

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

Análisis experimental del comportamiento de
hormigones de ultra-altas prestaciones a temperatura
elevada

Autor: Alicia Afán Torrijos

Tutores:

Héctor Cifuentes Bulté

José David Ríos Jiménez

**Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría
de Estructuras**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

Análisis experimental del comportamiento de hormigones de ultra-altas prestaciones a temperatura elevada

Autor:

Alicia Afán Torrijos

Tutores:

Héctor Cifuentes Bulté

Profesor Contratado Doctor

José David Ríos Jiménez

Predoctoral PIF FPI Ministerio

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Carrera: Análisis experimental del comportamiento de hormigones de ultra-altas prestaciones a temperatura elevada

Autor: Alicia Afán Torrijos

Tutores: Héctor Cifuentes Bulté
José David Ríos Jiménez

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

Presidente:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

AGRACEDIMIENTOS

De estos tres años que he estado en el grado, con lo que me quedo es con los profesores que realmente me han llegado a transmitir lo bonita que es la Ingeniería, y con aquellos compañeros que me han hecho sentir que estudiar Ingeniería no es una competición, sino una parte de nuestra vida en la que nos tenemos que ayudar mutuamente para conseguir llegar a ser algún día profesionales que trabajemos codo con codo.

Agradezco la ayuda ofrecida por Emilio, el Jefe de Taller del Laboratorio de Estructuras, por su paciencia con mi falta de experiencia en el laboratorio.

También agradecerles a mis tutores, Héctor Cifuentes, por el apoyo me ha dado durante la realización del TFG, y a mi cotutor, José David, por las horas que ha dedicado a solucionar mis dudas.

ÍNDICE

Resumen

Índice tablas

Índice figuras

Abreviaturas

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción..... | 1 |
| 2. Objetivos..... | 3 |
| 2.1. Objetivo principal..... | 3 |
| 2.2. Objetivo secundario..... | 3 |
| 3. Antecedentes..... | 5 |
| 3.1. Hormigón de ultra-altas prestaciones..... | 5 |
| 3.1.1. Fibras de acero..... | 6 |
| 3.1.2. Fibras de polipropileno..... | 7 |
| 3.2. Hormigón de ultra-altas prestaciones a temperatura..... | 8 |
| 3.3. Aplicaciones de hormigón de ultra-altas prestaciones..... | 9 |
| 4. Campaña experimental..... | 13 |
| 4.1. Introducción..... | 13 |
| 4.2. Fabricación de los hormigones..... | 13 |
| 4.3. Ensayos..... | 19 |
| 4.3.1. Ensayo compresión simple..... | 21 |
| 4.3.2. Ensayo determinación del módulo secante de elasticidad en compresión..... | 22 |
| 4.3.3. Ensayo método Barcelona modificado..... | 24 |
| 4.3.4. Ensayo de flexión en cuatro puntos | 25 |
| 4.4. Resultados..... | 27 |
| 4.4.1. Ensayo compresión simple..... | 27 |
| 4.4.2. Ensayo determinación del módulo secante de elasticidad en compresión..... | 30 |
| 4.4.3. Ensayo método Barcelona modificado..... | 33 |
| 4.4.4. Ensayo de flexión en cuatro puntos..... | 37 |

| | |
|--|-----------|
| 5. Tomografía computarizada (TAC) | 47 |
| 5.1. Obtención datos TAC..... | 47 |
| 5.2. Resultados TAC..... | 51 |
| 5.3. Análisis del efecto de las fibras..... | 57 |
| 6. Relación efectos resultados ensayos – resultados TAC | 59 |
| 6.1. Introducción..... | 59 |
| 6.2. Resistencia a compresión..... | 59 |
| 6.3. Módulo de deformación longitudinal..... | 60 |
| 6.4. Resistencia a tracción (Barcelona)..... | 60 |
| 6.5. Comportamiento en fractura (Ensayo flexión en 4 puntos)..... | 61 |
| 7. Conclusiones | 63 |
| 8. Desarrollos futuros | 65 |
| 9. Bibliografía | 67 |
| Anexo | 69 |
| 1. Curvas Ensayo Barcelona modificado..... | 69 |
| 1.1. Curvas P-S a temperatura ambiente..... | 69 |
| 1.2. Curvas P-S a 300°C..... | 73 |
| 2. Ensayo de flexión en 4 puntos..... | 76 |
| 2.1. Ley tensión-deformación a temperatura ambiente..... | 76 |
| 2.2. Ley tensión-deformación a 300°C..... | 77 |
| 2.3. Ley cohesiva tensión-apertura de fisura a temperatura ambiente..... | 78 |
| 2.4. Ley cohesiva tensión-apertura de fisura a 300°C..... | 78 |
| 3. Reportaje fotográfico campaña experimental..... | 79 |
| 3.1. Ensayo a compresión simple..... | 79 |
| 3.2. Ensayo Barcelona modificado..... | 80 |

