas temperaturas

Los H.A.R son densos y poco permeables, lo que hace que sean sensibles al fuego por la imposibilidad que presentan para dejar escapar gases ocluidos y así aliviar tensiones. En la Figura 6.2 se puede observar como a 150°C se advierten pérdidas de resistencia a compresión próximas al 30%.

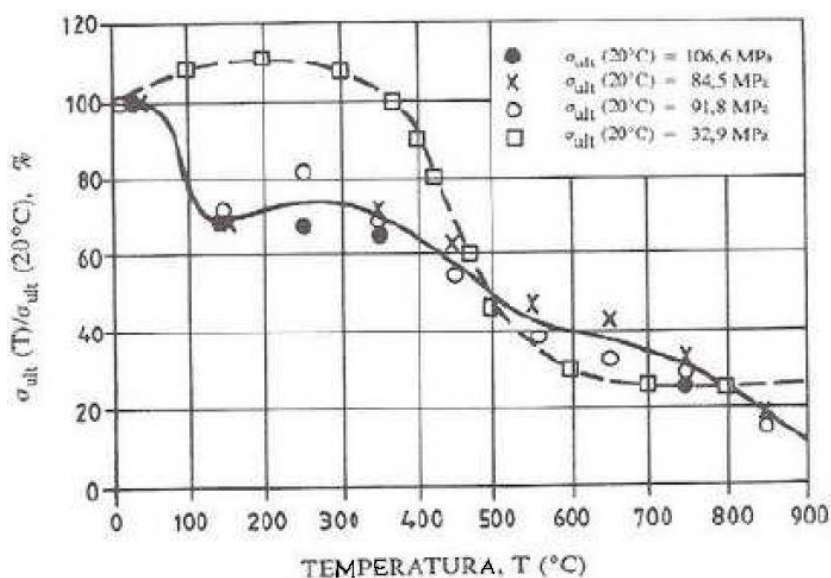


Ilustración 2.12: Efecto de la temperatura en la resistencia a compresión del hormigón

Otro aspecto del comportamiento del H.A.R. frente a la acción del fuego puede apreciarse en Figura 6.3, que presenta la relación entre módulos de elasticidad relativos (módulos de deformación) y temperaturas para hormigones de distintas características.

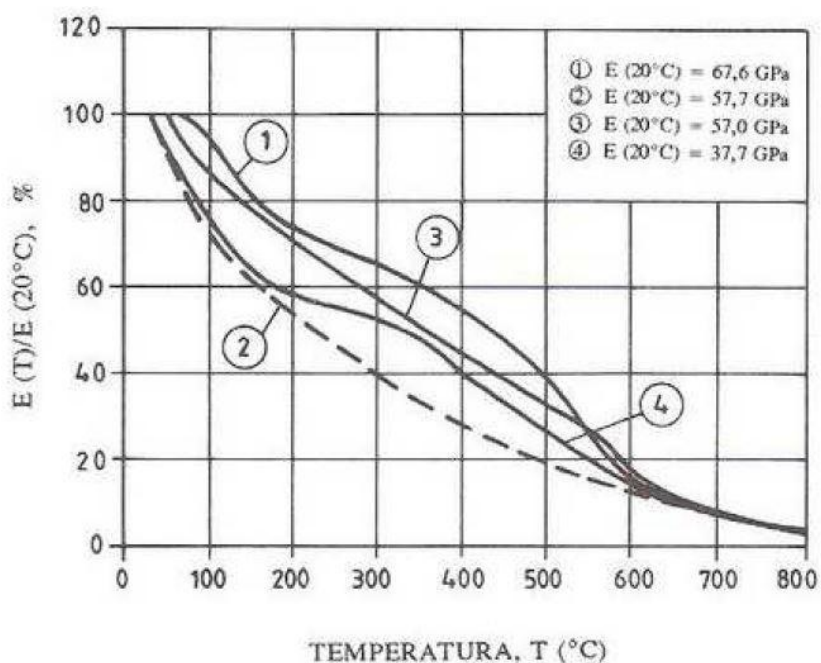


Ilustración 2.13: de la temperatura en el módulo de elasticidad del hormigón

Como conclusión al estudio de Diederichs, se puede observar que en la franja de temperaturas entre 100 y 400°C existen grandes pérdidas relativas de tensión en los H.A.R. Esto se debe a que en el H.A.R. la pasta de cemento y el árido se encuentran muy adheridos, y el deterioro de ésta producido por el exceso de tensiones, afecta de manera más notable a la pieza de hormigón en general.

### 2.6.3 VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL H.A.R. CON LA TEMPERATURA

B.Zhang y N.Bicanic (1), basándose en los estudios de Bazant, Prat y Baker (22), (23), realizaron unos ensayos para medir la energía de fractura ( $G_F$ ) del H.A.R. frente a temperaturas de hasta 450°C. Las probetas se ensayaron de dos maneras: dentro del horno mientras estaban calientes y fuera del horno una vez enfriadas. Las probetas se mantuvieron en el horno durante 16 horas. Antes de poder analizar  $G_F$ , hay que entender una serie de conceptos:

- Mientras la probeta está en el horno, se observa que cuanto mayor es  $T_m$ , mayor es el gradiente de temperatura que se produce. Esto hace que se alcance más rápido el equilibrio térmico. Además se puede apreciar en el gráfico (Figura 6.4), que los extremos de la probeta se calientan antes que la zona central.

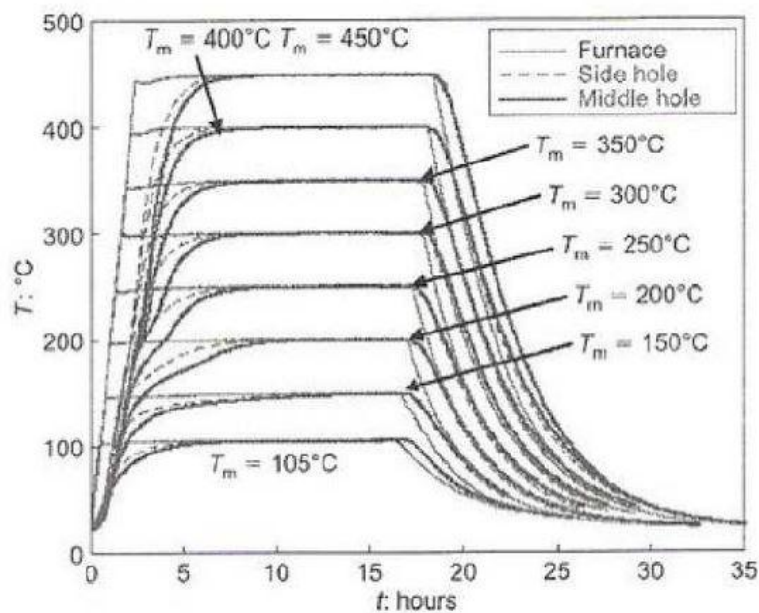


Ilustración 2.14: Temperaturas en el horno (furnace) y en el hormigón [centro (middle) y lateral(side)] a lo largo del proceso de calentamiento

- Pérdida de Peso ( $w$ ): Durante la primera 1,5h  $w$  crece ligeramente debido a que solo se produce la evaporación del agua cercana a la superficie, después el aumento es mucho mayor ya que la humedad de la parte interior es expulsada. Una vez que se alcanza  $T_m$ , el gradiente se

hace cada vez más pequeño hasta que el valor de  $\omega$  se estabiliza, debido a que se ha alcanzado el equilibrio térmico. En la figura 6.5, se puede apreciar que cuanto mayor es  $T_m$ , menos tarda en alcanzarse el citado equilibrio térmico debido a que el gradiente de  $\omega$  es mayor.

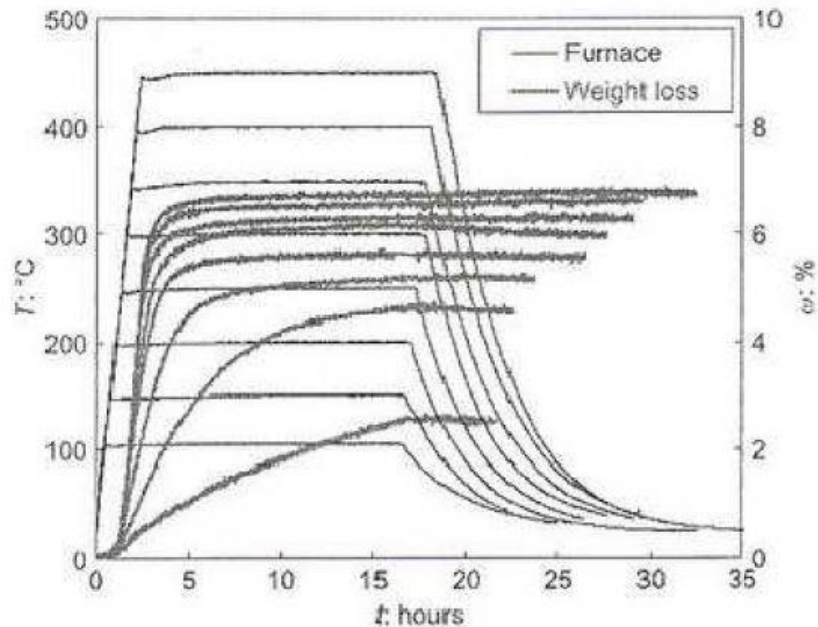


Ilustración 2.15: Pérdida de peso a través del proceso completo de calentamiento-exposición-enfriamiento

- En la Figura 6.6 se puede advertir que si se observa globalmente la pérdida de peso última  $w_u$ , ésta aumenta con  $T_m$ , y además, se observa un comportamiento bilineal que se debe a los dos procesos. En el primero (hasta 150°C) se evapora solo el agua capilar y a partir de ahí empieza a hacerlo el agua gel. Existiría un tercer estado, para temperaturas muy elevadas, donde se evaporaría también el agua de la pasta de cemento y agregados por descomposición del agua combinada. Pero como los ensayos solo fueron hasta 450°C, este proceso o no se dio o no fue muy evidente.

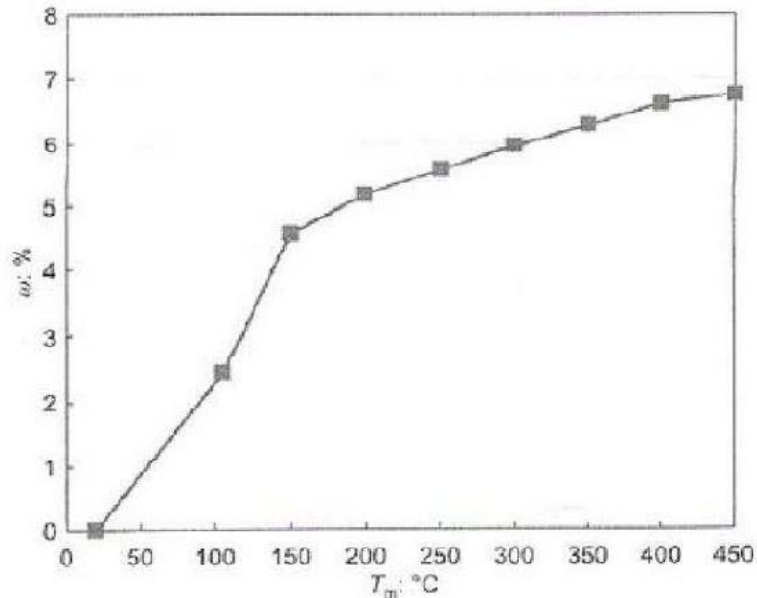


Ilustración 2.16: Pérdida de peso última para diferentes temperaturas de calentamiento

- De la Figura 6.7a (Curva Carga-Desplazamiento en Caliente) se pueden extraer varias conclusiones: A mayor  $T_m$ , las curvas son menos esbeltas, debido a que la rigidez del hormigón disminuye. La carga última ( $P_u$ ), normalmente decrece con el aumento de  $T_m$ , sin embargo, la deformación última si aumenta con  $T_m$ . La caída y recuperación de  $P_u$  entre  $105^\circ\text{C}$  y  $150^\circ\text{C}$  se debe al vapor a alta temperatura en el interior del hormigón, que a  $105^\circ\text{C}$  todavía no puede ser liberado.
- En la Figura 6.7b (Curva Carga-Desplazamiento en Frío), la carga última  $P_u$  primero crece con el aumento de  $T_m$  y luego decrece. Al igual que en el caso anterior, a mayor  $T_m$ , las curvas se hacen menos esbeltas. La parte decreciente tiene mayor pendiente que en las probetas calientes debido al daño producido en el hormigón al enfriarse, por la formación de numerosas microgrietas.

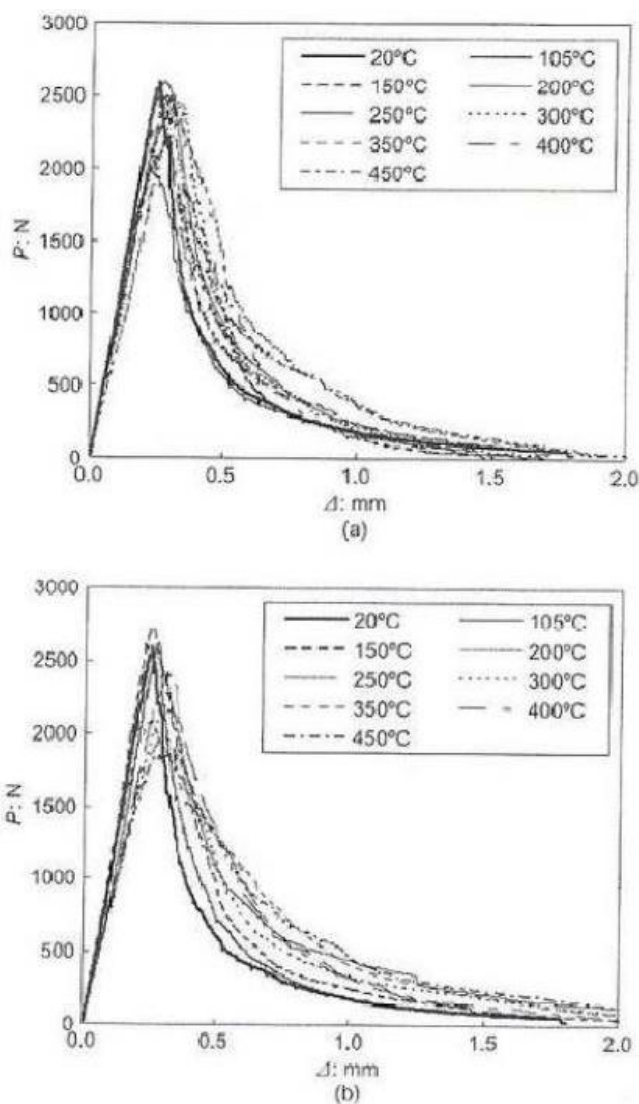


Ilustración 2.17: Curvas carga- desplazamiento completas para varias temperaturas de calentamiento: (a) para las probetas de hormigón caliente, (b) para las probetas de hormigón frío

Una vez se han entendido los conceptos anteriormente expuestos, ya se pueden comentar los resultados de  $G_F$  que se obtuvieron en el estudio. La evolución de dichos resultados se expone en la ilustración 2.18.

Como puede apreciarse, para las probetas calientes la evolución de  $G_F$  es de decrecimiento-crecimiento. El primer tramo es hasta  $150^\circ\text{C}$ , y el decrecimiento se debe a que a estas temperaturas la estructura del hormigón no está muy dañada y no permite que la humedad salga fácilmente, por tanto se produce vapor a alta temperatura en el interior del hormigón. A partir de ese punto, la humedad ya escapa más fácilmente, haciendo un hormigón más blando y dúctil y, por tanto, más difícil de romper.

Para el caso del hormigón en frío, la curva decrece-crece-decrece con el aumento de  $T_m$ . Esto se debe a que para  $T_m < 300^\circ\text{C}$  se favorece la hidratación, aumentando la fortaleza de la unión con los

agregados y aumentando también la resistencia al agrietamiento. Sin embargo, para temperaturas mayores, la resistencia se reduce debido a los efectos de descomposición, deshidratación y formación de microcavidades.

Observando la ilustración 2.18,  $G_F$  es menor para el hormigón en caliente que para el frío, cambiando este comportamiento para  $T_m > 350^\circ\text{C}$ .

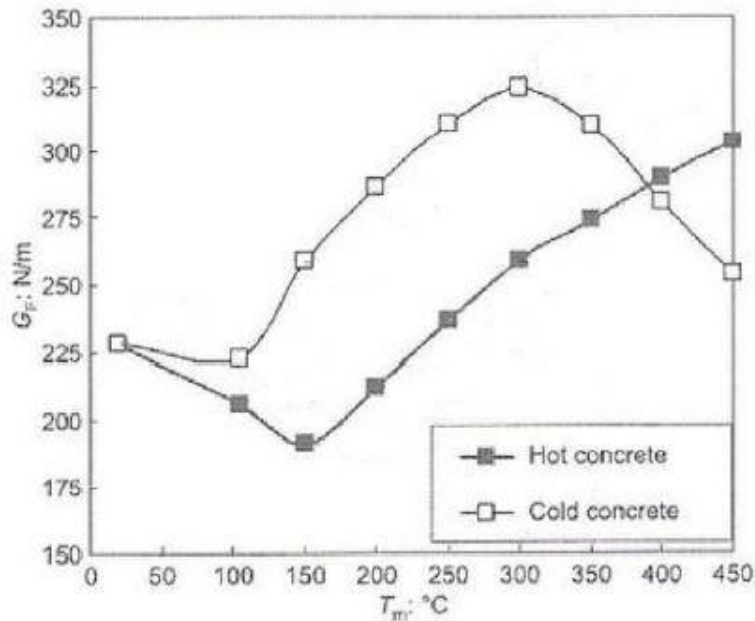


Ilustración 2.18: Energía de fractura para diferentes temperaturas de calentamiento

Si se observa ahora la ilustración 2.19, curva que representa la evolución de  $G_F$  frente a  $w_u$ , se ve como para el hormigón en caliente la curva primero crece y luego decrece. Esto se debe a que en los comienzos, el agua no puede evaporarse con facilidad. Cuando comienza la deshidratación, el hormigón se hace más duro, debido al comportamiento de lubricante que toma el agua.

Para el caso del hormigón en frío, la curva presenta una zona estable, seguida de un crecimiento y un decrecimiento. Al igual que en el caso anterior, la zona creciente se debe a la evaporación capilar del agua. La zona decreciente, se debe a la evaporación del agua gel y del agua combinada. Este hecho produce descomposición y degradación en el hormigón ( $T > 300^\circ\text{C}$  aprox.).



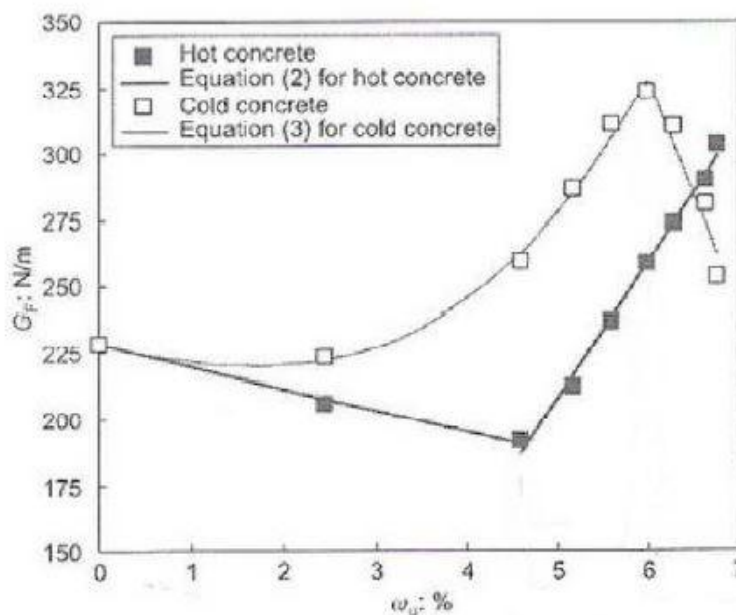


Ilustración 2.19: Energía de fractura frente a pérdida de peso última

La causa por la que se menciona este estudio en el proyecto, se debe a que servirá de guía cualitativa para las conclusiones obtenidas de nuestro propio estudio.

#### 2.6.4 MEJORA DE LA RESPUESTA AL FUEGO CON LA ADICIÓN DE FIBRAS DE POLIPROPILENO

Es conocido que la adición de fibras de polipropileno al hormigón produce una mejora en el comportamiento de éste frente al fuego.

El comportamiento de las fibras depende del rango de temperaturas en el que nos encontremos (24).

Hasta los 160°C aproximadamente, las fibras son capaces de evitar el desmoronamiento de la masa de hormigón dañada (25), sin embargo, cuando se supera esta temperatura, el polipropileno arde dejando huecos de escape que hacen que la presión interna del agua no llegue a alcanzar el valor necesario para producir spalling.

Con referencia al desprendimiento del recubrimiento, destacan los ensayos llevados a cabo en Cardington por Lennon (2002) en los que se ensayaron desde pilares individuales hasta un edificio, a escala 1:1, de 7 plantas con pilares de 85MPa de resistencia a compresión en probeta cubica, añadiendo fibras de polipropileno para reducir la presión de los poros como hemos visto. Se observó, en efecto, el efecto positivo de las fibras cuya fusión a elevadas temperaturas, creando una cierta porosidad, permitía disminuir la presión en los poros. Según Phan (2002), este efecto con fibras de polipropileno se incrementa al aumentar la cuantía de las fibras hasta 3,0 kg/m<sup>3</sup>. Adicciones de 1,5 kg/m<sup>3</sup> resultaron suficientes en los ensayos para prevenir el desprendimiento explosivo del

recubrimiento.

Desde el punto de vista industrial, una dosificación de la fibra de 2kg/m<sup>3</sup>, para una longitud de fibra de 10 a 20mm y un diámetro de 50 a 200 µm son generalmente adoptados para evitar el spalling del H.A.R.

Sin embargo, un estudio de P. Kalifa, G. Chene y C. Galle (25) , trató de demostrar que existía un óptimo de la dosificación de la fibra de 1,75 kg/m<sup>3</sup>, valor para el cual la fibra alcanza el límite de percolación, término que se refiere al movimiento y filtración de fluidos (fibra fundida) a través de materiales porosos no saturados. Concluyeron afirmando que un aumento de la cantidad de fibra por encima de este límite de percolación no aportaba mejoras. Aun así determinaron que el valor de 2kg/m<sup>3</sup> usado en la industria era adecuado.

Además en el estudio anterior trato de analizarse a fondo el comportamiento de la fibra y su mecanismo para evitar el spalling.

Respecto a la longitud más adecuada de la fibra existe una mayor controversia. Algunos como Savaranta et al. (26) y Savaranta y Mikkola (27), (28) no advirtieron diferencias entre el uso de distintas longitudes de fibras. Sin embargo, Bentz (29) mostró en un estudio numérico, que las fibras más largas eran más eficientes.

# 3 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

---

## 3.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo del proyecto es medir las propiedades residuales del H.A.R. El término “residual” hace referencia a que la medida de dicha energía se hará una vez que las probetas hayan sido enfriadas y se encuentren de nuevo a temperatura ambiente.

En el presente bloque se explica el proceso de fabricación del H.A.R. partiendo de una dosificación dada obtenida por mi compañera de laboratorio Ana Alba Cruz. A dicha dosificación se le añadirán posteriormente dos tipos de fibras, unas de longitud igual a 6 mm y otras de longitud igual a 24 mm. Por esta razón, en el presente proyecto se estudian tres tipos de hormigones: hormigón sin fibras (D0), hormigón reforzado con fibras de 6 mm (D1), y hormigón reforzado con fibras de 24 mm (D2).

## 3.2 MATERIALES

A continuación se exponen los materiales que conforman el hormigón de alta resistencia:

- Cemento: Se utiliza cemento tipo Portland CEM II/B-L 32,5 N, cedido por la empresa Cementos Portland Valderrivas. El cemento tipo II se usa cuando hay ataque moderado de sulfatos, como en estructuras de drenaje. Genera menos calor de hidratación y más despacio que el tipo I, se puede usar para grandes pilas, muros gruesos de contención, etc., es adecuado para climas cálidos, pues no genera mucho calor de hidratación.



Ilustración 3.1: Cemento Portland CEM II/B-L 32.5 N

- Agua: Se utiliza el agua del sistema de riego. No existen restricciones en el tipo del agua, con la salvedad del agua marítima, que no resulta adecuada en el caso de hormigones de alta resistencia.
- Áridos: Se han utilizado tres tipos de áridos para conformar la mezcla: Grava, arena silícea y arena caliza.

A continuación se exponen las tablas y gráficas granulométricas.

Para la grava no se expone granulometría, ya que se ha tomado un tamaño uniforme comprendido entre los tamices UNE de 2 y 10 mm. Para el tamizado de la grava se utilizó una tamizadora de tres salidas, expuesta en la siguiente ilustración.



Ilustración 3.2: Tamizadora de Grava (tamices de 2 y 10 mm)

Tabla 1: Granulometría Arena Silícea

ARENA SILÍCEA		
TAMIZ (mm)	% PASA	% RETENIDO
2	99.83	0.17
1	96.17	3.67
0.5	61.33	34.83
0.25	15	46.33
0.125	2	13
0.063	0.17	1.83
FONDO	0	0.33

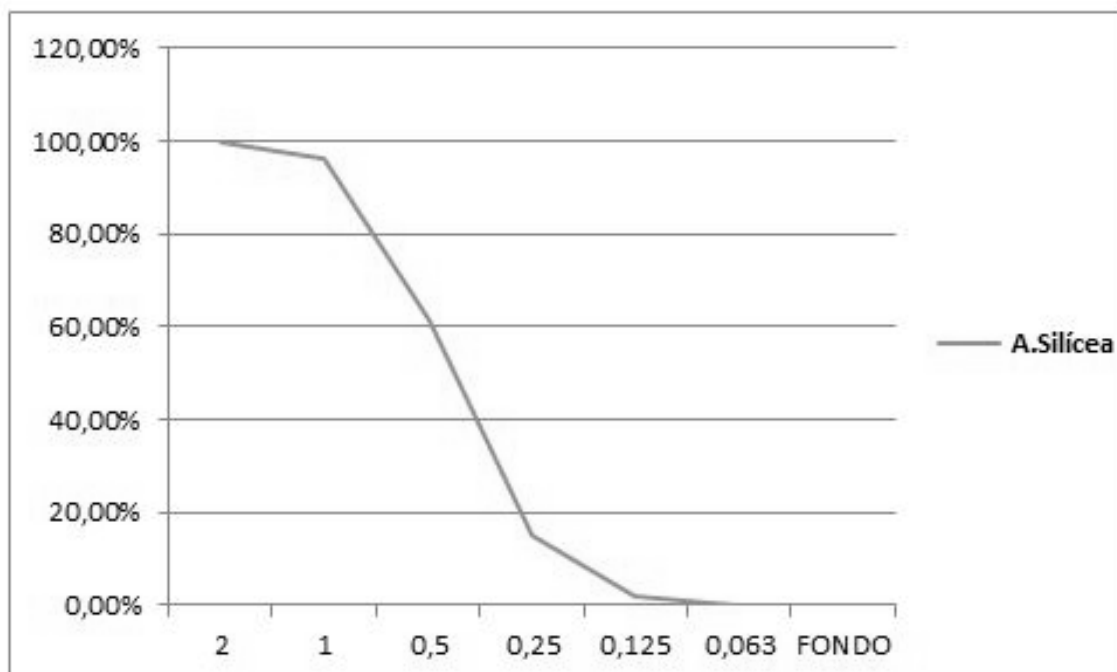


Ilustración 3.3: % PASA – Arena Silíceo

Tabla 2: Granulometría Arena Caliza

ARENA CALIZA		
TAMIZ (mm)	% PASA	% RETENIDO
2	88.5	11.5
1	62	26.5
0.5	41	21
0.25	23.67	17.33
0.125	11.67	12
0.063	2.5	9.17
FONDO	0	2.33

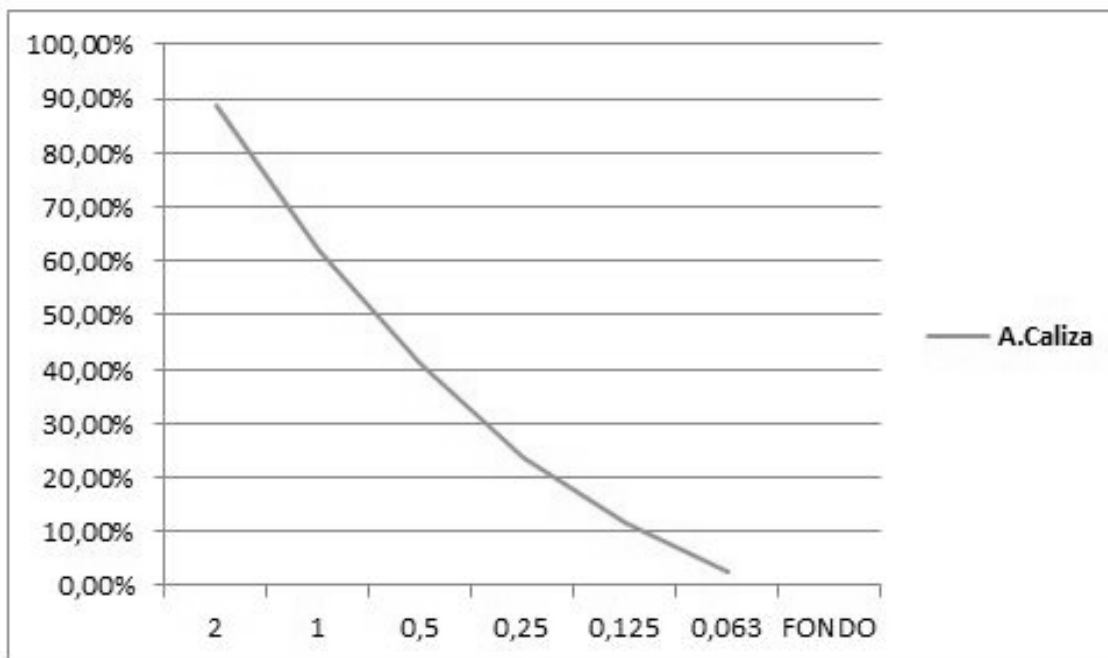


Ilustración 3.4: % PASA – Arena Caliza

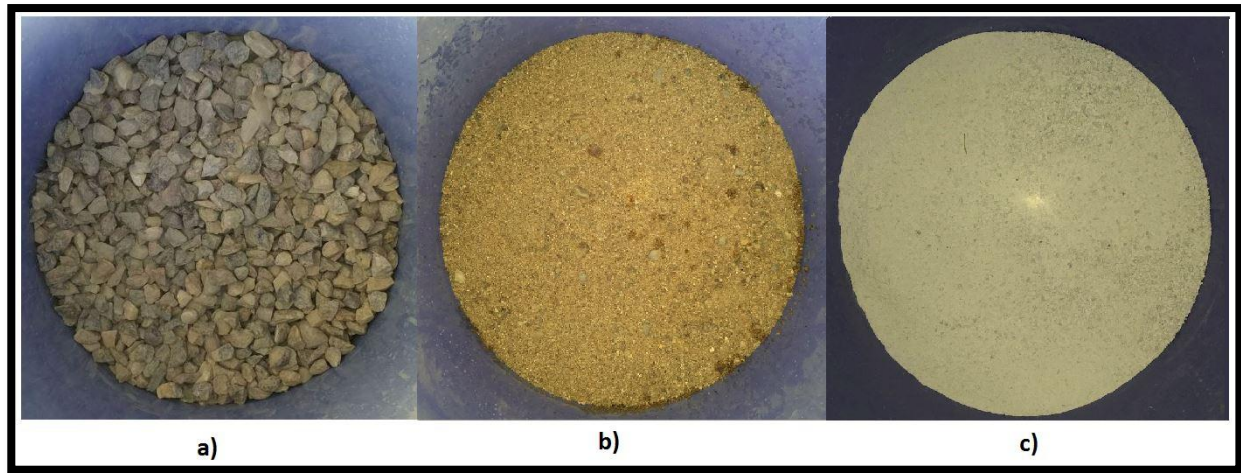


Ilustración 3.5: a) Grava. b) Arena Caliza. c) Arena Silíceá

- Superplastificante: Se ha utilizado el superplastificante de la marca Sika Viscocrete 20 HE.

**Sika Viscocrete 20 HE**  
SUPERPLASTIFICANTE DE ALTO RENDIMIENTO

**PESO: 25 Kg**      **LOTE:19X020314-1**

USO: Especialmente adaptada para la confección de hormigones de altas resistencias iniciales, hormigones con gran necesidad de reducción de agua y de muy alta fluidez... (text continues describing benefits like reduced water, increased strength, and ease of use).

**Datos Técnicos:**  
 Tipo: Policarboxilato modificado en base acuosa.  
 Aspecto: Líquido poco viscoso color miel.  
 Densidad: Aprox. 1,085 gr/ cm3  
 Contenido en sólidos: Aprox. 40 %  
 pH: Aprox. 4,5

**Usos:**  
 El SIKA VISCOCRETE 20 HE se utiliza en la confección de hormigones de altas prestaciones en prefabricación, obras y en centrales de hormigón elaborado. Los hormigones tratados con SIKA VISCOCRETE 20 HE se caracterizan por su baja relación a/c, una fluidez elevada, así como una cohesión óptima y una gran facilidad de autocompactación. La importante reducción de agua unida a la elevada fluidez dan lugar a hormigones de muy alta calidad. El SIKA VISCOCRETE 20 HE se utiliza en:  
 - Prefabricación.  
 - Pavimentos fast-track.  
 - Muros con encofrados deslizantes.  
 - Hormigones con una gran reducción de agua.  
 - Hormigones de altas prestaciones.  
 - Hormigones de altas resistencias iniciales.

**Sika Viscocrete 20 HE**  
Superplastificante de alto rendimiento para hormigones

**Descripción**  
El SIKA VISCOCRETE 20 HE es un superplastificante de altas prestaciones para hormigones.

**Ventajas**  
El SIKA VISCOCRETE 20 HE combina diferentes mecanismos de acción. La adsorción en la superficie de los finos así como su mejor dispersión durante el proceso de hidratación producen los siguientes efectos:  
 ● Pronunciada aptitud de autocompactación. Se utiliza en hormigones autocompactables.  
 ● Reducción muy importante de agua de amasado dando hormigones de altas resistencias y gran impermeabilidad.  
 ● Altas resistencias iniciales.  
 ● Disminución de la fluencia y retracción.  
 ● Retarda los efectos de carbonatación del hormigón.  
 El SIKA VISCOCRETE 20 HE no contiene cloruros ni sustancias que puedan provocar o favorecer la corrosión del acero y por lo tanto puede utilizarse sin restricciones en hormigones armados o pretensados.

Ilustración 3.6: Etiqueta y Características del Superplastificante Sika Viscocrete 20 HE

- Microsílice o humo de sílice: se utiliza el humo de sílice del tipo

Es una adición mineral que aporta funciones beneficiosas al hormigón (Disminuye porosidad, aumenta la resistencia, mejora la trabajabilidad, etc.).

Tabla 3: Propiedades del Humo de Sílice

PROPIEDADES	DESCRIPCIÓN
Aspecto Físico	Polvo Color Grisáceo
Densidad Rea, 20 °C	2.1 – 2.4 g/cm <sup>3</sup>
Contenido SiO <sub>2</sub>	Aprox. 90%
Superficie Específica	15000 – 20000 m <sup>2</sup> /g
Granulometría	90% < 0.0001 mm
Cloruros	< 0.1%
Solubilidad en Agua	Nula

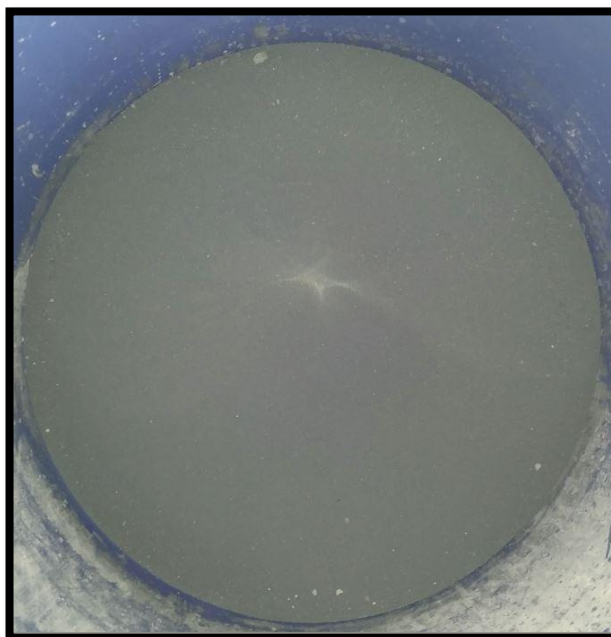


Ilustración 3.7: Humo de Sílice



- Fibras de Polipropileno: Se utilizan fibras de dos longitudes (6 y 24 mm), ambos productos de GEOTEXAN.

Sus principales propiedades se exponen en la tabla que se adjunta a continuación.

Tabla 4: Propiedades Fibras de Polipropileno

Denominación	Espesor(dtex)	Longitud(mm)	Tenacidad(cN/tex)	Elongación (%)
G2A	8.9	6	50	75
G2C	8.9	24	50	75

Como se puede observar en la tabla, las propiedades de ambas fibras son iguales, exceptuando la longitud. Esto nos permitirá estudiar la influencia de la longitud de la fibra en el hormigón.



Ilustración 3.8: Comparación tamaño de fibras (6 y 12 mm)

### 3.3 DOSIFICACIÓN

El proyecto presente, es la continuación de un proyecto fin de carrera (proyecto de Ana Alba Cruz), en el que se detallan los pasos que se siguieron para llegar a la dosificación aquí expuesta.

El proceso de obtención de la dosificación no fue fácil, ya que además de obtener un hormigón de alta resistencia, éste debía ser también autocompactante.

Finalmente, y tras las numerosas pruebas y ensayos, se tomó la siguiente dosificación (tabla 6) como dosificación final.

Tabla 5: Dosificación Final del Hormigón

MATERIAL	PESO (Kg)
Grava	47.4
Arena Silíceo Fina	31.6
Arena Caliza	5
Cemento	24
Humo de Sílice	3.6
Superplastificante	0.96
Agua	6.638

### 3.4 PREPARACIÓN DE LOS MOLDES

Para los ensayos hay que realizar tres tipos de probetas, prismáticas, cúbicas y cilíndricas. Las probetas prismáticas presentan unas dimensiones de 218x48x48 mm y las cúbicas de 48x48x48 mm.

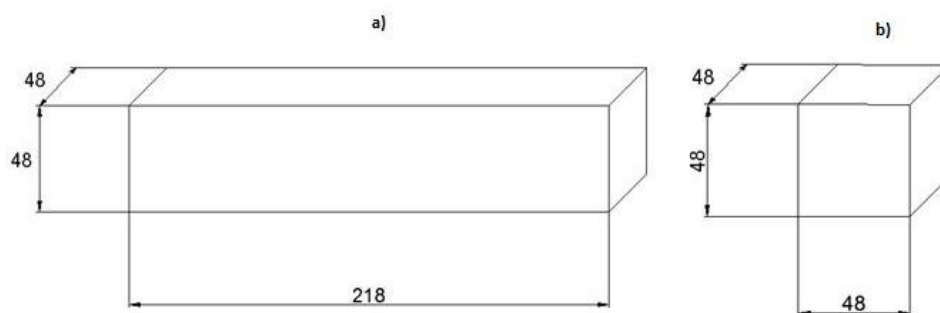


Ilustración 3.9: Dimensión de las Probetas. a) 218x48x48 mm. b) 48x48x48 mm

Se toman estas dimensiones debido al alto número de probetas necesarias para realizar los ensayos.

Temperatura (°C)	Tiempo de exposición (horas)	Dosificación								
		D0			D1			D2		
		Prismática	cúbica	brasileño	Prismática	cúbica	brasileño	Prismática	cúbica	brasileño
Ambiente	-	3	3	1	3	3	1	3	3	1
100	6	2	2	1	2	2	1	2	2	1
	24	2	2	1	2	2	1	2	2	1
	48	2	2	1	2	2	1	2	2	1
	Enfriamiento	2	2	1	2	2	1	2	2	1
200	6	2	2	1	2	2	1	2	2	1
	24	2	2	1	2	2	1	2	2	1
	48	2	2	1	2	2	1	2	2	1
	Enfriamiento	2	2	1	2	2	1	2	2	1
300	6	2	2	1	2	2	1	2	2	1
	24	2	2	1	2	2	1	2	2	1
	48	2	2	1	2	2	1	2	2	1
	Enfriamiento	2	2	1	2	2	1	2	2	1
500	6	2	2	1	2	2	1	2	2	1
	24	2	2	1	2	2	1	2	2	1
	48	2	2	1	2	2	1	2	2	1
	Enfriamiento	2	2	1	2	2	1	2	2	1
700	6	2	2	1	2	2	1	2	2	1
	24	2	2	1	2	2	1	2	2	1
	48	2	2	1	2	2	1	2	2	1
	Enfriamiento	2	2	1	2	2	1	2	2	1
Total probetas		43	43	21	43	43	21	43	43	21

Ilustración 3.10: Planificación del número de probetas para los ensayos a realizar

Las dimensiones tomadas (218x48x48 y 48x48x48) no son las de los moldes presentes en el laboratorio, de dimensiones prismáticas 440x100x100. Contando con los 4 mm de espesor de la sierra, de cada molde prismático se obtendrán 8 probetas prismáticas y 32 probetas cúbicas. Se cuenta en el laboratorio con 9 moldes prismáticos, por lo que se cumple perfectamente con una amasada por dosificación la demanda de probetas.

Para las probetas cilíndricas si tenemos los moldes necesarios. Estos presentan unas dimensiones de 100 mm de radio y 200 mm de altura.

En resumen, para la obtención de las probetas hay que realizar los siguientes pasos:

1. Preparación de los moldes.
  - 1.1 Limpiado de moldes con aceite.
  - 1.2 Cubrir los moldes con desencofrante.



Ilustración 3.11: Molde cubierto de desencofrante

## 2. Hormigonado.



Ilustración 3.12: Hormigonado

## 3. Relleno de moldes.



Ilustración 3.13: Relleno de Moldes Nivelados

## 4. Fraguado Inicial.

## 5. Desencofrado.

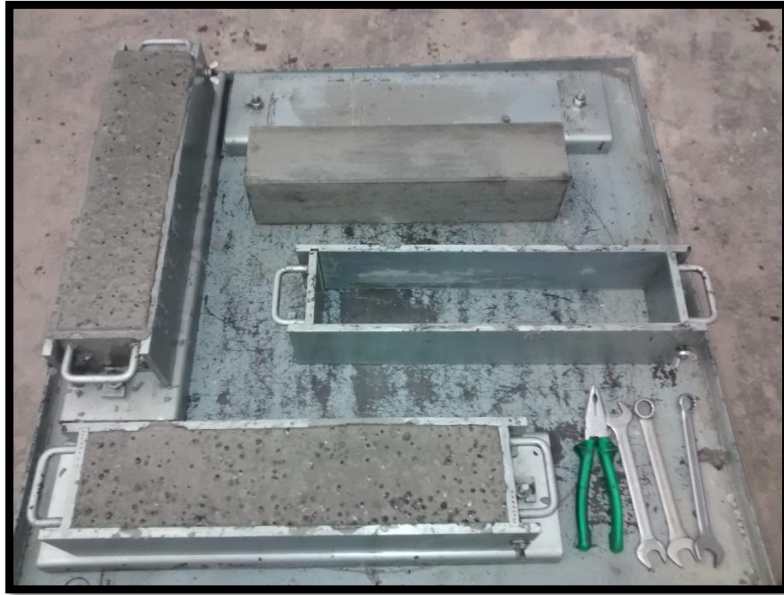


Ilustración 3.14: Desencofrado de las Probetas de Hormigón

## 6. Introducción probetas en tanque de agua para fraguado final.



Ilustración 3.15: Fraguado del Hormigón

## 7. Preparación de los moldes.



7.1 Limpiado moldes.

7.2 Montaje moldes.

7.3 Cubrir los moldes con desencofrante.

Ilustración 3.16: Limpieza de Moldes

Estos pasos se repiten para cada amasada. Una vez endurecidas, se procede al corte de las probetas y la realización de la entalla.

Para el caso de las probetas cilíndricas se siguen los mismos pasos mencionados, la única diferencia es que no será necesario cortarlas.

## 3.5 METODOLOGÍA DEL HORMIGONADO

Para el proceso de hormigonado se ha seguido un protocolo igual para D0, D1 y D2 (sin fibras, fibras 6 mm y fibras 24 mm). Los pasos seguidos son los siguientes:

- Secado del Árido. La arena gruesa tenía demasiada humedad por lo que hubo que secarla. Para ello se siguieron dos procedimientos. El primero consistió en el secado mediante una sartén y una estufa. Este procedimiento era demasiado lento, lo que nos llevó a utilizar el segundo procedimiento. Este consistió en colocar la arena encima de una chapa Grecada y dejarla secar al sol.
- Tamizado de la Grava. Mediante el tamizado se eliminaron la grava gruesa y los finos para conseguir una grava más uniforme de mejor calidad.



Ilustración 3.17: Tamizado de la Grava

- Pesar las cantidades de los componentes que conformarán el hormigón. Se toman las medidas utilizando dos tipos de básculas, una de tres decimales de precisión para el peso de las pequeñas cantidades, y otra de un decimal de precisión para el peso de las grandes cantidades.



Ilustración 3.18: Pesado de los Elementos

- Limpiar la hormigonera y dejarla secar.
- Verter los materiales en la hormigonera. Este proceso tiene un orden concreto. Primero se vierten los dos tipos de arena y la grava, dejándolos girar hasta que se homogenicen (1ª fase).

Luego se introducen el humo de sílice y el cemento y posteriormente la mezcla de agua, superplastificante y fibras (2ª fase). Se deja girar la mezcla aproximadamente 10 minutos.



Ilustración 3.19: Mezclado de los Materiales. 1º Fase (Izq). 2ª Fase (Der)

- Rellenar las probetas. Mediante palas y palustres se rellenan los moldes y se colocan sobre una superficie nivelada. Es importante esto último, ya que si los moldes no se encuentran horizontales, en la cara superior de la probeta se origina un desnivel. Como el hormigón es autocompactante, no es necesaria la compactación.



Ilustración 3.20: Relleno de Moldes



- Transcurridas 24 h se procede a desmontar las probetas.



Ilustración 3.21: Desencofrado

- Curado del Hormigón. Para terminar, se introducen las probetas dentro del tanque de curado durante 28 días.



Ilustración 3.22: Curado del Hormigón

Una vez transcurridos los 28 días, las probetas ya estarán preparadas para realizar los ensayos pertinentes.

### 3.6 CORTE DE LAS PROBETAS Y REALIZACIÓN DE LA ENTALLA

Para conseguir el tamaño de probetas 218x48x48 mm es necesario como ya se ha mencionado, cortar las probetas originales de tamaño 440x100x100 mm. Para ello se utiliza una máquina rotaflex con un disco de 4 mm de espesor.

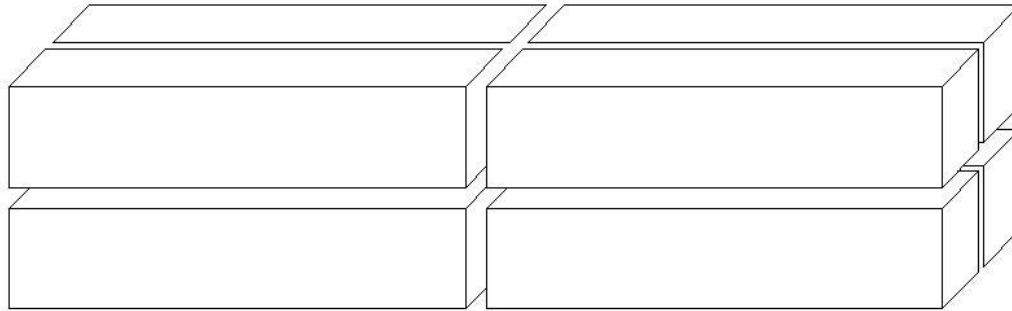


Ilustración 3.23 Corte de Probeta Original en Ocho Probetas 218x48x48 mm



Ilustración 3.24: Máquina de corte. Modelo Bali Mekano. Empresa Simasa



Ilustración 3.25 Probeta Prismática Entallada de dimensiones 218x48x48 mm

Las probetas cúbicas de 48x48x48 mm se obtendrán de las prismáticas ya cortadas, obteniéndose 4 probetas de cada una.

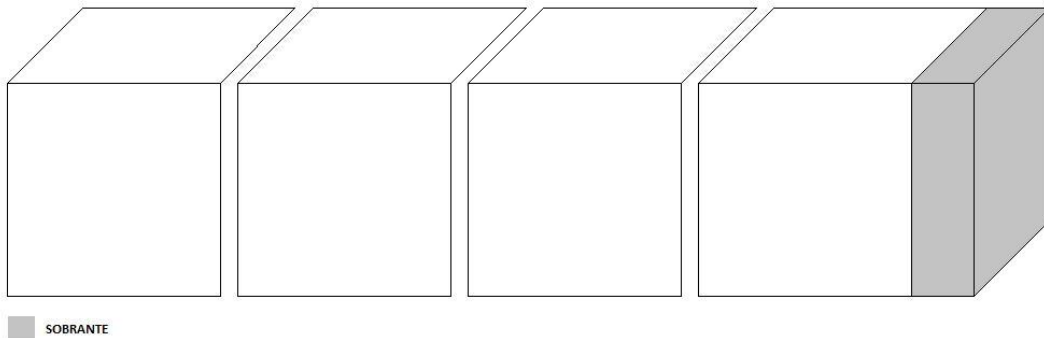


Ilustración 3.26: Corte Probeta 218x48x48mm en Cuatro Probetas de 48x48x48 mm

Una vez obtenidas las probetas, hay que realizarles las entallas. Para ello, lo primero, es el posicionamiento de la cuchilla. La distancia desde la plataforma de la máquina donde descansa la probeta al punto más bajo del filo de la cuchilla tiene que ser igual al ancho de la probeta menos la profundidad de la entalla.

A continuación se pone en marcha la máquina y se refrigera con agua, hasta realizar la entalla de 4 mm de espesor. Por último se comprueba la medida con un calibre



# 4 ENSAYOS

## 4.1 INTRODUCCIÓN

Cuando las probetas alcanzan un mínimo de 28 días de edad, ya se puede pasar al calentamiento en el horno. Mi proyecto consiste en estudiar el comportamiento en frío del hormigón (propiedades residuales), es decir, medir las propiedades del hormigón después de haber sido sometido el hormigón a 48 horas de calentamiento en el horno a diferentes temperaturas (100, 300 y 500 °C) y haberlo dejado posteriormente enfriar.

Una vez enfriadas, ya se pueden ensayar en la máquina servo hidráulica. Los ensayos realizados son: ensayo a flexión en tres puntos, ensayo a compresión simple de probetas cúbicas y ensayo a compresión simple de probetas cilíndricas con anillos transductores. El ensayo brasileño no fue realizado por mi persona, por esta razón no se enuncia en mi proyecto.

A continuación, en este bloque, se describe toda la metodología seguida para la preparación, control y realización de los ensayos.

## 4.2 ENSAYO DE FLEXIÓN EN TRES PUNTOS

Una vez se han extraído las probetas del horno, después de haber sido calentadas durante 48 horas, se dejan enfriar. Cuando las probetas estén frías, ya se puede pasar a la realización del ensayo de flexión en tres puntos.



Ilustración 4.1: Máquina servo hidráulica modelo ME 406/15 marca Servosis

En primer lugar se describe la máquina con la que se va a realizar el ensayo. Nuestra máquina es una máquina servo hidráulica modelo ME 406/15 de la marca Servosis con capacidad de carga de 20 kN (Ver ilustración 4.1).

Su eje inferior es fijo, mientras que el superior es móvil y es el que aplica la carga en el centro de la probeta. El eje superior tiene que aproximarse hasta que contacte con la probeta antes de comenzar el ensayo, para así poder obtener una gráfica carga-desplazamiento más adecuada y de manera más rápida. El eje inferior consta de una placa fija con dos apoyos de rodillos donde se apoya la probeta.



Ilustración 4.2: Ensayo de flexión en tres puntos.

La máquina va conectada a un ordenador desde el que se controlan los parámetros que se quieren medir y la manera de realizar el ensayo (ensayo con control en carga o ensayo con control en desplazamiento). En nuestro caso se realiza el control del ensayo en desplazamiento en el cilindro (Pc) 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. En nuestro caso se han creado 4 fases para controlar el ensayo. 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.



Ilustración 4.3: Generador de funciones (PCD 2k)

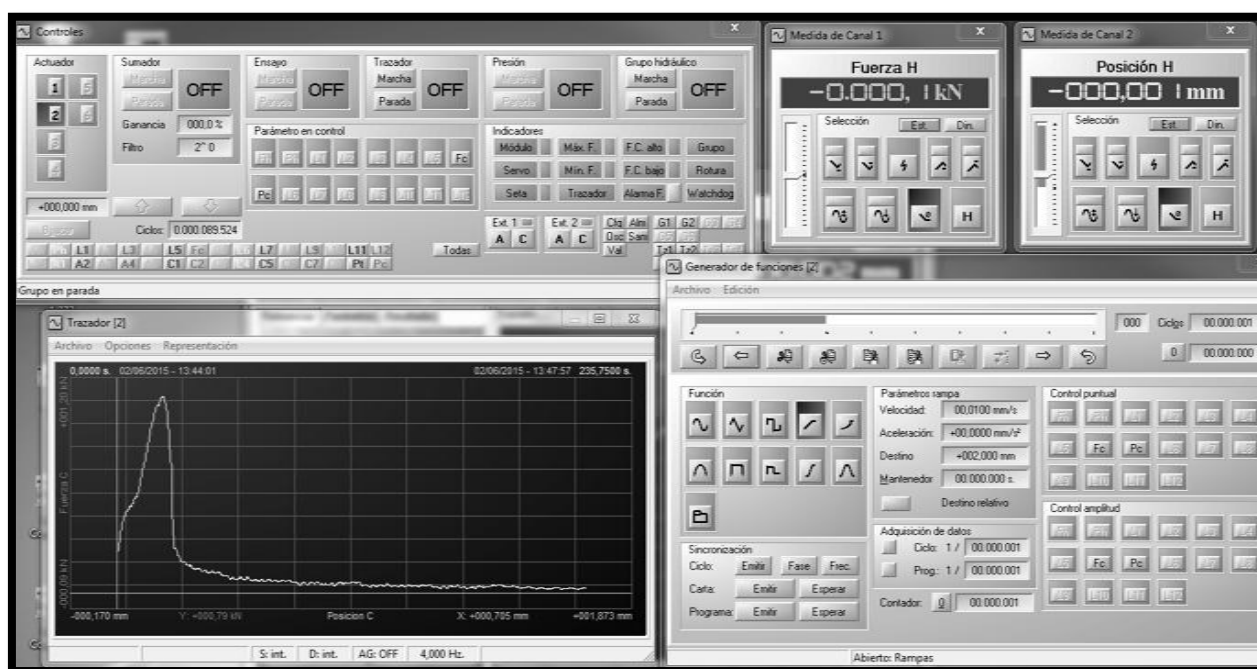


Ilustración 4.4: Controles, Media de Canal 1 y 2, Trazador y Generador de Funciones (PCD 2k)

En lo que respecta a las condiciones de contorno del ensayo, la probeta se encuentra apoyada sobre dos rodillos que permiten el deslizamiento. Al permitirse dicho deslizamiento, la zona traccionada se encuentra en un estado de flexión puro, que es el buscado para este ensayo. En caso contrario, si los rodillos no permitiesen el deslizamiento entre ellos, se producirían tensiones de compresión en la cara inferior de la probeta, por lo que las tracciones en esos puntos no se corresponderían a las de flexión pura.

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

Falta por describir el tercer apoyo, de ahí el nombre del ensayo, flexión en tres puntos. El apoyo superior es el móvil. Tiene forma de cilindro pero la base que toca la probeta es una semiesfera.

En los dos apoyos inferiores, 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.



Ilustración 4.5: Condiciones de Contorno Ensayo Flexión en tres puntos

Como se ha mencionado antes, la máquina de ensayos dispone de un programa informático instalado en el ordenador de control. Este programa trata y almacena la señal que recibe de los diferentes canales de medida. El programa utilizado se denomina PCD 2k. Las principales ventanas que posee este programa son las de generación de funciones, trazador, configuración de trazador, control y alarmas. En la configuración del trazador es posible configurar el número de puntos que se van a tomar en cada ensayo y cada cuanto tiempo se va a realizar el muestro. Para poder trabajar de manera más cómoda con las tablas de los resultados obtenidos, se toma un número de puntos no muy elevado, de aproximadamente 5 puntos por segundo.





Ilustración 4.6: Panel de control Servosis para máquina de F3P y de compresión uniaxial

Existen dos canales de entrada que miden las siguientes señales con los siguientes elementos de medición:

- Canal 1: Fuerza (kN) – Célula de carga.
- Canal 2: Posición del pistón (mm) – Actuador de la máquina.



Ilustración 4.7: Canales, salidas/entradas, auxiliares y parada de emergencia

Con la ventana de control es posible aproximar el apoyo superior antes de comenzar el ensayo y decidir bajo que señal se realiza la aproximación. La ventana de alarmas, se puede configurar para que

no se sobrepasen una serie de limitaciones previamente establecidas. El apoyo superior se aproxima hasta justo antes de que empiece a cargarse la probeta. Una vez realizado esto, el ensayo ya está preparado para comenzar.

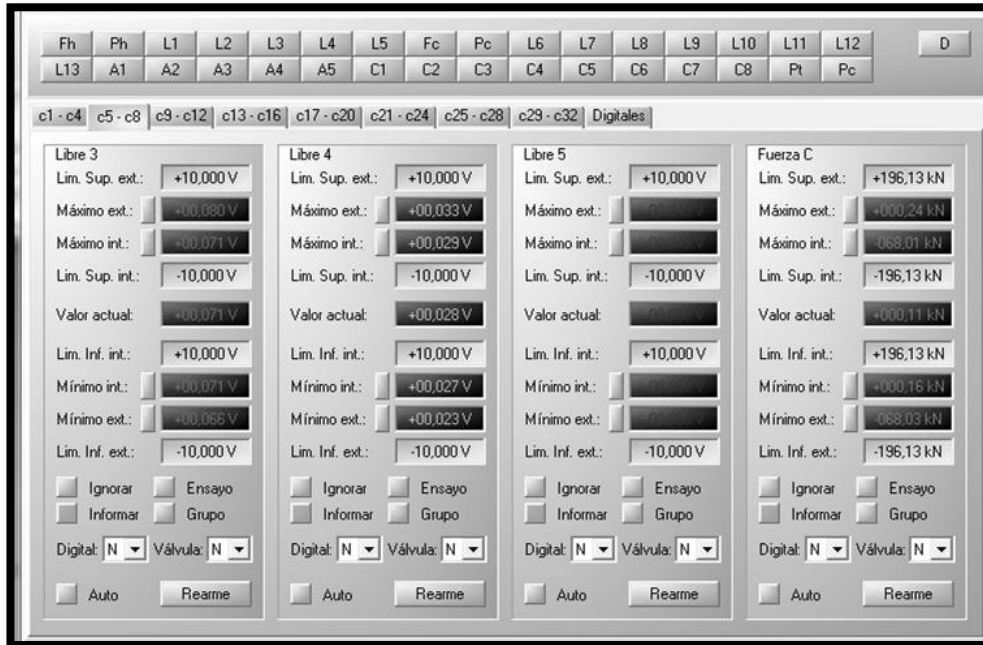


Ilustración 4.8: Ventada de Alarmas (PCD 2k)

Por último, hay que tener en cuenta que para el cálculo posterior de la energía de fractura, es necesario conocer el área de la zona de ligamento. Para ello, una vez que se ha roto la probeta, medimos con el calibre el canto ( $d$ ) y el ancho de la zona de ligamento ( $a$ ).

$$G_F = \frac{W_F}{A_{lig}} ; A_{lig} = d \times a$$

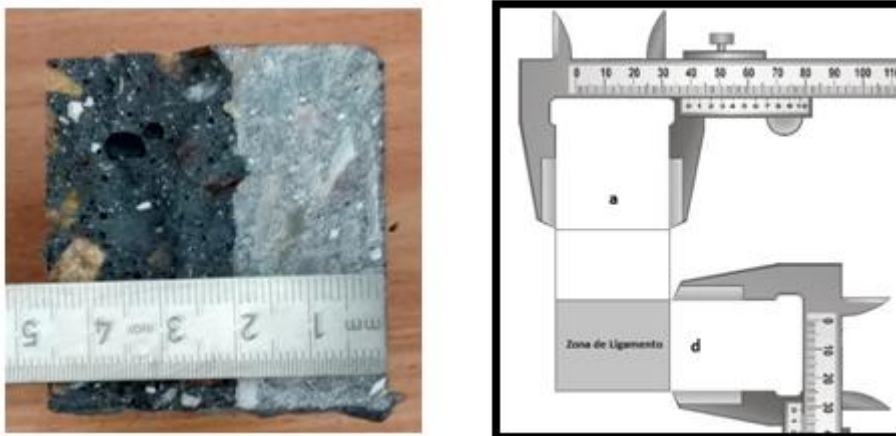


Ilustración 4.9: Toma de medida del área de ligadura

### 4.3 ENSAYO EN COMPRESIÓN UNIAXIAL

Este ensayo se realiza mediante la utilización de una prensa hidráulica Servosis modelo MES 300 (ver ilustración 4.10). Su objetivo es la determinación del valor de pico de la resistencia a compresión ( $f_c$ ) y el control se realizal en carga.



Ilustración 4.10: Prensa hidráulica Servosis modelo MES 300

En este proyecto se estudian las propiedades residuales del hormigón y por lo tanto solo se necesitan ensayar las probetas una vez enfriadas, es decir, un total de 18 probetas, ya que ensayamos dos probetas para cada dosificación (D0, D1 Y D2) y temperatura (100, 300 y 500).

Cada probeta cúbica (48x48x48 mm) se sitúa en el centro de la placa fija (placa inferior) y se le coloca en su parte superior un elemento que ayuda a corregir los desperfectos y desniveles que puedan tener las probetas (ver ilustración 4.11). Este elemento es necesario debido a que la transformación de las probetas originales de 440x100x100 en las probetas ensayadas, ha conllevado un gran número de cortes con la sierra, y por tanto, un gran número de desperfectos.



Ilustración 4.11: Elemento de ayuda para acople de la probeta

Una vez colocada la probeta adecuadamente, se aproxima la placa superior hasta que haga contacto con el elemento de ayuda para el acople del cubo.

Utilizando el programa PCD 2k, se abre la ventana de ensayo a compresión en hormigón. En ella se rellenan la pestaña de referencias adjuntando la fecha de fabricación, fecha de referencia y tipo de ensayo, y la pestaña de parámetros, adjuntando el tipo de probeta, lado, diámetro, peso, precarga y velocidad de precarga.

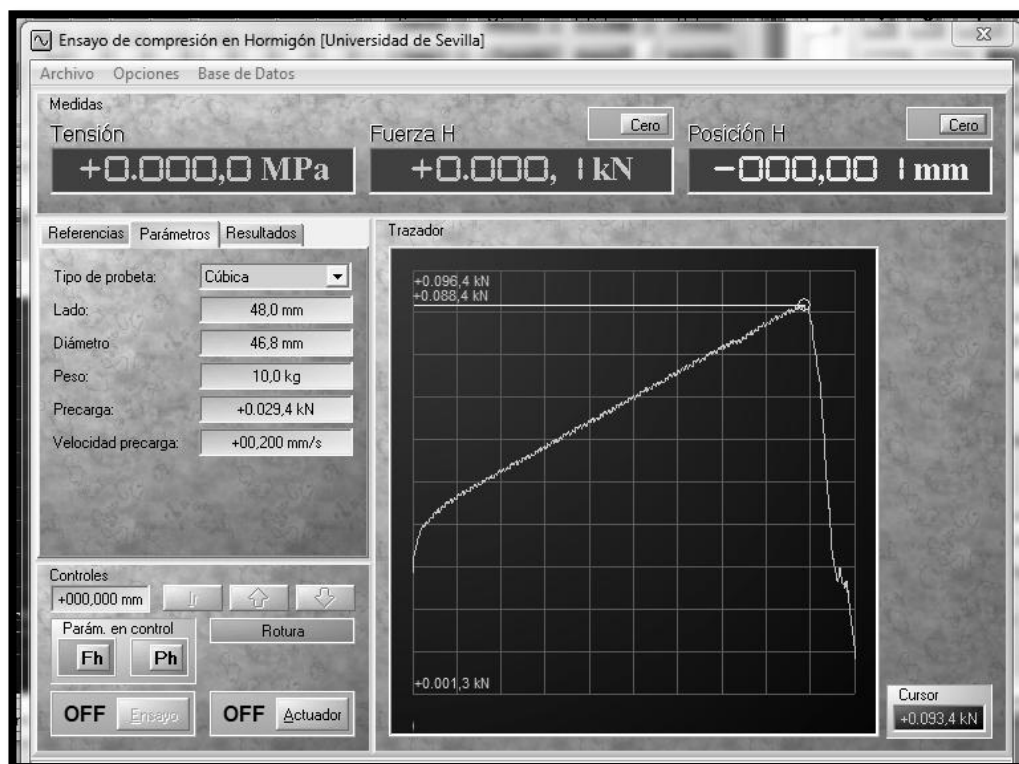


Ilustración 4.12: Pestaña de parámetros a introducir (PCD 2k)

Se colocan los controladores de Fuerza H y Posición H a cero y se inicia el ensayo. La tensión nos la va dando el programa en tiempo real, ya que se tiene la fuerza y se le ha introducido los parámetros para obtener el área de aplicación de la fuerza.

Una vez terminado el ensayo, se abre la pestaña de resultados (ver ilustración 4.13) y se obtiene la resistencia a compresión de la probeta ensayada (Tensión de Rotura).

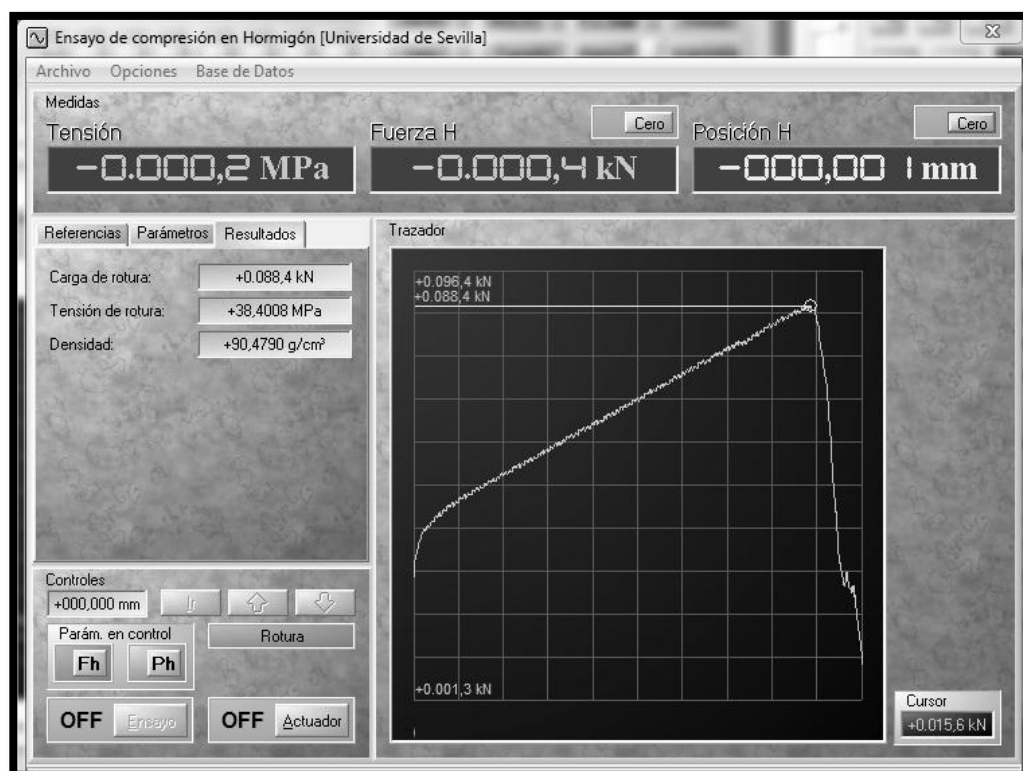


Ilustración 4.13: Pestaña de resultados (PCD 2k)

#### 4.4 ENSAYO EN COMPRESIÓN UNIAXIAL CON TRANSDUCTORES CILÍNDRICOS

Las pruebas en compresión uniaxial en control de carga sobre el hormigón (Fh) para la determinación del módulo elástico se han realizado con una prensa hidráulica Servosis modelo MES 300.

A fin de evaluar las deformaciones, se han usado dos transductores cilíndricos anclados a la probeta, de manera que se pueda medir el acortamiento de la probeta entre los dos transductores.

El control de los parámetros relativos a la ejecución de la prueba fue asignado a un programa automático conectado a la presa hidráulica vía ordenador: velocidad de aplicación de la carga, destino de la carga, tipo de función de ajuste, etc... Todos ellos se definen inicialmente y son datos de entrada de este programa (ver ilustración 4.14).

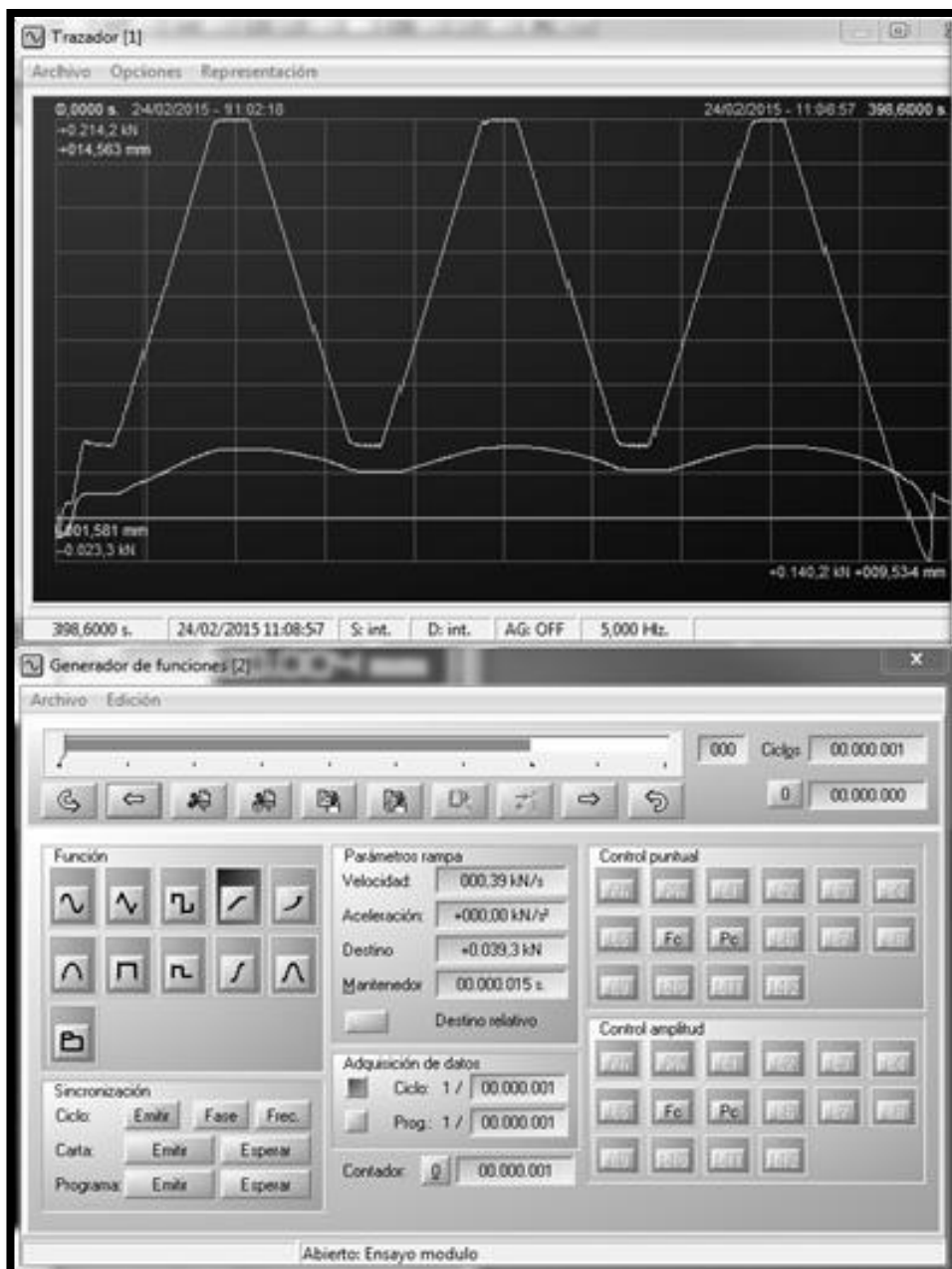
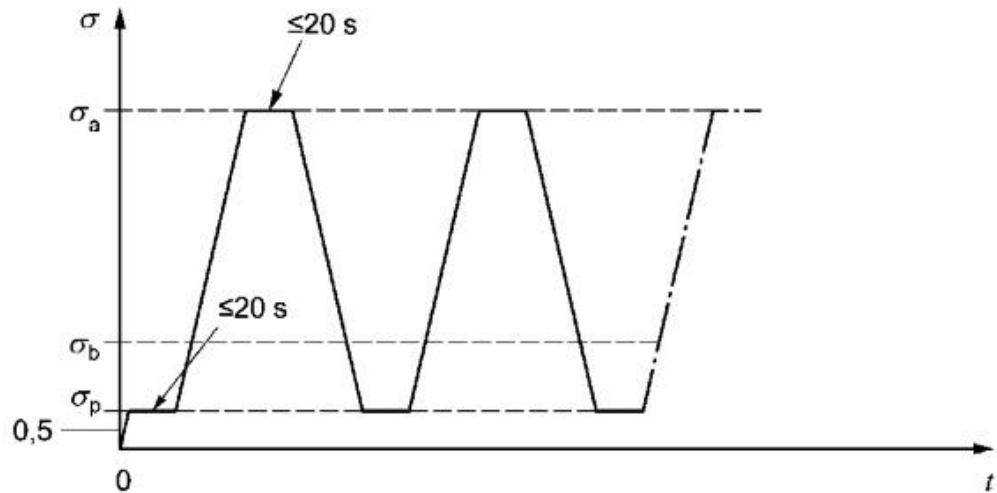


Ilustración 4.14: Trazador y generador de funciones (PCD 2k)

Según la normativa UNE-EN 12390-13 (2014), se debe medir la pendiente de la recta secante a la curva tensión-deformación tras los tres ciclos de carga, hallándose así el módulo de elasticidad secante.

En nuestro caso, se aplica el método B de la norma. Según este método se aplican tres ciclos, siendo al final del tercero cuando se mide el módulo secante de elasticidad estabilizado.



## Leyenda

—	ciclos de carga
- - -	ciclo de carga para la determinación del módulo secante de elasticidad estabilizado – Método B
$\sigma$	Tensión aplicada en MPa
$\sigma_a$	Tensión superior – $f_c / 3$
$\sigma_b$	Tensión inferior – $0,10 \times f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 \times f_c$
$\sigma_p$	Tensión de precarga – $0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$
$t$	Tiempo en s

Siendo el módulo secante de elasticidad estabilizado ( $E_{C,S}$ ):

$$E_{C,S} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_S} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_p^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2}}$$

$\sigma_a^m$ : Valor medido de la tensión superior.

$\sigma_p^m$ : Valor medido de la tensión de precarga.

$\varepsilon_{a,3}$ : Deformación media superior en el tercer ciclo.

$\varepsilon_{p,2}$ : Deformación media de precarga en el segundo ciclo.

# 5 RESULTADOS

---

## 5.1 INTRODUCCIÓN

A continuación, se expondrán los resultados obtenidos de los ensayos. Los resultados vienen recogidos en forma de tablas y gráficas.

En este bloque no se analizan los resultados, esta competencia recae sobre el siguiente apartado (bloque VI). Los resultados solo se expondrán de manera breve concisa y clara.

Los resultados recogidos conforman las propiedades residuales de fractura del hormigón y cada una se obtiene mediante un ensayo concreto. La energía de fractura se obtiene mediante el ensayo de flexión en tres puntos mientras que el módulo elástico estabilizado y la resistencia a compresión se obtienen mediante el ensayo a compresión uniaxial, utilizando en el caso de la obtención del módulo elástico estabilizado, dos transductores circulares anclados a la probeta.

En lo concerniente a la resistencia a tracción, ésta se obtiene a partir del ensayo brasileño, siendo por tanto la resistencia a tracción indirecta. Mediante dicha propiedad se obtiene también la longitud característica, parámetro muy interesante en el estudio del hormigón.

Como ya se ha mencionado en el bloque III, 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 residuales de fractura para las temperaturas de 100°C, 300°C y 500°C. Con el fin de poder realizar los estudios comparativos necesarios se añade los resultados a temperatura ambiente.



## 5.2 ENSAYO A FLEXIÓN EN TRES PUNTOS

### 5.2.1 CURVAS CARGA – DESPLAZAMIENTO

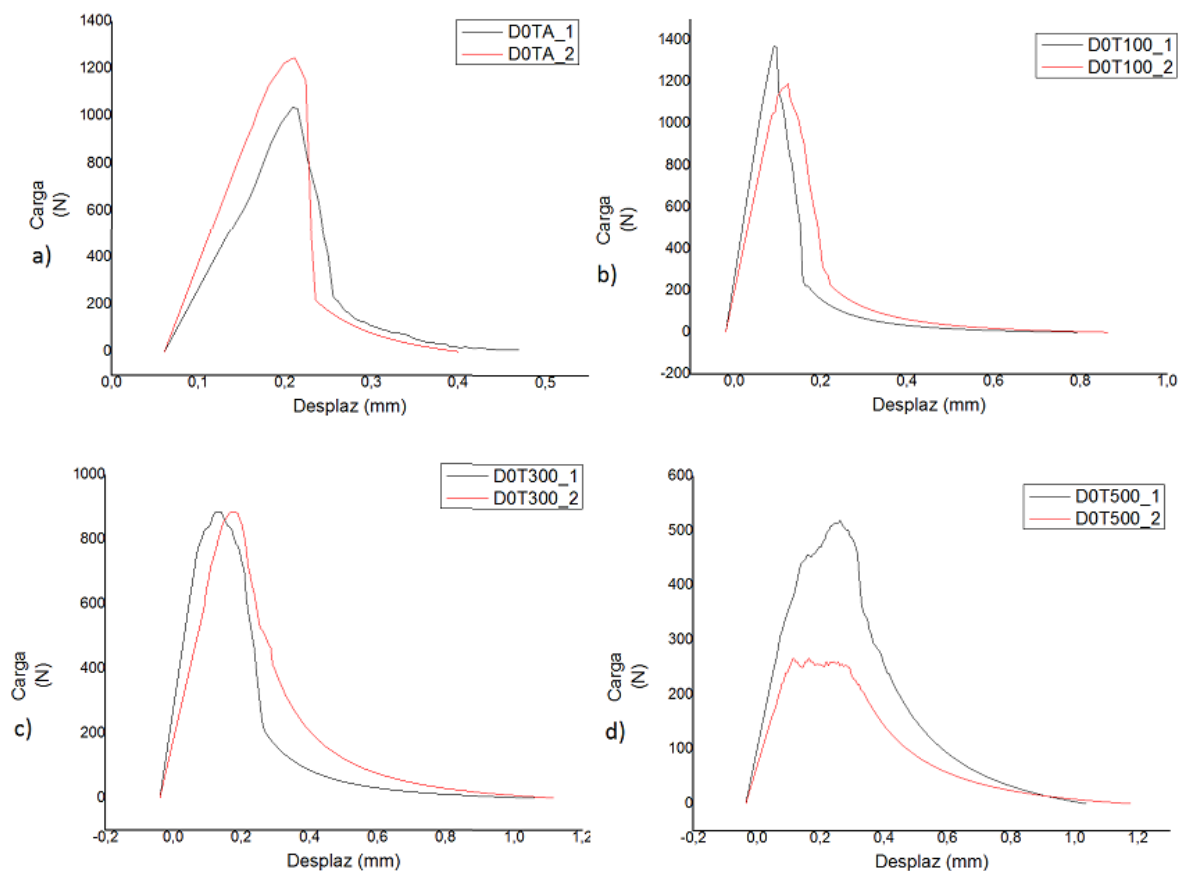


Ilustración 5.1: Hormigón sin fibras (D0)

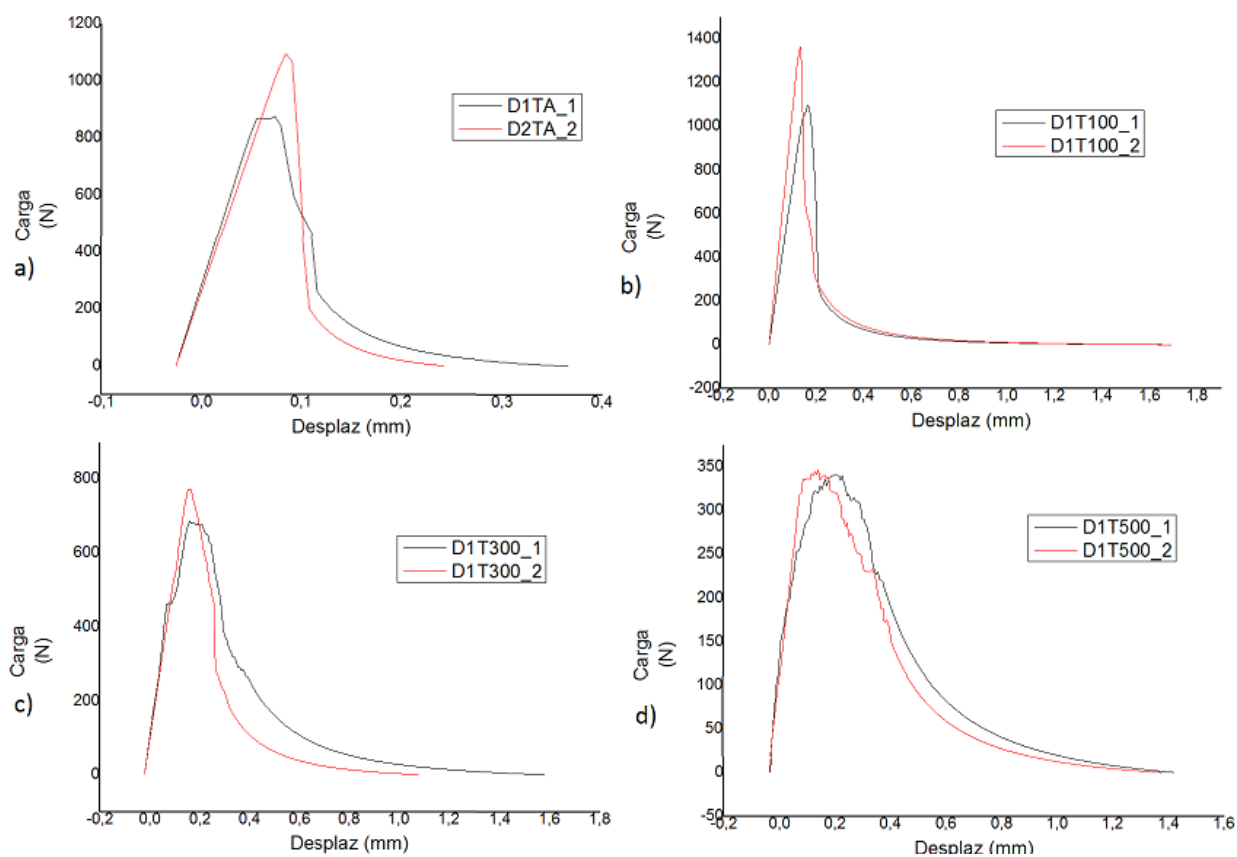


Ilustración 5.2: Hormigón con fibras de 6 mm (D1)

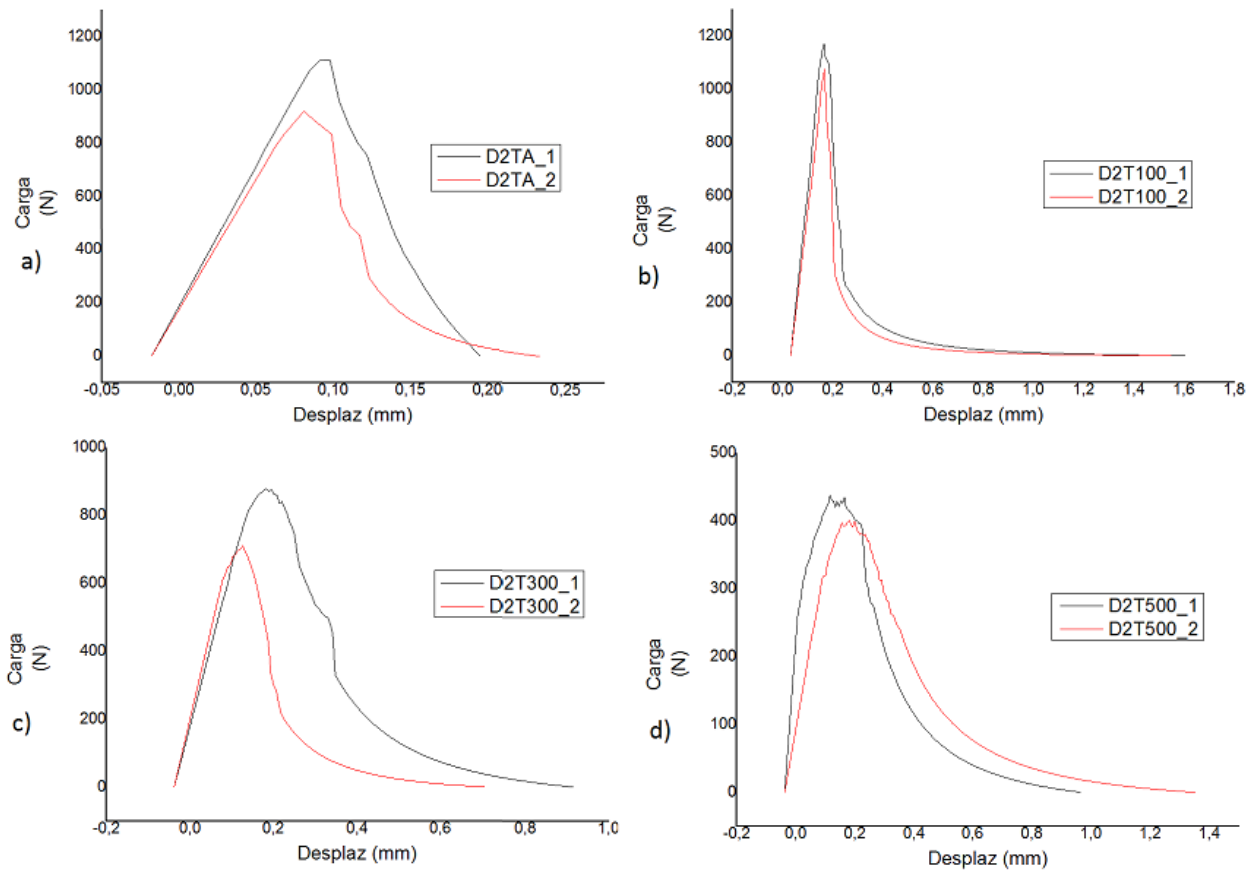
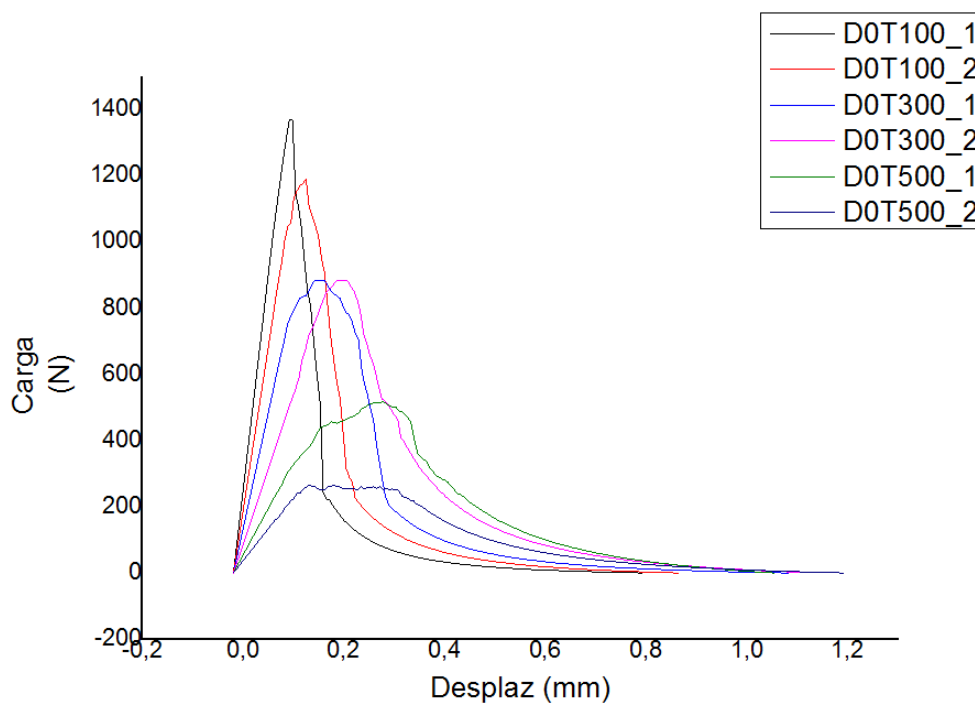
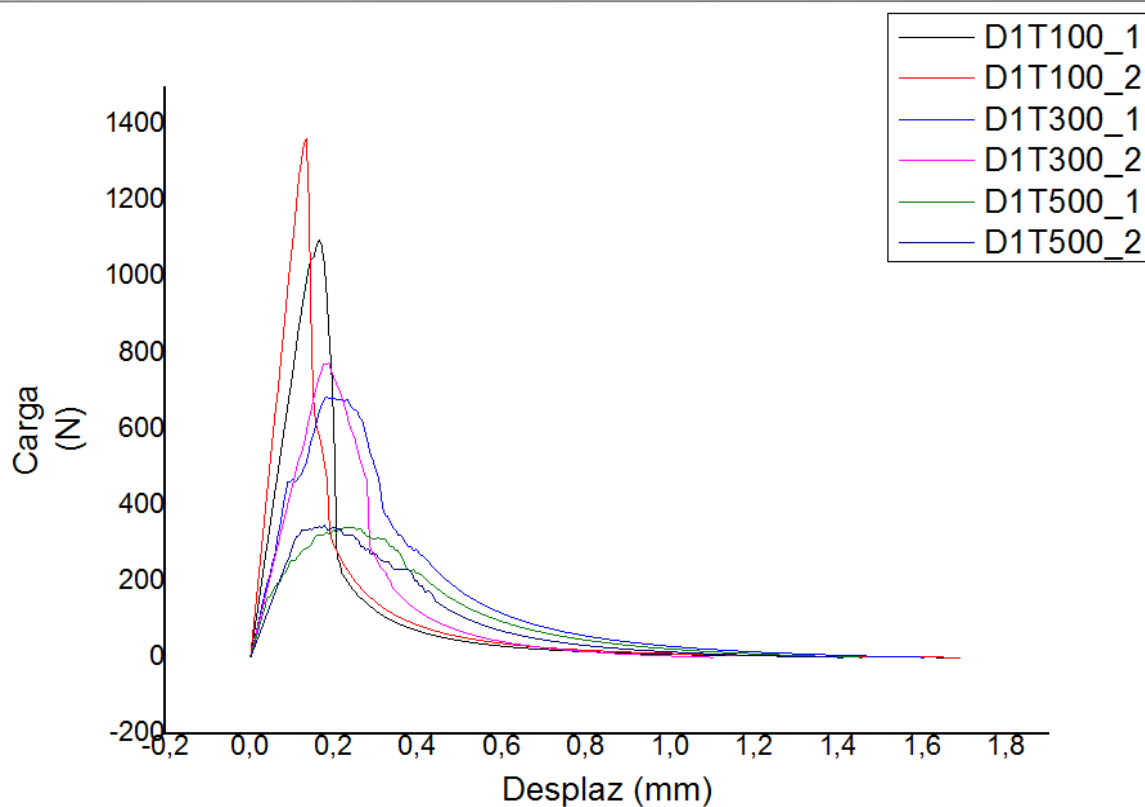
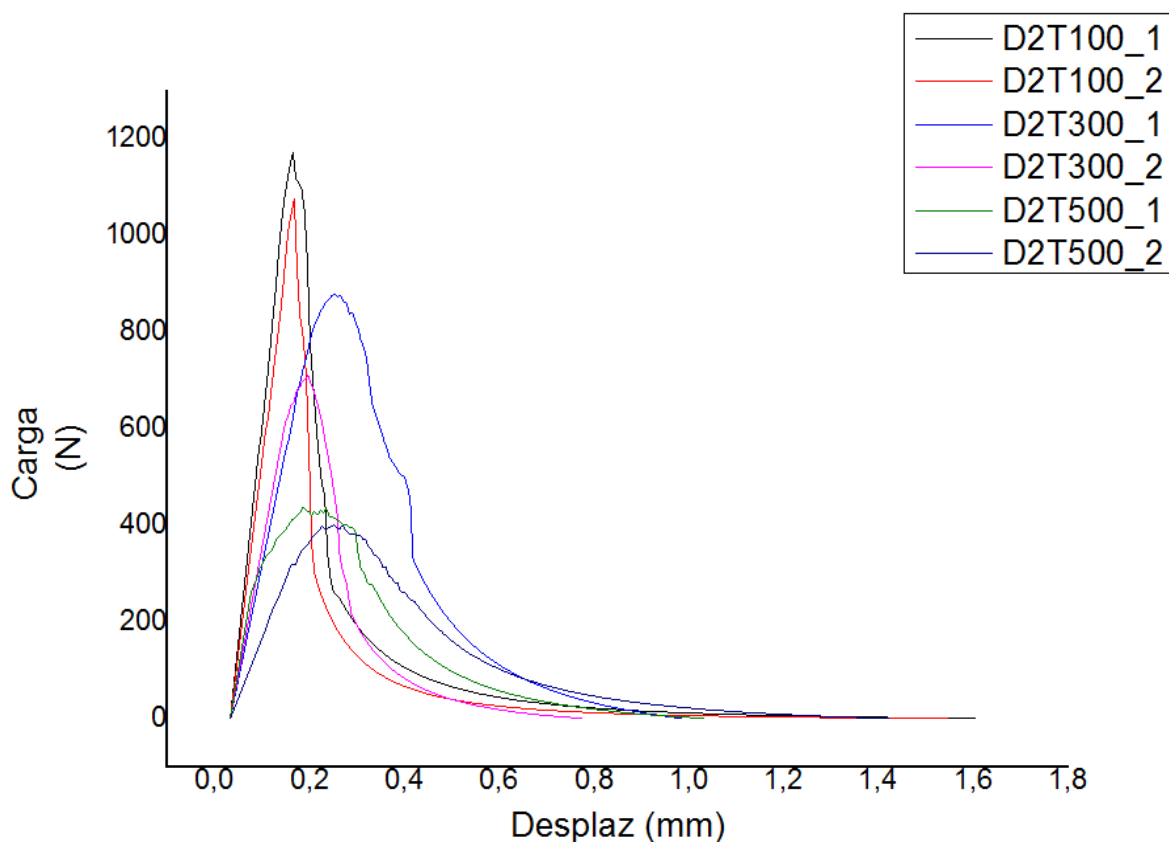


Ilustración 5.3: Hormigón con fibras de 24 mm (D2)

### 5.2.2 CURVAS P- $\delta$ DESPLAZAMIENTO D0, D1 Y D2 PARA TODO RANGO DE TEMPERATURA

Ilustración 5.4: Curvas P- $\delta$  para hormigones sin fibras (D0)

Ilustración 5.5: Curvas P- $\delta$  para hormigones con fibras de 6 mm (D1)Ilustración 5.6: Curvas P- $\delta$  para hormigones con fibras de 24 mm (D2)

### 5.2.3 INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE FIBRAS EN EL HORMIGÓN

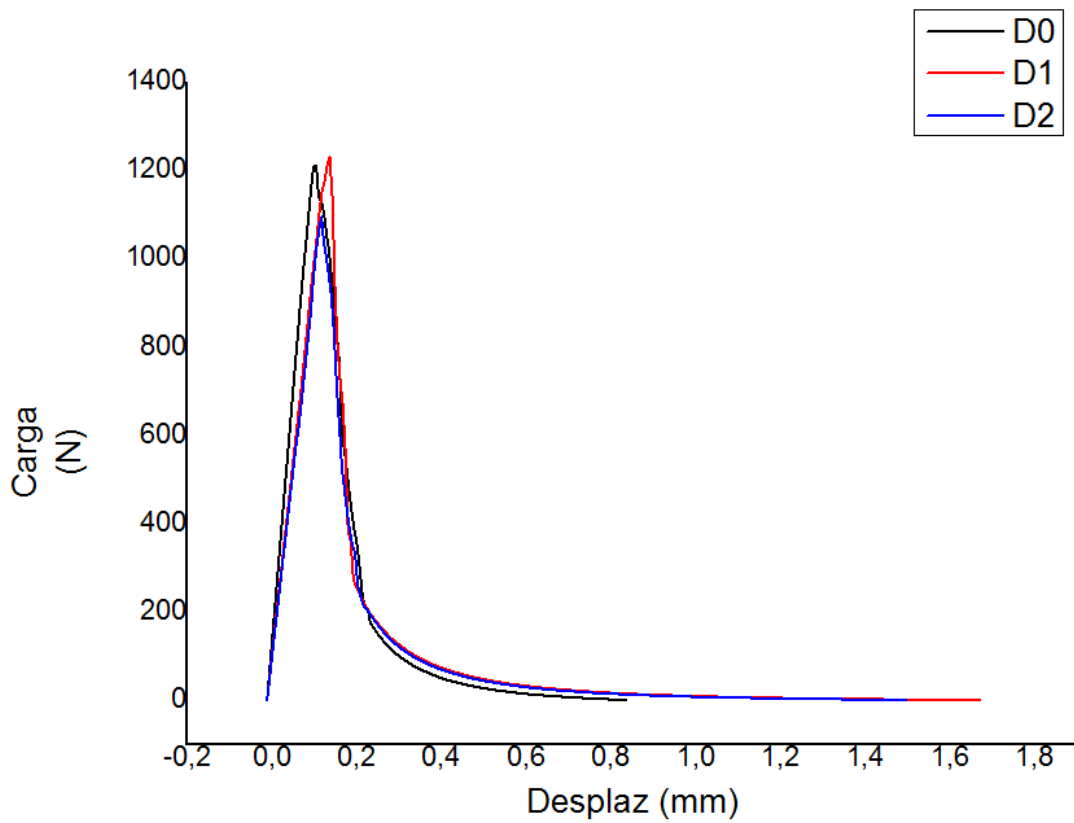


Ilustración 5.7: Influencia fibras sobre  $G_f$  - probetas a  $T=100^{\circ}\text{C}$  (Medida Residual)

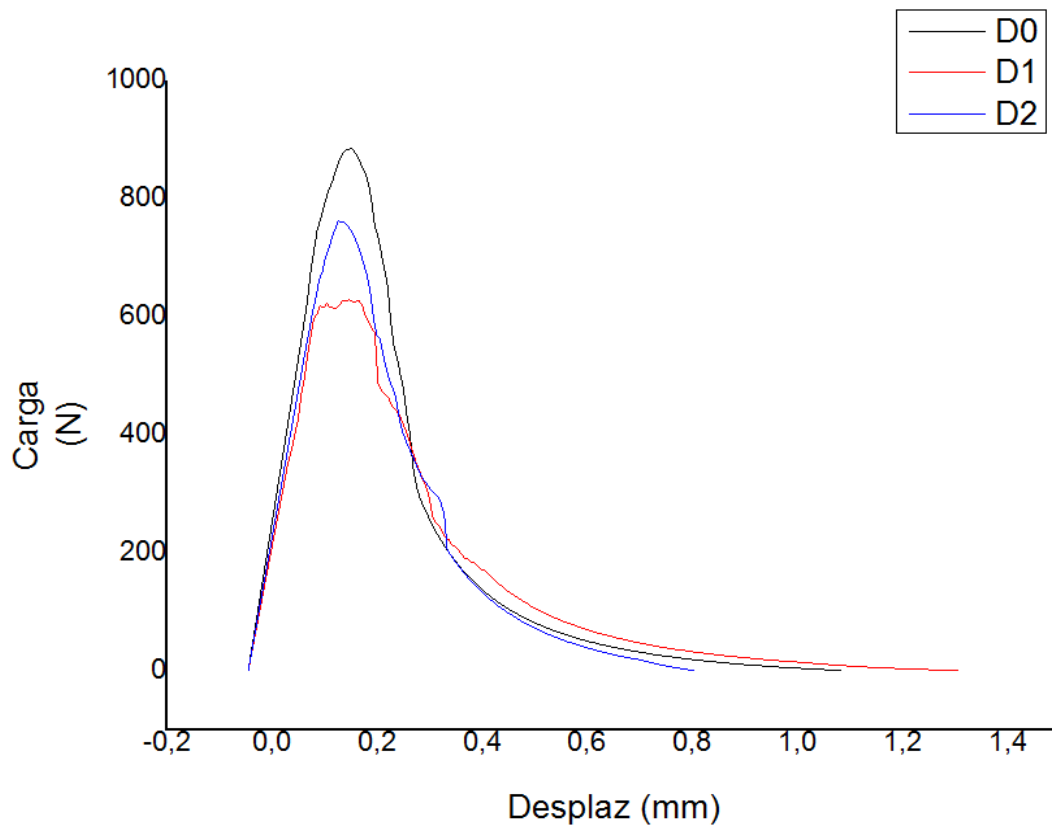


Ilustración 5.8: Influencia fibras sobre  $G_f$  - probetas a  $T=300^{\circ}\text{C}$  (Medida Residual)

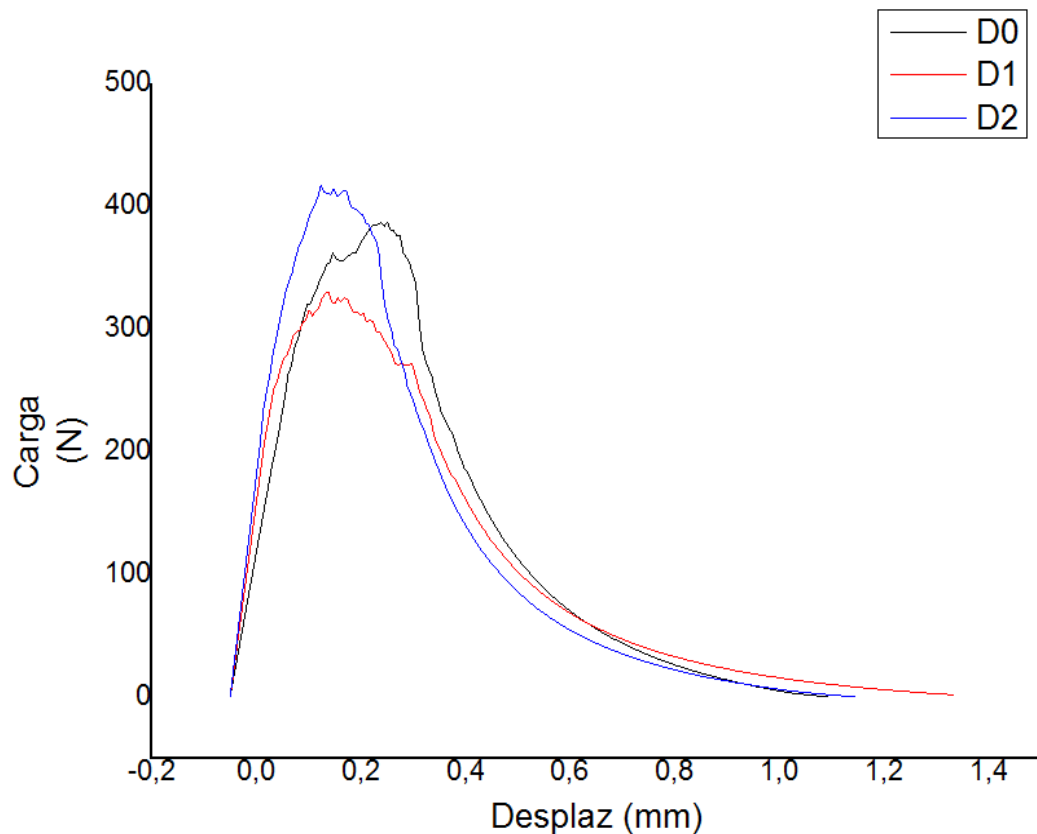


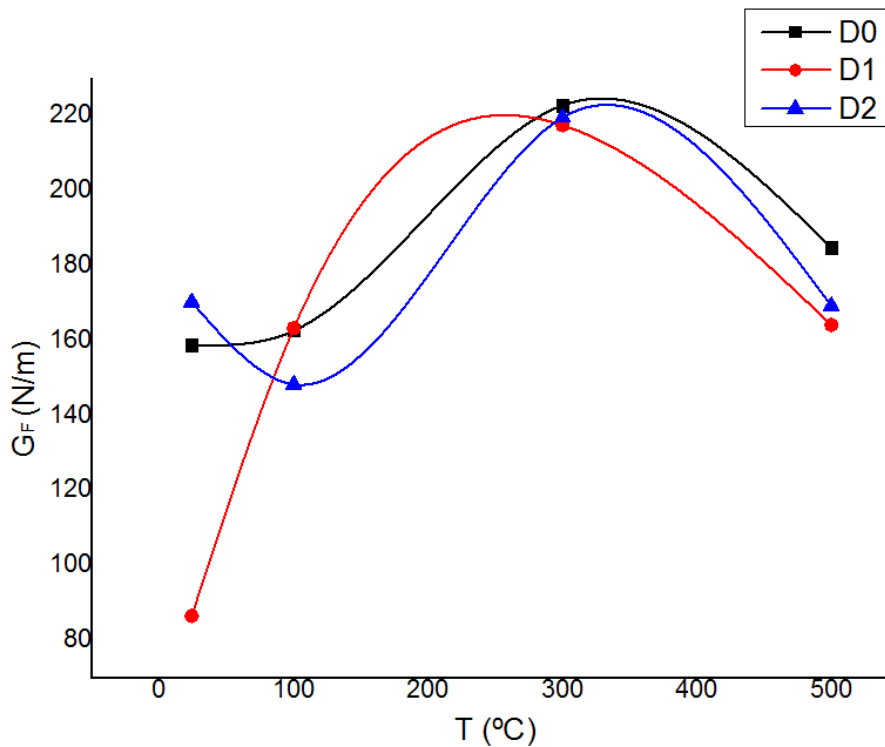
Ilustración 5.9: Influencia fibras sobre  $G_f$  - probetas a  $T=500^{\circ}\text{C}$  (Medida Residual)

## 5.2.4 EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA DE FRACTURA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

Tabla 6: Energía de Fractura

	$W_f$	A	$d_u$	$W_{nm}$	$W_{ft}$	Alig	$G_f$ (N/mm)	$G_f$ (N/m)	$G_f$ Media (N/m)	Desviación (%)	T ( $^{\circ}\text{C}$ )
D0T100_1	166,942	7,295	0,80	18,238	185,180	1324,4	0,13982088	139,821	162,592841	20%	100
D0T100_2	198,894	13,779	0,88	31,352	230,246	1242,1	0,18536481	185,365			
D0T300_1	215,825	16,584	1,06	31,231	247,056	1225,7	0,2015692	201,569	222,6924501	13%	300
D0T300_2	253,836	38,243	1,12	68,109	321,945	1320,4	0,2438157	243,816			
D0T500_1	200,250	53,770	1,06	101,838	302,087	1278,9	0,2362111	236,211	184,7713694	39%	500
D0T500_2	117,146	32,583	1,22	53,371	170,516	1278,9	0,13333163	133,332			
D1T100_1	176,656	13,446	1,70	15,791	192,448	1244,8	0,15460179	154,602	163,2797268	8%	100
D1T100_2	191,047	17,681	1,73	20,405	211,452	1229,7	0,17195767	171,958			
D1T300_1	246,939	47,536	1,60	59,457	306,396	1183,3	0,25894247	258,942	217,3690988	27%	300
D1T300_2	180,863	18,484	1,07	34,615	215,478	1225,7	0,17579573	175,796			
D1T500_1	158,913	45,996	1,49	61,781	220,693	1220,9	0,18075547	180,755	164,1254107	14%	500
D1T500_2	141,624	26,403	1,37	38,460	180,084	1220,9	0,14749535	147,495			
D2T100_1	194,100	18,601	1,61	23,093	217,193	1287,7	0,16867178	168,672	148,2562732	19%	100
D2T100_2	144,495	9,484	1,51	12,528	157,022	1228,3	0,12784077	127,841			
D2T300_1	272,565	46,718	0,92	102,004	374,569	1289,1	0,2905709	290,571	219,4268023	46%	300
D2T300_2	138,167	12,134	0,71	33,989	172,156	1161,0	0,1482827	148,283			
D2T500_1	147,061	27,107	1,00	54,160	201,220	1241,2	0,16211908	162,119	169,1954165	6%	500
D2T500_2	162,574	38,758	1,38	56,212	218,786	1241,2	0,17627175	176,272			
D0Tamb_1	122,904	17,699	0,48	74,364	197,269	1248,0	0,15806795	158,068	158,7801716	1%	TA
D0Tamb_2	139,747	8,569	0,34	51,005	190,753	1196,0	0,15949239	159,492			
D1Tamb_1	92,998	3,870	0,37	21,147	114,145	1248,0	0,09146263	91,463	86,51328663	8%	TA
D1Tamb_2	86,360	1,697	0,22	15,432	101,792	1248,0	0,08156395	81,564			
D2Tamb_1	113,005	23,195	0,21	223,031	336,036	1326,0	0,25342053	253,421	170,2605556	69%	TA
D2Tamb_2	85,201	2,221	0,19	23,500	108,702	1248,0	0,08710058	87,101			

\*Trabajo de fractura ( $W_f$ ) en Nmm -  $d_u$  en mm - Alig en mm<sup>2</sup>



5.10: Energía de fractura (Gf Valores Medios) en función de la Temperatura para D0, D1 Y D2

## 5.2.5 EVOLUCIÓN DE LA CARGA DE PICO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

Tabla 7: Carga de Pico frente a T<sup>a</sup>

	Carga de Pico (N)	Media Carga Pico (N)	Desviación (%)
D0TA_1	1034,54545	1140,397725	13,1%
D0TA_2	1246,25		
D0T100_1	1366,66667	1278,333335	9,8%
D0T100_2	1190		
D0T300_1	885	884,642855	0,1%
D0T300_2	884,28571		
D0T500_1	518,57143	392,857145	45,3%
D0T500_2	267,14286		
D1TA_1	875,27778	985,27778	15,8%
D1TA_2	1095,27778		
D1T100_1	1096,66667	1229,583335	15,3%
D1T100_2	1362,5		
D1T300_1	687,14286	730	8,3%
D1T300_2	772,85714		
D1T500_1	340	343,333335	1,4%
D1T500_2	346,66667		
D2TA_1	1112	1015,75	13,4%
D2TA_2	919,5		
D2T100_1	1170	1122,5	6,0%
D2T100_2	1075		
D2T300_1	878,57143	794,285715	15,0%
D2T300_2	710		
D2T500_1	437,5	418,75	6,3%
D2T500_2	400		

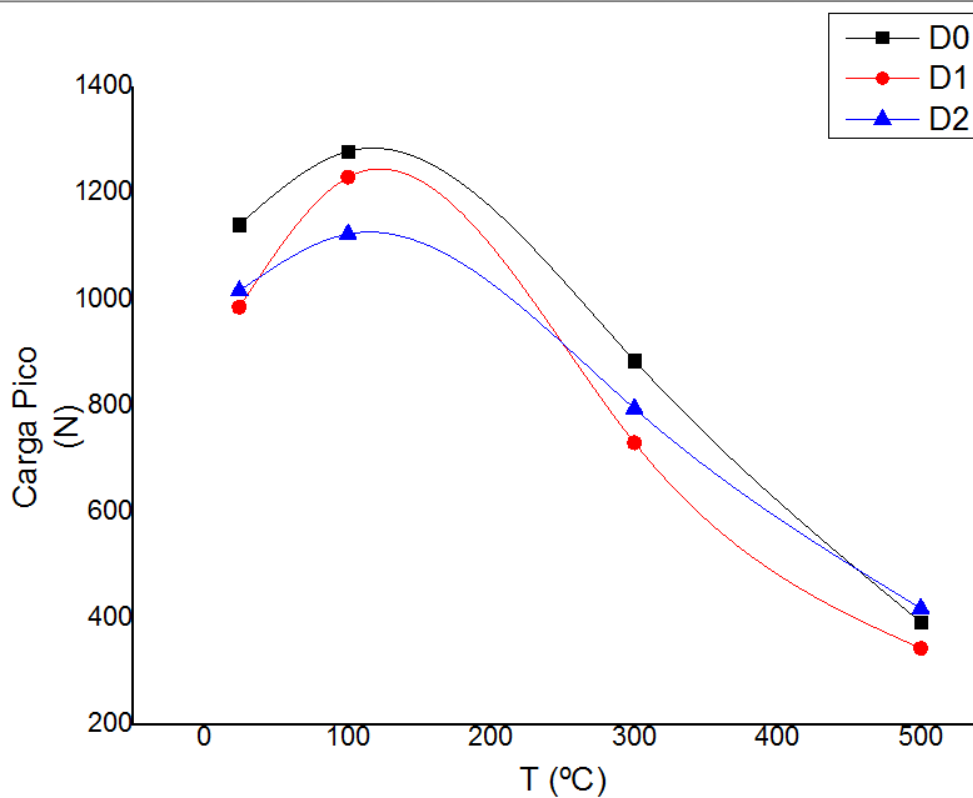


Ilustración 5.11: Carga de Pico en función de la temperatura (D0, D1 y D2)

### 5.3 ENSAYO A COMPRESIÓN UNIAxIAL

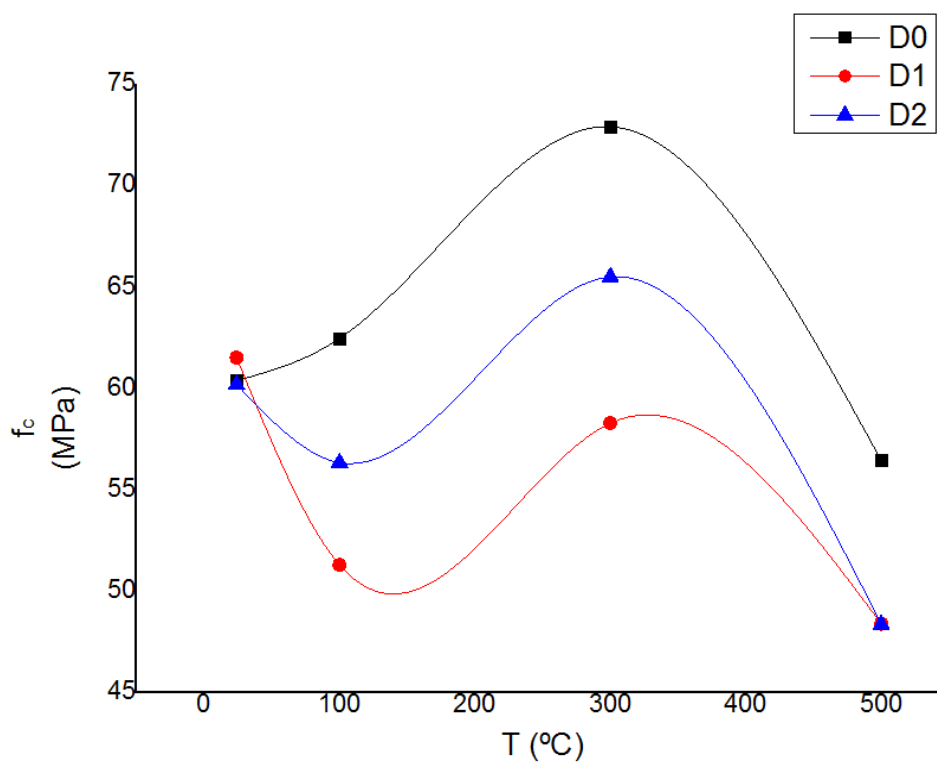
Ilustración 5.12: Resistencia a compresión frente a  $T^a$  para D0, D1 y D2

Tabla 8: Resistencia a Compresión ( $f_c$ )

	Tension de Rotura - Fc (Mpa)	Media Tension Rotura - Fc (Mpa)	Desviación
D0T100_1	73,9464	62,4438	26,05%
D0T100_2	50,9412		
D0T300_1	77,72	72,8905	9,37%
D0T300_2	68,061		
D0T500_1	38,401	56,43175	45,19%
D0T500_2	74,4625		
D1T100_1	45,5844	51,283	15,71%
D1T100_2	56,9816		
D1T300_1	61,38	58,269	7,55%
D1T300_2	55,158		
D1T500_1	40,7718	48,3814	22,24%
D1T500_2	55,991		
D2T100_1	63,2108	56,31915	17,31%
D2T100_2	49,4275		
D2T300_1	66,4336	65,4853	2,05%
D2T300_2	64,537		
D2T500_1	41,1955	48,35475	20,94%
D2T500_2	55,514		
D0Tamb_1	64,78	60,37	10,33%
D0Tamb_2	55,96		
D1Tamb_1	63,52	61,505	4,63%
D1Tamb_2	59,49		
D2Tamb_1	60,2	60,18	0,05%
D2Tamb_2	60,16		

## 5.4 ENSAYO A COMPRESIÓN UNIAXIAL CON TRANSDUCTORES CILÍNDRICOS

### 5.4.1 MÓDULO ELÁSTICO ESTABILIZADO

Tabla 9: Módulo elástico estabilizado ( $T^a$  Ambiente)

	D0_1		D1_1		D2_2	
	Tension (MPa)	Deformacion	Tension (MPa)	Deformacion	Tension (MPa)	Deformacion
Pto a	32,1493	7,67E-04	27,03087	8,97E-04	32,06017	7,97E-04
Pto p	5,10569	2,15E-04	5,04203	3,55E-04	5,0293	2,30E-04
Modulo E (MPa)	48992,0471		40551,11111		47673,49206	
	D0_2		D1_2		D2_3	
	Tension (MPa)	Deformacion	Tension (MPa)	Deformacion	Tension (MPa)	Deformacion
Pto a	32,23842	7,19E-04	27,10727	9,35E-04	32,06017	8,78E-04
Pto p	5,04203	1,37E-04	5,06749	3,95E-04	5,0293	2,53E-04
Modulo E (MPa)	46729,19244		40871,17293		43214,82014	
Media Mod.E (GPa)	47,86061977		40,71114202		45,4441561	
Desviación (%)	3,343%		0,556%		6,938%	



## 5.4.2 MÓDULO ELÁSTICO. MODELO DE JENQ-SHAH

Tabla 11: Módulo Elástico (TªAmbiente) y Factor de Correlación.

T= Ambiente	D	ao	B	S	$\alpha$	V1( $\alpha$ )	Ei	Ec (Mpa)	Ec Medio (Mpa)	Desviacion	Ec Uniax (Mpa)	F. Correlación ( $\beta$ )
D0_1	49	23	48	200	0,47	2,68	6801,08	4364,451	5626,077571	32%	46729,19244	6,7844
D0_2	51	25	46	200	0,49	2,87	9580,61	6887,705				
D1_1	50	24	48	200	0,48	2,77	11083,33	7374,767	6975,949834	8%	40871,17293	5,8589
D1_2	49	23	48	200	0,47	2,68	10249,07	6577,133				
D2_1	50	24	51	200	0,48	2,77	10494,19	6572,005	6425,328191	3%	43214,82014	6,7257
D2_2	49	23	48	200	0,47	2,68	9783,95	6278,651				

Tabla 10: Módulo Elástico (T=100°C)

T= 100°C	D	ao	B	S	$\alpha$	V1( $\alpha$ )	Ei	Ec (Mpa)	Ec Medio (Mpa)	Desviacion	Ec Uniaxial (Mpa)	% Decrecimiento
D0_1	46,6	20,4	50,6	200	0,44	2,429	13000,88	7038,766	6471,331759	12%	43904,338	6%
D0_2	47,4	21,3	47,5	200	0,45	2,51	9843,574	5903,898				
D1_1	48,9	22,5	47,1	200	0,46	2,595	7509,014	4665,629	5573,615014	23%	32655,07759	25%
D1_2	48,1	21,9	49,1	200	0,46	2,565	10916	6481,601				
D2_1	48,4	22,1	49,1	200	0,46	2,583	9273,727	5541,259	5229,894816	8%	35174,6957	23%
D2_2	48,2	22,0	47	200	0,46	2,58	7862,647	4918,531				

Tabla 12: Módulo Elástico (T=300°C)

T= 300°C	D	ao	B	S	$\alpha$	V1( $\alpha$ )	Ei	Ec (Mpa)	Ec Medio (Mpa)	Desviacion	Ec UniaX (Mpa)	% Decrecimiento
D0_1	48,9	22,55	46,6	200	0,46	2,61	6992,412	4441,117652	3380,970271	44%	15745,47502	197%
D0_2	44,8	18,8	50,7	200	0,42	2,309	4537,037	2320,822889				
D1_1	48,7	22,63	45,4	200	0,46	2,642	4847,577	3231,582533	3145,331438	4%	18428,08337	122%
D1_2	49,4	23,81	47,9	200	0,48	2,798	4464,424	3059,080343				
D2_1	47,8	21,44	48,9	200	0,45	2,51	4696,336	2712,589135	3069,713516	16%	20645,96758	109%
D2_2	47,1	21,25	45	200	0,45	2,538	5274,895	3426,837897				

Tabla 13: Módulo Elástico (T=500°C)

T= 500°C	D	ao	B	S	$\alpha$	V1( $\alpha$ )	Ei	Ec (Mpa)	Ec Medio (Mpa)	Desviacion	Ec Uniax (Mpa)	% Decrecimiento
D0_1	48	22	47	200	0,46	2,589	2794,758	1763,841247	1491,813892	26%	10121,1163	362%
D0_2	48	22	47	200	0,46	2,589	1932,718	1219,786537				
D1_1	48	22	47	200	0,46	2,589	3881,045	2449,423481	2145,102054	20%	12567,87091	225%
D1_2	48	22	47	200	0,46	2,589	2916,667	1840,780628				
D2_1	48	22	47	200	0,46	2,589	5926,625	3740,439998	2659,174275	58%	17884,80442	142%
D2_2	48	22	47	200	0,46	2,589	2500,153	1577,908552				

$$E_i = \text{Pendiente de la curva } P - \delta ; E_c = \frac{6E_i S a_0 V_1(\alpha)}{B D^2} ; \alpha = \frac{a_0}{D} ; E_{c \text{ Uniaxial}} = \beta E_c$$

$$V_1(\alpha) = 0,8 - 1,7 \alpha + 2,4 \alpha^2 + \frac{0,66}{(1-\alpha)^2} + \frac{4D}{S} (-0,04 - 0,58 \alpha + 1,47 \alpha^2 - 2,04 \alpha^3)$$

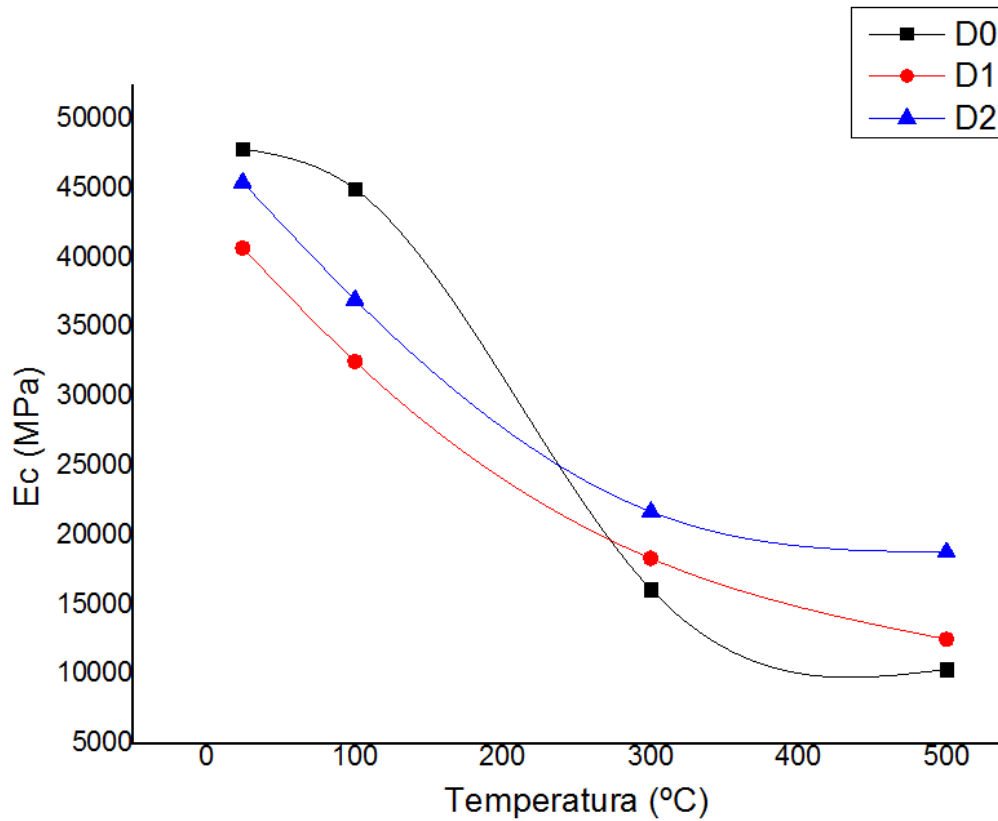


Ilustración 5.13: Módulo Elástico frente a Temperatura

## 5.5 ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA

Tabla 14: Carga de Pico. Resistencia a Tracción ( $f_{ct}$ ). Longitud Característica ( $l_{ch}$ ).

	Carga de Pico (N)	Media Carga Pico (N)	$\Delta$ Carga Pico(%)	$f_{ct}$ (Mpa)	$E_c$ (Mpa)	$G_f$ (N/mm)	$l_{ch}$ (mm)																																																																																																								
DOTA_1	1034,54545	1140,397725	-	6,53	46729,1924	0,15878017	174,003579																																																																																																								
DOTA_2	1246,25							D0T100_1	1366,66667	1278,333335	-10,79%	7,3198293	43904,338	0,18536481	151,891267	D0T100_2	1190	D0T300_1	885	884,642855	28,91%	5,06552908	15745,475	0,22269245	136,650629	D0T300_2	884,28571	D0T500_1	518,57143	392,857145	190,28%	2,24952848	10121,1163	0,13333163	266,672741	D0T500_2	267,14286	D1TA_1	875,27778	985,27778	-	6,275	40871,1729	0,08651329	89,7991968	D1TA_2	1095,27778	D1T100_1	1096,66667	1229,583335	-19,87%	7,83092401	32655,0776	0,16327973	86,9474732	D1T100_2	1362,5	D1T300_1	687,14286	730	34,97%	4,64919649	18428,0834	0,25894247	220,76369	D1T300_2	772,85714	D1T500_1	340	343,333335	186,97%	2,18660841	12567,8709	0,16412541	431,415267	D1T500_2	346,66667	D2TA_1	1112	1015,75	-	5,875	43214,8201	0,17026056	213,172419	D2TA_2	919,5	D2T100_1	1170	1122,5	-9,51%	6,4924317	35174,6957	0,16867178	140,753107	D2T100_2	1075	D2T300_1	878,57143	794,285715	27,88%	4,59407194	20645,9676	0,2905709	284,244312	D2T300_2	710	D2T500_1	437,5	418,75	142,57%
D0T100_1	1366,66667	1278,333335	-10,79%	7,3198293	43904,338	0,18536481	151,891267																																																																																																								
D0T100_2	1190							D0T300_1	885	884,642855	28,91%	5,06552908	15745,475	0,22269245	136,650629	D0T300_2	884,28571	D0T500_1	518,57143	392,857145	190,28%	2,24952848	10121,1163	0,13333163	266,672741	D0T500_2	267,14286	D1TA_1	875,27778	985,27778	-	6,275	40871,1729	0,08651329	89,7991968	D1TA_2	1095,27778	D1T100_1	1096,66667	1229,583335	-19,87%	7,83092401	32655,0776	0,16327973	86,9474732	D1T100_2	1362,5	D1T300_1	687,14286	730	34,97%	4,64919649	18428,0834	0,25894247	220,76369	D1T300_2	772,85714	D1T500_1	340	343,333335	186,97%	2,18660841	12567,8709	0,16412541	431,415267	D1T500_2	346,66667	D2TA_1	1112	1015,75	-	5,875	43214,8201	0,17026056	213,172419	D2TA_2	919,5	D2T100_1	1170	1122,5	-9,51%	6,4924317	35174,6957	0,16867178	140,753107	D2T100_2	1075	D2T300_1	878,57143	794,285715	27,88%	4,59407194	20645,9676	0,2905709	284,244312	D2T300_2	710	D2T500_1	437,5	418,75	142,57%	2,4220096	17884,8044	0,16919542	515,84719	D2T500_2	400				
D0T300_1	885	884,642855	28,91%	5,06552908	15745,475	0,22269245	136,650629																																																																																																								
D0T300_2	884,28571							D0T500_1	518,57143	392,857145	190,28%	2,24952848	10121,1163	0,13333163	266,672741	D0T500_2	267,14286	D1TA_1	875,27778	985,27778	-	6,275	40871,1729	0,08651329	89,7991968	D1TA_2	1095,27778	D1T100_1	1096,66667	1229,583335	-19,87%	7,83092401	32655,0776	0,16327973	86,9474732	D1T100_2	1362,5	D1T300_1	687,14286	730	34,97%	4,64919649	18428,0834	0,25894247	220,76369	D1T300_2	772,85714	D1T500_1	340	343,333335	186,97%	2,18660841	12567,8709	0,16412541	431,415267	D1T500_2	346,66667	D2TA_1	1112	1015,75	-	5,875	43214,8201	0,17026056	213,172419	D2TA_2	919,5	D2T100_1	1170	1122,5	-9,51%	6,4924317	35174,6957	0,16867178	140,753107	D2T100_2	1075	D2T300_1	878,57143	794,285715	27,88%	4,59407194	20645,9676	0,2905709	284,244312	D2T300_2	710	D2T500_1	437,5	418,75	142,57%	2,4220096	17884,8044	0,16919542	515,84719	D2T500_2	400														
D0T500_1	518,57143	392,857145	190,28%	2,24952848	10121,1163	0,13333163	266,672741																																																																																																								
D0T500_2	267,14286							D1TA_1	875,27778	985,27778	-	6,275	40871,1729	0,08651329	89,7991968	D1TA_2	1095,27778	D1T100_1	1096,66667	1229,583335	-19,87%	7,83092401	32655,0776	0,16327973	86,9474732	D1T100_2	1362,5	D1T300_1	687,14286	730	34,97%	4,64919649	18428,0834	0,25894247	220,76369	D1T300_2	772,85714	D1T500_1	340	343,333335	186,97%	2,18660841	12567,8709	0,16412541	431,415267	D1T500_2	346,66667	D2TA_1	1112	1015,75	-	5,875	43214,8201	0,17026056	213,172419	D2TA_2	919,5	D2T100_1	1170	1122,5	-9,51%	6,4924317	35174,6957	0,16867178	140,753107	D2T100_2	1075	D2T300_1	878,57143	794,285715	27,88%	4,59407194	20645,9676	0,2905709	284,244312	D2T300_2	710	D2T500_1	437,5	418,75	142,57%	2,4220096	17884,8044	0,16919542	515,84719	D2T500_2	400																								
D1TA_1	875,27778	985,27778	-	6,275	40871,1729	0,08651329	89,7991968																																																																																																								
D1TA_2	1095,27778							D1T100_1	1096,66667	1229,583335	-19,87%	7,83092401	32655,0776	0,16327973	86,9474732	D1T100_2	1362,5	D1T300_1	687,14286	730	34,97%	4,64919649	18428,0834	0,25894247	220,76369	D1T300_2	772,85714	D1T500_1	340	343,333335	186,97%	2,18660841	12567,8709	0,16412541	431,415267	D1T500_2	346,66667	D2TA_1	1112	1015,75	-	5,875	43214,8201	0,17026056	213,172419	D2TA_2	919,5	D2T100_1	1170	1122,5	-9,51%	6,4924317	35174,6957	0,16867178	140,753107	D2T100_2	1075	D2T300_1	878,57143	794,285715	27,88%	4,59407194	20645,9676	0,2905709	284,244312	D2T300_2	710	D2T500_1	437,5	418,75	142,57%	2,4220096	17884,8044	0,16919542	515,84719	D2T500_2	400																																		
D1T100_1	1096,66667	1229,583335	-19,87%	7,83092401	32655,0776	0,16327973	86,9474732																																																																																																								
D1T100_2	1362,5							D1T300_1	687,14286	730	34,97%	4,64919649	18428,0834	0,25894247	220,76369	D1T300_2	772,85714	D1T500_1	340	343,333335	186,97%	2,18660841	12567,8709	0,16412541	431,415267	D1T500_2	346,66667	D2TA_1	1112	1015,75	-	5,875	43214,8201	0,17026056	213,172419	D2TA_2	919,5	D2T100_1	1170	1122,5	-9,51%	6,4924317	35174,6957	0,16867178	140,753107	D2T100_2	1075	D2T300_1	878,57143	794,285715	27,88%	4,59407194	20645,9676	0,2905709	284,244312	D2T300_2	710	D2T500_1	437,5	418,75	142,57%	2,4220096	17884,8044	0,16919542	515,84719	D2T500_2	400																																												
D1T300_1	687,14286	730	34,97%	4,64919649	18428,0834	0,25894247	220,76369																																																																																																								
D1T300_2	772,85714							D1T500_1	340	343,333335	186,97%	2,18660841	12567,8709	0,16412541	431,415267	D1T500_2	346,66667	D2TA_1	1112	1015,75	-	5,875	43214,8201	0,17026056	213,172419	D2TA_2	919,5	D2T100_1	1170	1122,5	-9,51%	6,4924317	35174,6957	0,16867178	140,753107	D2T100_2	1075	D2T300_1	878,57143	794,285715	27,88%	4,59407194	20645,9676	0,2905709	284,244312	D2T300_2	710	D2T500_1	437,5	418,75	142,57%	2,4220096	17884,8044	0,16919542	515,84719	D2T500_2	400																																																						
D1T500_1	340	343,333335	186,97%	2,18660841	12567,8709	0,16412541	431,415267																																																																																																								
D1T500_2	346,66667							D2TA_1	1112	1015,75	-	5,875	43214,8201	0,17026056	213,172419	D2TA_2	919,5	D2T100_1	1170	1122,5	-9,51%	6,4924317	35174,6957	0,16867178	140,753107	D2T100_2	1075	D2T300_1	878,57143	794,285715	27,88%	4,59407194	20645,9676	0,2905709	284,244312	D2T300_2	710	D2T500_1	437,5	418,75	142,57%	2,4220096	17884,8044	0,16919542	515,84719	D2T500_2	400																																																																
D2TA_1	1112	1015,75	-	5,875	43214,8201	0,17026056	213,172419																																																																																																								
D2TA_2	919,5							D2T100_1	1170	1122,5	-9,51%	6,4924317	35174,6957	0,16867178	140,753107	D2T100_2	1075	D2T300_1	878,57143	794,285715	27,88%	4,59407194	20645,9676	0,2905709	284,244312	D2T300_2	710	D2T500_1	437,5	418,75	142,57%	2,4220096	17884,8044	0,16919542	515,84719	D2T500_2	400																																																																										
D2T100_1	1170	1122,5	-9,51%	6,4924317	35174,6957	0,16867178	140,753107																																																																																																								
D2T100_2	1075							D2T300_1	878,57143	794,285715	27,88%	4,59407194	20645,9676	0,2905709	284,244312	D2T300_2	710	D2T500_1	437,5	418,75	142,57%	2,4220096	17884,8044	0,16919542	515,84719	D2T500_2	400																																																																																				
D2T300_1	878,57143	794,285715	27,88%	4,59407194	20645,9676	0,2905709	284,244312																																																																																																								
D2T300_2	710							D2T500_1	437,5	418,75	142,57%	2,4220096	17884,8044	0,16919542	515,84719	D2T500_2	400																																																																																														
D2T500_1	437,5	418,75	142,57%	2,4220096	17884,8044	0,16919542	515,84719																																																																																																								
D2T500_2	400																																																																																																														

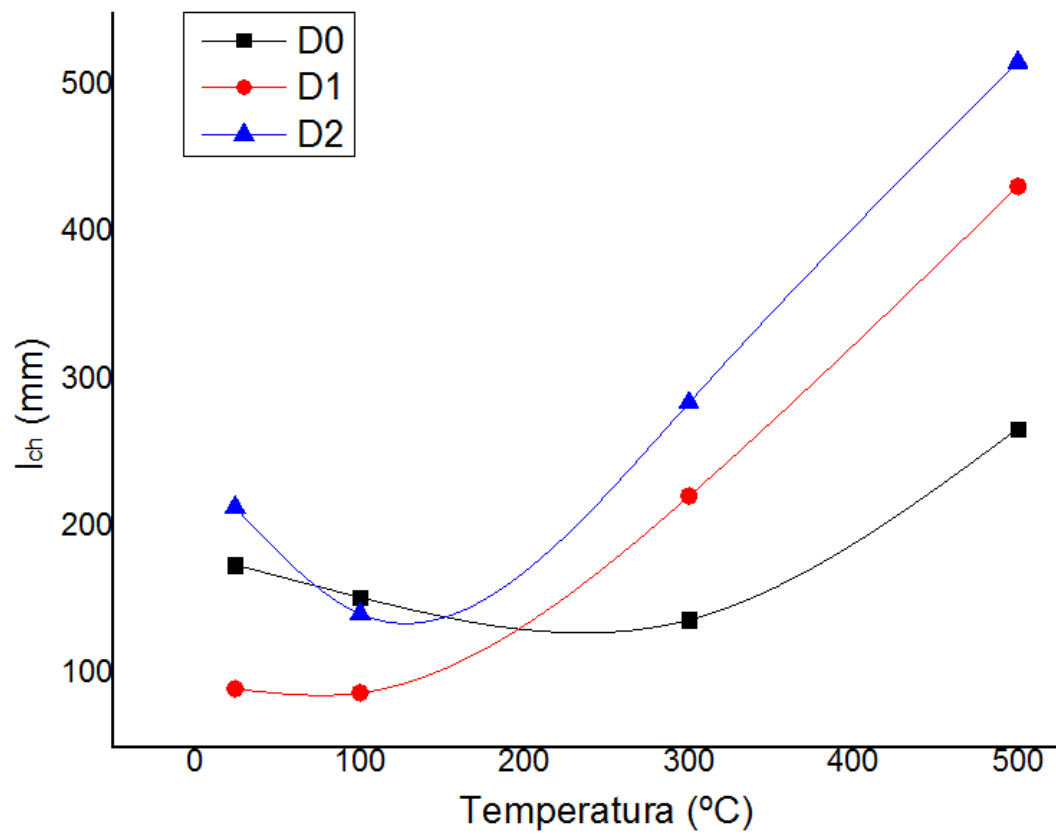


Ilustración 5.14: Longitud Característica frente a Temperatura

## 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1 INTRODUCCIÓN

Tras la exposición de los resultados en el bloque anterior, se pasa ahora a su estudio y análisis desde el punto de vista residual, es decir, con las probetas ya enfriadas. Para llevar a cabo dicho análisis se mantendrá el mismo orden seguido en el bloque V, facilitando así la comprensión del texto.

Cada apartado y cada punto será analizado detalladamente y algunos de ellos serán comparados con los conceptos que se introdujeron en el bloque II, cerrando así el círculo de estudio y comprensión del proyecto.

### 6.2 ENSAYO A FLEXIÓN EN TRES PUNTOS

#### 6.2.1 CURVAS CARGA-DESPLAZAMIENTO

Del estudio de las gráficas mostradas en el apartado 5.2.1 (ver ilustraciones 5.1, 5.2, 5.3), se puede observar que para la misma dosificación y temperatura, hay diferencias en las curvas. A pesar del cuidado con el que se han realizado las probetas y los 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.

Si se da el caso de contar con dos curvas con diferencias muy significativas (ver ilustración 5.1.d), 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.

#### 6.2.2 CURVAS P- $\delta$ DESPLAZAMIENTO D0, D1 Y D2 PARA TODO RANGO DE TEMPERATURA

En este apartado se lleva a cabo un estudio más global e introductorio de las curvas carga-desplazamiento de las dosificaciones D0, D1 y D2. Se comienza por el análisis de la dosificación sin adición de fibras (D0).

Primeramente, se analiza el tramo inicial prepico. Se observa, que a medida que aumenta la temperatura, la pendiente de dicho tramo va disminuyendo (ver ilustración 5.4). 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. 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 rigidez originada por el aumento de temperatura (ver tabla 16). Al aumentar la temperatura, la pendiente decrece y la probeta toma un comportamiento más dúctil, tal y como recogen los estudios de Bicanic (1).

Tabla 15: Incremento Pendiente tramo prepico para D0

	Pendiente	$\Delta$ Pendiente
D0_T100	13000	581%
D0_T500	1907,7	

En lo que respecta al estudio de la carga de pico o carga última, se puede observar un pequeño aumento de ésta en el primer incremento de temperatura (100°C) (ver tabla 17). Este pequeño aumento también fue recogido en los estudios de Bianic (1). Sin embargo, una vez que se alcanzan temperaturas de 300°C, la carga de pico disminuye aproximadamente un 30 %, haciéndose aún más evidente esta disminución para T= 500°C, con una disminución de la carga de pico de un 190 %.

Tabla 16: Carga de Pico (D0)

	Carga de Pico (N)	Media Carga Pico (N)	Desviación (%)
DOTA_1	1034,54545	1140,397725	13,1%
DOTA_2	1246,25		
DOT100_1	1366,66667	1278,333335	9,8%
DOT100_2	1190		
DOT300_1	885	884,642855	0,1%
DOT300_2	884,28571		
DOT500_1	518,57143	392,857145	45,3%
DOT500_2	267,14286		

En la tabla 18 se puede advertir que, a medida que va aumentando la temperatura, también aumenta el desplazamiento máximo ( $\delta_u$ ).

Tabla 17: Desplazamiento último en función de la temperatura (D0)

	$\delta_u$ (mm)	Media $\delta_u$ (mm)
DOTA_1	0,476	0,406
DOTA_2	0,336	
DOT100_1	0,793	0,82836
DOT100_2	0,86372	
DOT300_1	1,08298	1,10993
DOT300_2	1,13688	
DOT500_1	1,05404	1,12333
DOT500_2	1,19262	

En conclusión a esta primera serie de curvas, decir que se aprecia la tendencia que Bianic (1) comentó en su estudio (ilustración 2.17, bloque II), en la que se observaba como a medida que la temperatura aumentaba las curvas se hacían cada vez menos esbeltas: con menor pendiente inicial y  $P_u$ , y un mayor  $\delta_u$  (curvas más bajas y extendidas).

Una vez estudiada la dosificación D0, se procede con el análisis de la dosificación que contiene fibras de 6 mm (D1).

Al igual que en el caso anterior, si se observa la pendiente de las curvas carga – desplazamiento para el rango de temperaturas (ilustración 5.5), se advierte que a mayor temperatura menor pendiente (ver tabla 19). Sin embargo, la adición de fibras ha disminuido notablemente dicho descenso en la pendiente, y por tanto, el efecto producido por el spalling. Las fibras al derretirse crean conductos que dejan escapar el gas atrapado, disminuyendo el spalling y dotando al hormigón de más resistencia a la rotura.

Tabla 18: Incremento Pendiente tramo prepico para D1

	Pendiente	$\Delta$ Pendiente
D1_T100	7509,01407	159%
D1_T500	2902,71181	

Para el caso de la carga de pico, se vuelve a observar que sigue la tendencia de Bicanic, aumentando un poco para  $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$  y disminuyendo posteriormente (ver tabla 20). El efecto de las fibras se comentará más adelante en el apartado 6.2.5.

Tabla 19: Carga de Pico (D1)

	Carga de Pico (N)	Media Carga Pico (N)	Desviación (%)
D1TA_1	875,27778	985,27778	15,8%
D1TA_2	1095,27778		
D1T100_1	1096,66667	1229,583335	15,3%
D1T100_2	1362,5		
D1T300_1	687,14286	730	8,3%
D1T300_2	772,85714		
D1T500_1	340	343,333335	1,4%
D1T500_2	346,66667		

Tabla 20: Desplazamiento último en función de la temperatura (D1)

	$\delta_u$ (mm)	Media $\delta_u$ (mm)
D1TA_1	0,366	0,304575
D1TA_2	0,24315	
D1T100_1	1,679	1,685245
D1T100_2	1,69149	
D1T300_1	1,60497	1,35436
D1T300_2	1,10375	
D1T500_1	1,45797	1,43504
D1T500_2	1,41211	

La existencia de fibras en esta dosificación hace que el desplazamiento a  $100^{\circ}\text{C}$  sea muy superior al que se da a esta misma temperatura en D0. Este hecho repercute en que las fibras a  $100^{\circ}\text{C}$  actúen dotando a la probeta de una mayor energía de fractura, ya que al aumentar el desplazamiento último, aumenta el área encerrada bajo curva, y por tanto, el trabajo de fractura y la energía de fractura.

Aproximadamente a  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ , las fibras funden, por lo que el desplazamiento último baja igualándose en gran medida a los resultados obtenidos para D0.

Finalmente se analiza la dosificación con adición de fibras de 24 mm (D2).

Se sigue la misma tendencia que con las dos dosificaciones anteriores (D0 y D1), a mayor temperatura, menor pendiente (ver ilustración 5.6). Sin embargo, la mayor longitud de la fibra en este caso, hace que el decrecimiento de la pendiente sea menos notable, aunque éste siga siendo mucho menor que para el caso sin fibras (ver tabla 22). Debido a las pocas muestras de las que se dispone, se puede concluir que, en este aspecto, la adición de fibras otorga una clara mejora contra el spalling, sin embargo, el tipo de fibra no resulta muy influyente.

Tabla 21: Incremento Pendiente tramo prepico para D2

	Pendiente	$\Delta$ Pendiente
D1_T100	9019,34349	261%
D1_T500	2500,15304	

Respecto a los parámetros de carga de pico y desplazamiento último, tampoco se observan grandes diferencias con respecto a los datos obtenidos de D1 (ver tabla 20 y 21). Respecto a la dosificación D0, el desplazamiento de D2 a 100°C vuelve a ser muy superior, por lo que la adición de este tipo de fibras también provoca un incremento de la energía de fractura, como se comentará más adelante.

Tabla 22: Carga de Pico (D2)

	Carga de Pico (N)	Media Carga Pico (N)	Desviación (%)
D2TA_1	1112	1015,75	13,4%
D2TA_2	919,5		
D2T100_1	1170	1122,5	6,0%
D2T100_2	1075		
D2T300_1	878,57143	794,285715	15,0%
D2T300_2	710		
D2T500_1	437,5	418,75	6,3%
D2T500_2	400		

Tabla 23: Desplazamiento último en función de la temperatura (D2)

	$\delta_u$ (mm)	Media $\delta_u$ (mm)
D2TA_1	0,195	0,21405
D2TA_2	0,2331	
D2T100_1	1,605	1,576225
D2T100_2	1,54745	
D2T300_1	0,98609	0,8814
D2T300_2	0,77671	
D2T500_1	1,03421	1,22869
D2T500_2	1,42317	

Como conclusión del estudio del estudio de D1 y D2, no se puede observar por ahora la influencia del

aumento de la longitud de fibra. Posteriormente se estudia la energía de fractura y más detalladamente la evolución de la carga de pico. Tras estos estudios, se podrá obtener una conclusión sobre la influencia de la longitud de la fibra. Sin embargo, tras la observación introductoria de las curvas carga-desplazamiento, si se aprecian ya las mejoras notables frente al comportamiento a fractura que la adición de fibras otorga al hormigón.

### 6.2.3 INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE FIBRAS EN EL HORMIGÓN

En el apartado de resultados (5.2.3), se han expresado los resultados medios de las dos muestras. Debido a las grandes desviaciones que tienen algunas muestras, en este apartado de análisis, se expondrán las mismas gráficas pero corregidas expresando únicamente los resultados con desviaciones menores que el 15% o las muestras que se comportan acorde con los estudios previos realizados sobre las propiedades residuales del hormigón en fractura (1), (8), (30).

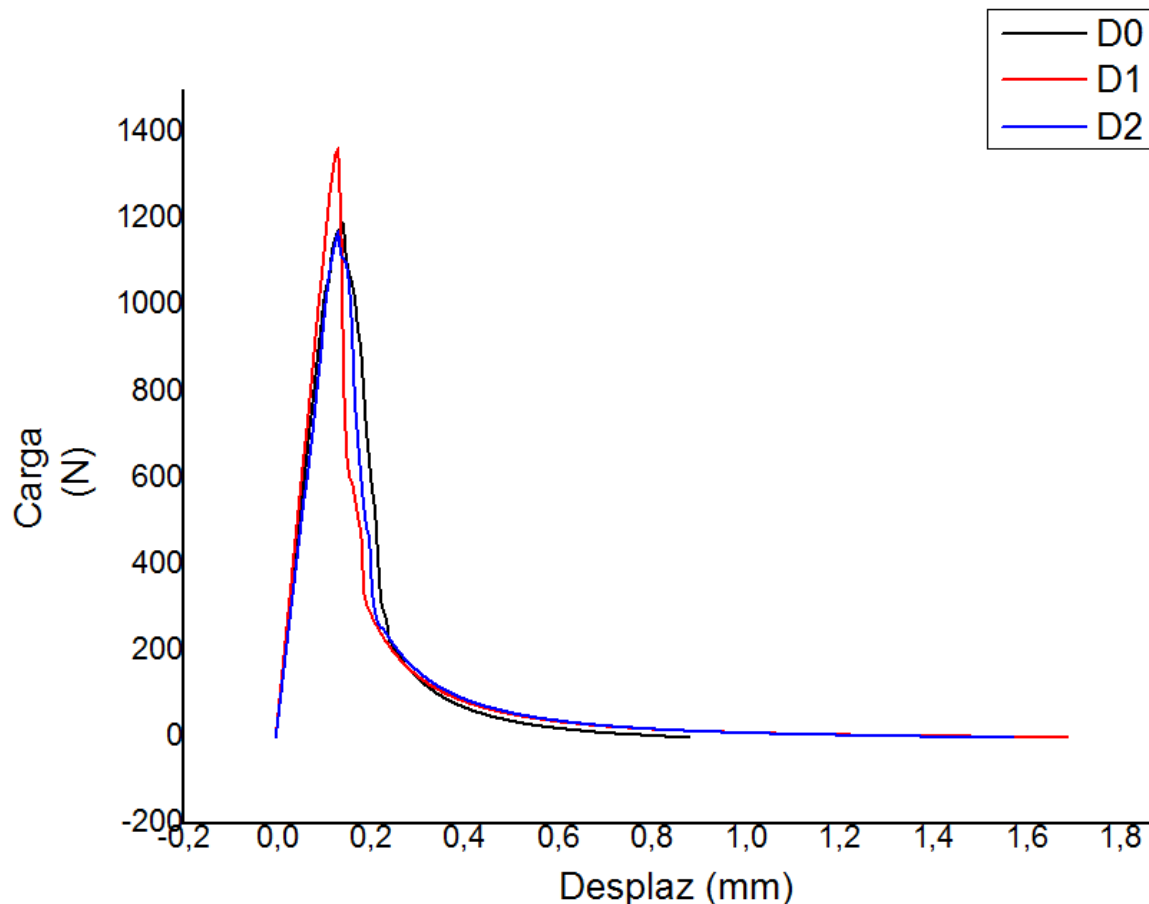


Ilustración 6.1: Influencia fibras sobre  $G_f$  - probetas a  $T=100^{\circ}\text{C}$  (Medida Residual Corregida)

Se comienza analizando las dosificaciones objeto de estudio expuestas a  $T=100^{\circ}\text{C}$ . Observando la ilustración 6.1, tanto la carga de pico como la pendiente del tramo prepico (fijarse también en la ilustración 5.7 que expresa los valores medios) son similares para las tres dosificaciones. Sin embargo, los desplazamientos últimos alcanzados para el caso de las dosificaciones con fibras, son mucho mayores que para el caso de la dosificación sin fibras. Esto se debe a que las fibras mantienen la unión



de las caras de la grieta, haciendo con esto posible que existan desplazamientos mucho mayores. Al aumentar tan significativamente los desplazamientos últimos, aumenta la energía de fractura (8). En lo que respecta a la influencia de la longitud de la fibra, tanto en la ilustración 5.7 como en la ilustración 6.1, los resultados son contradictorios con otros estudios, en los que el desplazamiento último aumenta al aumentar la longitud de la fibra (8), (6).

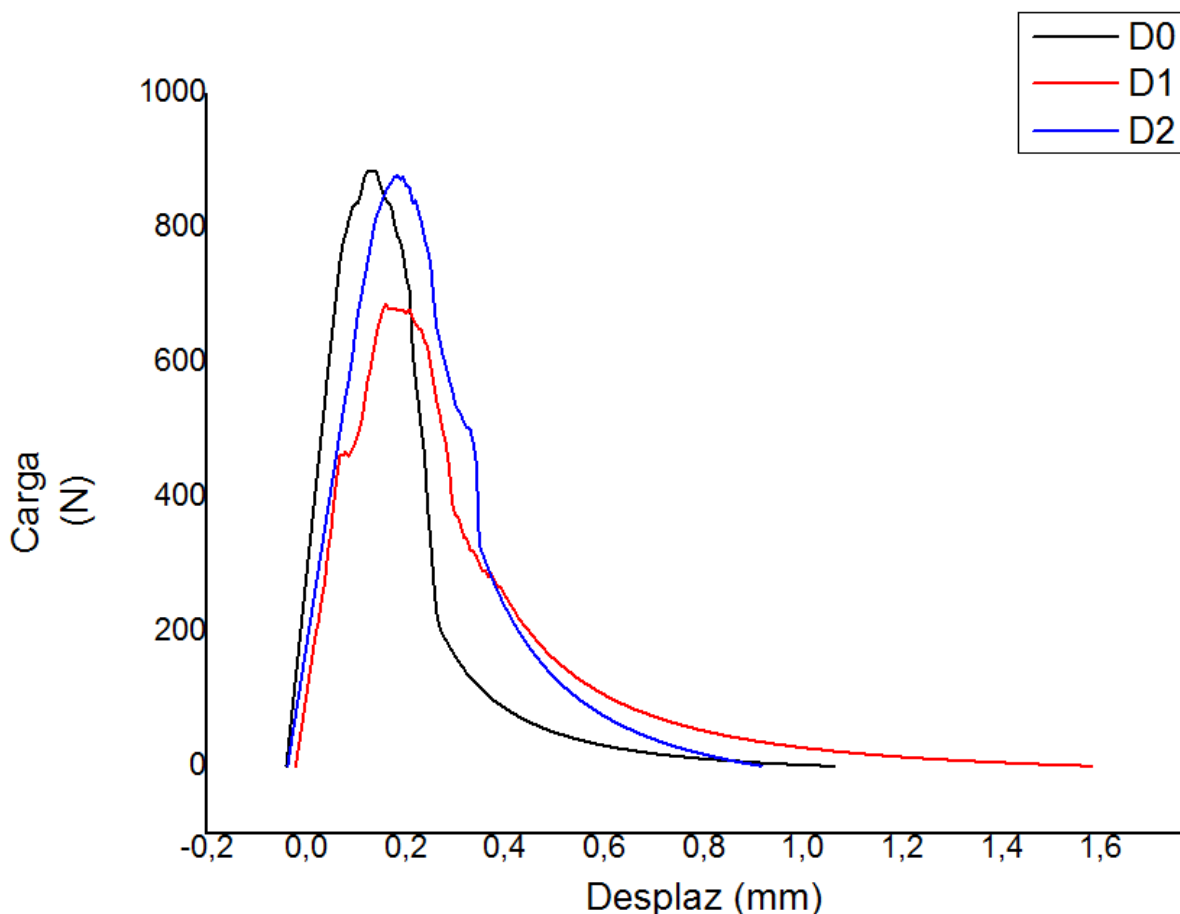


Ilustración 6.2: Influencia fibras sobre  $G_f$  - probetas a  $T=300^\circ\text{C}$  (Medida Residual Corregida)

Para  $T= 300^\circ\text{C}$ , las fibras ya se encuentran fundidas por lo que se puede observar que los desplazamientos últimos para este caso son más parecidos para las tres dosificaciones, es decir, la influencia de las fibras ya no es tan notable (ver ilustración 6.2).

En lo que respecta a la carga última, un exceso en adición de fibras, puede acarrear una disminución de ésta, ya que cuando estas funden, quedan huecos sin capacidad ninguna de resistir esfuerzos. Este efecto se ve reflejado en la ilustración 6.2, siendo la carga de pico máxima, la del hormigón sin fibras.

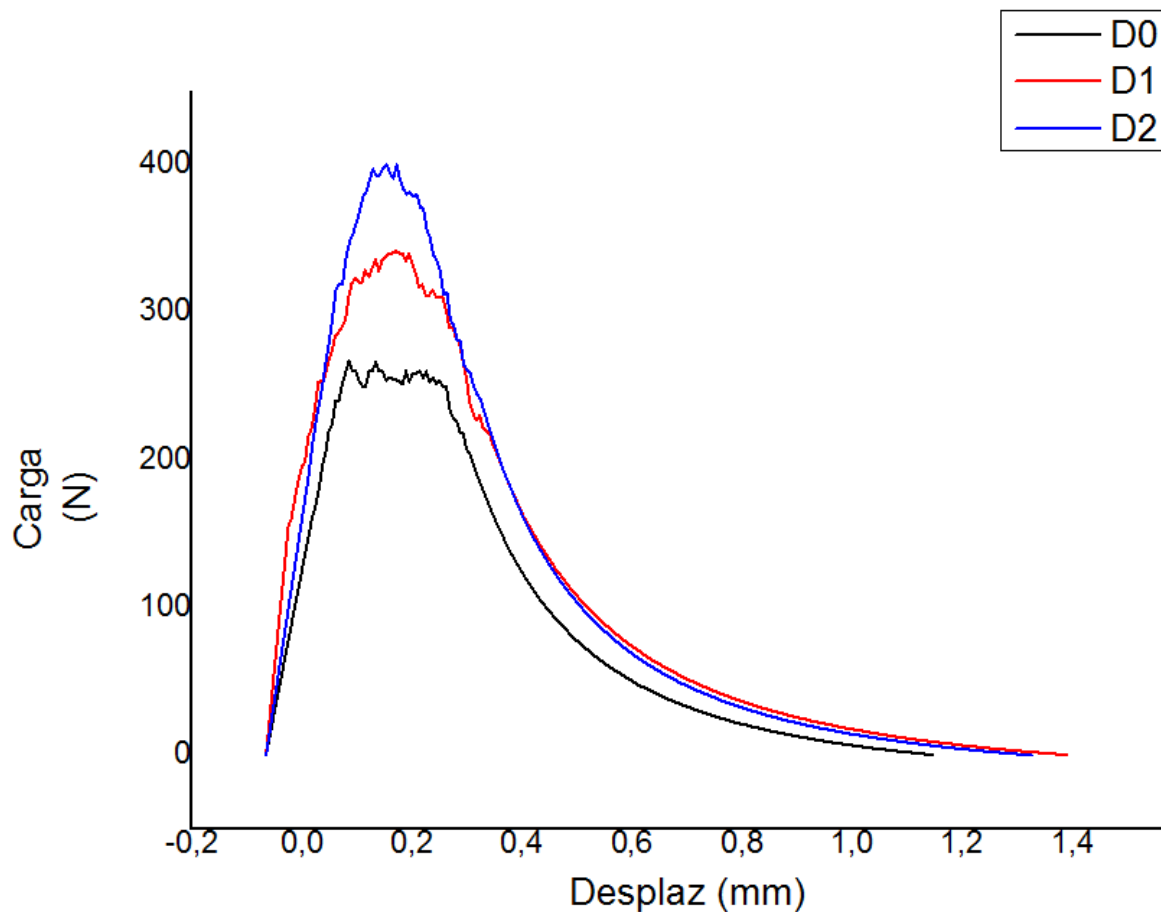


Ilustración 6.3: Influencia fibras sobre  $G_f$  - probetas a  $T=500^\circ\text{C}$  (Medida Residual Corregida)

A  $500^\circ\text{C}$  de temperatura, la dosificación sin fibras D0, ha sufrido elevado daño por el efecto spalling. Este hecho se ve reflejado en la carga de pico, siendo la de D0, la menor de las tres. Como las fibras ya se encuentran derretidas, los desplazamientos últimos son muy similares. También podemos apreciar mayor área encerrada bajo las curvas D1 y D2, y por tanto mayor energía de fractura. A su vez se observa que a mayor longitud de fibra, mayor energía de fractura (ver ilustración 6.3).

## 6.2.4 EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA DE FRACTURA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

Los resultados expresados en el apartado 5.2.4 presentan unas desviaciones inaceptables, por esta razón en este apartado se van a representar los valores que presenten una desviación menor que el 15% y los valores que sean acorde a los estudios de fractura existentes para este campo (8), (31).

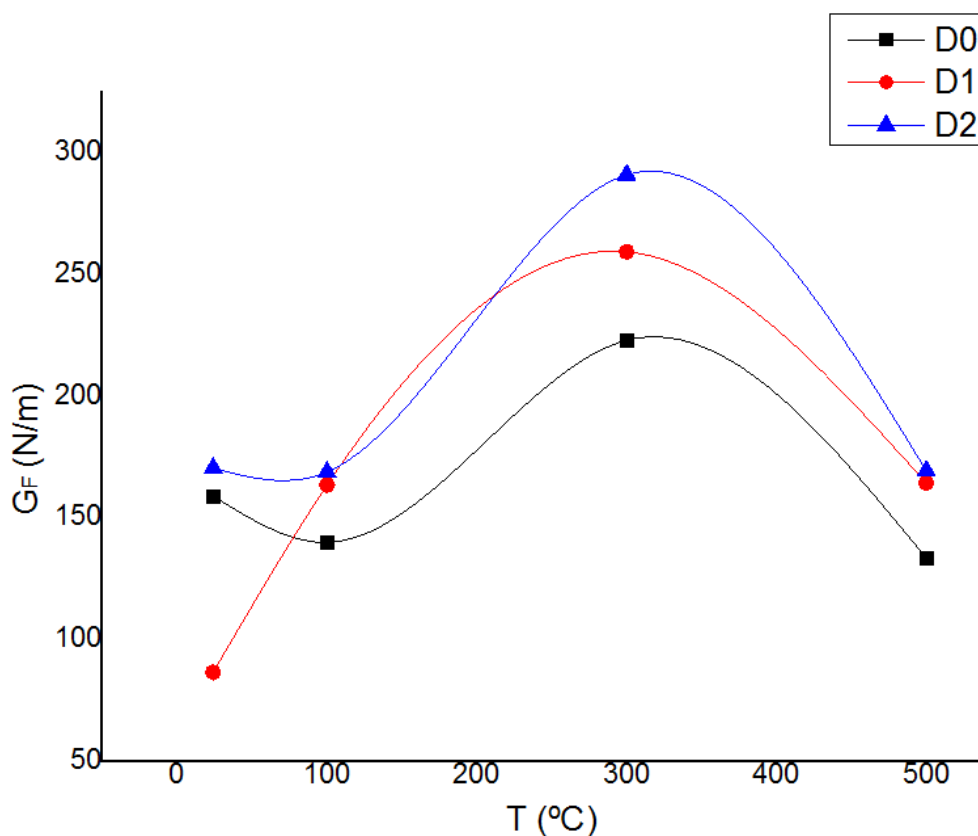


Ilustración 6.4: Energía de fractura ( $G_f$ ) en función de la Temperatura para D0, D1 Y D2

Tabla 24: Energía de fractura ( $G_f$ ) en función de la Temperatura para D0, D1 Y D2

	D0	D1	D2
T(°C)	Gf(N/m)	Gf(N/m)	Gf(N/m)
24	158,78017	86,51329	170,26056
100	139,82088	163,27973	168,67178
300	222,69245	258,94247	290,5709
500	133,33163	164,12541	169,19542

Se comienza describiendo la dosificación sin fibras D0. En el primer rango de temperaturas ( $T_A \rightarrow 100^\circ\text{C}$ ), se observa una pequeña caída en el valor de  $G_F$  (ver ilustración 6.4 y tabla 25).

Esta caída también fue apreciada por Bicanic. La explicación es que a esas temperaturas el hormigón no está muy dañado, por lo que el vapor de agua en el interior aumenta su presión, al no poder salir fácilmente. Por tanto, aunque se alcanza el equilibrio térmico, la humedad de la superficie se evapora con facilidad, pero la del interior queda retenida. La elevada humedad generalmente reduce la resistencia del hormigón contra el fallo, esto hace que, una vez enfriado, el hormigón presente un comportamiento más frágil, como se apreciaba en las curvas carga-desplazamiento, disminuyendo

levemente  $G_F$  en este intervalo.

La causa de que la disminución sea pequeña, es debido a que la temperatura de ebullición del agua es de  $100^\circ\text{C}$ , por lo que a esas temperaturas no se evapora una gran cantidad de agua en la superficie, ni aumenta mucho la presión del vapor de agua.

Entre los  $100$  y  $300^\circ\text{C}$  se produce una recuperación de la energía de fractura. Esto probablemente se debe, a que a medida que aumenta la temperatura, el daño producido en el hormigón es mayor, dejando escapar la humedad más fácilmente. A estas temperaturas, el agua que se evapora es el agua capilar. El resultado una vez que se enfría, es un hormigón más dúctil, que proporciona una mayor energía de fractura residual, hecho que ya se apreciaba en las curvas carga-desplazamiento que se hacían menos esbeltas y más extendidas a medida que la temperatura del ensayo aumentaba. El spalling producido a estas temperaturas ya 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  $300^\circ\text{C}$ , la energía de fractura empieza a disminuir. Esta disminución se debe a que a estas temperaturas el agua capilar ya se ha evaporado y empieza a evaporarse primero el agua gel y más tarde el agua combinada, que causan la descomposición y degradación del hormigón, así como el aumento de las microgrietas, provocando que tras el enfriamiento del hormigón la  $G_F$  disminuya. Este efecto se suma al del daño causado por el spalling.

Para la dosificación D1, a temperatura ambiente se da una energía de fractura menor que para D0 (ver ilustración 6.4). Este hecho no es muy relevante, ya que cuando se empieza a incrementar la temperatura, D1 rápidamente sobrepasa a D0, por lo que prodía haber error en la toma del dato de  $G_F$  para temperatura ambiente y la falta de muestras no nos ha permitido corregirlo.

Como ya se ha demostrado en numerosos estudios (30), (31), la energía de fractura para las dosificaciones con fibras es mayor que para las dosificaciones con fibras, tal y como se puede observar en la ilustración 6.4.

Obviando la curva D1, cuyo resultado a temperatura ambiente no es fiable debido a la alta desviación, para la curva D0 y D2 se aprecia que la curva crece-decrece-crece con el aumento de la temperatura. Esto se debe a que para  $T < 300^\circ\text{C}$ , se favorece la hidratación, aumentando la fortaleza de la unión con los agregados y aumentando también la resistencia al agrietamiento. Sin embargo, para temperaturas mayores, la resistencia se reduce debido a los efectos de descomposición, deshidratación y formación de microcavidades. Este hecho fue recogido en los ensayos de Bicanic para el hormigón en frío.

En lo que respecta a la influencia de la longitud de la fibra, se observa que a mayor longitud de fibra, mayor energía de rotura, tal y como se recoge también en los estudios realizados por Héctor Cifuentes.

### 6.2.5 EVOLUCIÓN DE LA CARGA DE PICO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

Se observa que las curvas primero crecen hasta los  $100^\circ\text{C}$  y luego decrecen (ver ilustración 5.11). Esta evolución creciente decreciente coincide con las expuestas por Bicanic.

La adición de fibras en este caso, produce una leve disminución de la carga de pico. Un elevado porcentaje de adición de fibras, puede repercutir negativamente sobre el valor de la carga de pico, ya que las fibras al derretirse crean cavidades sin resistencia alguna, como ya se mencionó anteriormente, y esto produce que el valor de la carga de pico disminuya.

En el rango de temperaturas cercano a  $100^\circ\text{C}$ , la D1 presenta una carga de pico superior a D2, sin

embargo, para temperaturas mayores de 200°C, esto cambia, pasando ahora a ser superior la carga de pico de D2. Esto puede deberse a que a esas temperaturas, las fibras se encuentran ya derretidas y las cavidades que crean las fibras de 24 mm son más grandes y por tanto evacuaran mejor los gases internos, haciendo que D2 tenga un mejor comportamiento frente al spalling que D1, y por tanto, una carga de pico superior.

### 6.3 ENSAYO A COMPRESIÓN UNIAXIAL

Si se observa la ilustración 5.12, la dosificación sin fibras D0 presenta una resistencia a la compresión superior a la obtenida para las dosificaciones con fibras D1 y D2. Este hecho se puede deber al exceso de adición de fibras antes ya mencionado, que acarrea un comportamiento negativo respecto a este parámetro.

Si nos fijamos primeramente en la dosificación D0, se observa que a la temperatura de 100°C no se observa el descenso de la resistencia a compresión observado por Bicanic, si observándose sin embargo en las otras dos dosificaciones. La bajada de  $f_c$  a 100°C, se debe al exceso de tensiones producidas por los gases generados por la ebullición interna del agua, que al estar las probetas todavía poco dañadas, no pueden salir y aliviarlas. Sin embargo, para las tres dosificaciones si se produce el aumento de  $f_c$  en el rango de temperaturas de 100 a 300°C. Este aumento es debido a la hidratación que se produce en la pasta de cemento, que aumenta la resistencia de la matriz del hormigón (32), y a un mecanismo descrito por Nielsan y Bicanic, por el cual se produce un aumento de resistencia extra debido al engranamiento de las partículas.

Para  $T^a > 300^\circ\text{C}$ , la microfisuración es ya muy elevada, y unida a los procesos de deshidratación y descomposición de la masa de cemento, hacen que  $f_c$  disminuya.

### 6.4 ENSAYO A COMPRESIÓN UNIAXIAL CON TRANSDUCTORES CILÍNDRICOS

El objetivo de este apartado es la obtención del módulo elástico para todo rango de temperatura, a partir de los dos módulos elásticos obtenidos a temperatura ambiente, uno mediante el ensayo de compresión uniaxial con transductores cilíndricos y el otro mediante la pendiente de la curva  $P-\delta$  y aplicando el modelo de Jenq-Shah.

Una vez que se han obtenido los dos módulos elásticos a temperatura ambiente, cada uno por su método, se saca un factor  $\beta$  de correlación y mediante los módulos obtenidos a 100, 300 y 500°C por el modelo de Jenq-Shah, se obtienen por correlación los módulos de elasticidad del ensayo de compresión uniaxial para todo el rango de temperatura.

Si se observa la ilustración 5.13, a medida que la temperatura aumenta, el  $E_c$  disminuye, tal y como indican los estudios de Bicanic. Además de esto, el módulo empieza siendo mayor para la dosificación con fibras D0, hasta que se superan los 200°C, que desciende por debajo de las dosificaciones con fibras D1 y D2. También se observa que para todo rango de temperaturas, el  $E_c$  es mayor para la dosificación D2 (24 mm) que para la D1 (6mm).

La disminución de  $E_c$  es sinónimo de la disminución de la rigidez, y esta se debe a la microfisuración de la pasta de cemento causada por el calentamiento y enfriamiento de la probeta. Al aumentar la temperatura, también aumenta la microfisuración, por lo que la rigidez del hormigón disminuye. El efecto beneficioso de la fibras se empieza a observar a partir de los 200°C aproximadamente, quedando patente la mejora que el aumento de la longitud de a fibra ejerce sobre la microfisuración, ya que unas fibras más largás, ejercen más unión entre las partes fisuradas (32).

## 6.5 ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA

Mediante el ensayo brasileño, se obtiene la resistencia a tracción y con ella, la longitud característica del hormigón, parámetro muy interesante desde el punto de vista del análisis, ya que engloba el  $E_c$ , la  $f_{ct}$  y la  $G_f$ .

La longitud característica nos da una idea de lo dúctil o frágil que es el material, ya que hormigones con mayor  $f_{ct}$  y  $E_c$  (comportamiento más frágil), presentan valores de  $l_{ch}$  menores.

Observando la ilustración 5.14, los hormigones con fibras tienen mayores valores de longitud característica, y por tanto, presentan un comportamiento más dúctil. También se observa la influencia de la longitud de la fibra, a mayor longitud de fibra, el hormigón presenta un comportamiento más dúctil.

Si se comparan estos resultados con los obtenidos para la energía de fractura, parece lógica la bajada de la curva para la temperatura de 100°C. A 100°C las probetas no están lo suficientemente dañadas y los gases ocluidos no pueden salir con facilidad provocando un incremento de tensiones interno y por tanto un comportamiento más frágil.

## 7 CONCLUSIONES

En el proyecto presente se ha realizado el análisis de las propiedades en frío (propiedades residuales) de un hormigón autocompactante de alta resistencia reforzado con fibras de polipropileno a temperaturas de 100, 300 y 500°C. Además se ha estudiado la influencia de la adición de fibras de diferentes longitudes (6 y 24 mm) a la mezcla. De este estudio se han extraído las siguientes conclusiones importantes:

1. 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.
2. El aumento de la temperatura en el hormigón provoca una caída en la pendiente del tramo prepico de la curva P- $\delta$ . 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.
3. 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- $\delta$  se hacen más bajas y prolongadas.
4. La adición de fibras a la mezcla hace que el descenso de la pendiente de la curva P- $\delta$  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.
5. En lo que respecta a los desplazamientos últimos, hasta temperaturas cercanas a la temperatura de fusión del polipropileno, dotan al hormigón de una mayor capacidad de desplazamiento, al mantener las caras de las fisuras conectadas. A partir de la temperatura de fusión de la fibra, los desplazamientos de D0, D1 y D2 se van igualando. El aumento de la longitud de la fibra no se ha visto reflejado en el aumento de los desplazamientos últimos, hecho que contrasta con los resultados expuestos por Hector Cifuentes y Bicanic.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. A 100°C de temperatura, existe una pequeña caída de la energía de fractura. A esta temperatura, el hormigón no se encuentra todavía muy dañado y las fibras no están todavía derretidas, por lo que la evaporación del agua a 100°C genera vapor de agua que aumenta la presión en los poros y produce el

efecto spalling, que produce una pequeña disminución de la energía de fractura.

10. Entre los 100 y 300°C se produce una recuperación de la energía de fractura. Este hecho se debe a que a medida que aumenta la temperatura, el daño producido en el hormigón es mayor, dejando escapar la humedad más fácilmente. A estas temperaturas, el agua que se evapora es el agua capilar. El resultado una vez que se enfría, es un hormigón más dúctil, que proporciona una mayor energía de fractura residual, hecho que ya se apreciaba en las curvas carga-desplazamiento que se hacían menos esbeltas y más extendidas a medida que la temperatura del ensayo aumentaba. El spalling producido a estas temperaturas ya 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 300°C, la energía de fractura empieza a disminuir, debido a la deshidratación de la pasta de cemento y a la elevada descomposición y degradación del hormigón, unido al fuerte daño que el efecto spalling causa a estas temperaturas.

11. Las curvas  $f_c - T$  para las dosificaciones con fibras presentan un comportamiento decreciente-decreciente. La bajada de  $f_c$  a 100°C, se debe al exceso de tensiones producidas por los gases generados por la ebullición interna del agua, que al estar las probetas todavía poco dañadas, no pueden salir y aliviarlas. Sin embargo, para las tres dosificaciones si se produce el aumento de  $f_c$  en el rango de temperaturas de 100 a 300°C. Este aumento es debido a la hidratación que se produce en la pasta de cemento, que aumenta la resistencia de la matriz del hormigón, y a un mecanismo descrito por Nielsan y Bicanic, por el cual se produce un aumento de resistencia extra debido al engranamiento de las partículas. Para  $T > 300^\circ\text{C}$  el daño por spalling unido a la deshidratación y degradación de la pasta de cemento, provocan el declive de la resistencia a compresión.

12. 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.

13. 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).

14. A mayor longitud de fibra, el hormigón presenta un comportamiento más dúctil, es decir, tiene una longitud característica mayor.

15. La curva  $l_{ch} - T$  muestra una bajada del valor de la longitud característica para  $T=100^\circ\text{C}$ . Este hecho se debe a la oclusión del vapor de agua producido a esa temperatura, que aumenta las tensiones internas y genera un comportamiento más frágil del hormigón.



## REFERENCIAS

1. *Fracture energy of high-performance concrete at high temperatures up to 450°C: the effects of heating temperatures and testing conditions (hot and cold)*. **B. Zhang, N. Bicanic**. 5, June de 2006, Vol. Magazine of Concrete Research, págs. 277-288.
2. **Cifuentes Bulté, Héctor y Medina Encina, Fernando**. *Mecánica de la fractura aplicada al hormigón*. s.l. : Secretaría de publicaciones- Universidad de Sevilla, 2013.
3. *Fracture properties of normal and lightweight high-strength concrete*. **Tang.W.C, et al**. 60(4), s.l. : Magazine of Concrete Research, 2008, págs. 237-244.
4. *Hormigón de alta resistencia: Estado actual de conocimientos*. **J.M. Gálido, M.P. Alejos**. [ed.] Ministerio de Fomento. s.l. : CEDEX, 2000.
5. ACI Committee. *State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete*. ACI Journal, 1973, 544, págs. 730-732.
6. **Velázquez, Aurora Martín**. *Proyecto Fin de Carrera. Hormigones de alta resistencia reforzados con fibras de polipropileno sometidos a altas temperaturas*. 2008-2009.
7. *Fracture Mechanics and Structural Concrete*. **Karihaloo, B.L**. s.l. : Logman Scientific & Technical, 1995.
8. *Hormigón Reforzado con fibras de Polipropileno. Influencia de la Fibra sobre la Ductilidad y el Efecto Tamaño*. **F.Medina, H.Cifuentes**. [ed.] Grupo de Estructuras Escuela Superior de Ingeniería. s.l. : Universidad de Sevilla, 2006.
9. *Economically attractive field applications for self-consolidating concrete*. **DE Benedict, SJ Worsfold**. s.l. : Proceedings of SCC2005, 2005.
10. *El Hormigón Autocompactable: Tecnología Sostenible para el Sector de la Construcción*. **Pacios Álvarez, A**. 2003-2004.
11. *Self-Compacting Concrete*. **Sedran, T**. 1999.
12. *1 st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. **Petersson, Skarendahl and**. 1999.
13. *Efecto de la forma y el tamaño de la probeta en la Resistencia a compresión en hormigón de alta resistencia* . **J.Rodríguez, J.Ruiz, G.Ruiz**. s.l. : Hormigón y Acero, Abril-Junio de 2008, Vol. 59, págs. 77-86.
14. **Netherlands, Springer**. *Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three point bend test on notched*. s.l. : Materials and Structures, 1985. págs. 287-290. Vol. 18.
15. **Hormigón, Plataforma Europea del**. *Seguridad y protección completa frente al fuego con hormigón*. s.l. : ISSN, 2008. págs. 28-56. Vol. 916.
16. **Aitcin, P.C**. *The art and science of high-performance concrete*.
17. *Advances in Concrete Science and Technology*. (Ed), **O.K. Metha**. Rome : Proceedings of the M.Colleparidi Symposium, 1997, Vol. 10, págs. 107-124.
18. *Studies on the fire resistance of high resistance concrete at the national research council of Canada*. **Kodur, V.K.R**. s.l. : International workshop on the fire performance of high strength concrete.
19. *Effect of various moisture contents, variety and dosage of fibers an explosive spalling and residual compressive strength of high performance concrete subjected to high temperatures*. **Bian, S.H., y otros**. s.l. : Environmental ecology and technology of concrete, págs. pag 302-303, pag 618-623.

20. *Spalling and pore pressure in HPC at high temperature*. **Kalifa, P, Mennetau, M.D y Quenard, D.** 30, 2000, Vol. Cement and Concrete research.
21. *Effect of high temperature on concrete*. **Peng, F, y otros.** 302-303, 2006, Vol. Ky Engineering Materials. 138-149.
22. *Effect of temperature and humidity on fracture energy of concrete*. **Z.P. Bazant, P.C. Prat.** 4, s.l. : ACI Materials Journals, 1988, págs. 262-271.
23. *The effect of exposure to elevated temperatures on the fracture of plain concrete*. **Baker, G.** 190, 1996, Vol. RILEM Materials and Structures, págs. 383-388.
24. *Estudio sobre los mecanismos de fractura en hormigones reforzados sometidos a Spalling*. **Orozco, J., y otros.** 1, 2007, Vol. Anales de la Mecánica de Fractura, págs. 307-312.
25. *High temperature behaviour of HPC with polypropylene fibers from spalling to microstructure*. **Kalifa, P, Chéné, C y Gallé, G.** 31, 2001, Vol. Cement and Concrete research.
26. *Fibre mortar composites under thermal exposure*. **L. Sarvaranta, E. Jarvela, E. Mikkola.** Lyon : Proceedings of 2nd International Symposium on Textile Composites in Building Construction, June de 1992, págs. 47-56.
27. *Fibre mortar composites in fire conditions*. **L. Sarvante, E. Mikkola.** s.l. : Fire Mater, 1994, págs. 45-50.
28. *Fibre mortar composite under fire conditions. Effects of ageing and moisture content of specimens*. **L. Sarvaranra, E. Mikkola.** 27, 1194, Vol. Mater Struct.
29. *Fibers, percolation and spalling of high performance concrete*. **Bentz, D.** 3, 2000, Vol. ACI Mater.J.97, págs. 351-359.
30. **F. Medina, H. Cifuentes, J.R. Montero, J.L. Piqueras.** *Effect of the proprieties of fibers on size effect of high strength polypropylene fiber reinforced concrete*. s.l. : Universidad de Sevilla y Universidad de Granada.
31. **M. Espinar, H. Cifuentes.** *Hormigones de baja resistencia reforzados con fibras de polipropileno: Análisis experimental de la geometría de la fibra sobre las propiedades de la fractura*. Sevilla : Grupo de estructuras. Universidad de sevilla, 2008.
32. *Effects of fibres and rice husk ash on properties of heated HSC*. **Héctor Cifuentes, Carlos Leiva, Fernando Medina, Constantino Fernández-Pereira.** 4, 2012, Vol. Magazine of Concrete Research.