RESUMEN

El siguiente documento consiste en el estudio experimental del comportamiento mecánico y en fractura de hormigones de ultra-alta resistencia reforzados con fibras de acero y polipropileno. Dicho trabajo se basa en realizar ensayos, tanto de compresión, tracción y flexotracción, a temperatura ambiente y a 300 °C, para verificar la mejora de propiedades mecánicas que presentan dichos hormigones con respecto a los hormigones convencionales y comprobar cómo se manifiesta la temperatura en ellos. Además, se analizará la influencia de la temperatura mediante el uso de tomografía computarizada (TAC). Con todo lo anterior, se interpretarán y relacionarán los datos obtenidos en laboratorio y los datos del TAC, y con ello, se expondrán las conclusiones más relevantes obtenidas a lo largo del desarrollo del trabajo.

ÍNDICE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Nomenclatura hormigones de ultra-alta resistencia..... | 13 |
| Tabla 2. Dosificación para las diferentes mezclas de hormigón de ultra-alta resistencia..... | 13 |
| Tabla 3. Ensayos realizados a TA y 300°C..... | 20 |
| Tabla 4. Resultados ensayo de compresión en probetas cúbicas..... | 27 |
| Tabla 5. Tabla resumen ensayo de compresión en probetas cúbicas..... | 30 |
| Tabla 6. Resultados ensayo para la obtención del módulo de deformación longitudinal..... | 31 |
| Tabla 7. Tabla resumen módulo de deformación longitudinal..... | 32 |
| Tabla 8. Resultados ensayo MDPT en probetas cúbicas DSL+PP..... | 35 |
| Tabla 9. Ley $\sigma - \epsilon$ ensayo de flexión en 4 puntos..... | 39 |
| Tabla 10. Ley $\sigma - w$ ensayo de flexión en 4 puntos..... | 42 |
| Tabla 11. Energía de fractura y longitud característica..... | 44 |
| Tabla 12. Datos zona objeto de estudio probetas TAC..... | 49 |
| Tabla 13. Porosidad de DSL+PP a temperatura ambiente y 300°C..... | 52 |
| Tabla 14. Porosidad de los distintos UHPFRC a temperatura ambiente y 300°C..... | 58 |
| Tabla 15. Relación resistencia a compresión y porosidad..... | 59 |
| Tabla 16. Relación resistencia a tracción (Barcelona) y porosidad..... | 60 |
| Tabla 17. Relación parámetros del comportamiento en fractura y porosidad..... | 61 |

ÍNDICE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 a) y b). Fibras de acero cortas y fibras de acero largas..... | 6 |
| Figura 2. Relación tamaño fibras de acero cortas y fibras de acero largas..... | 7 |
| Figura 3. Fibras de polipropileno..... | 7 |
| Figura 4. Pasarela de UHPFRC sobre el Barranco de las Ovejas (Alicante). Fuente: Google..... | 9 |
| Figura 5. Pasarela sobre la V-21 en Puçol. Fuente: Google..... | 10 |
| Figura 6 a) y b). Haneda Airport Runway D, Tokyo. Fuente: (Mizukami <i>et al</i> ,2010)..... | 10 |
| Figura 7. Modelo físico para la unidad de almacenamiento de energía. Fuente: (Tamme <i>et al</i> ,2003)..... | 11 |
| Figura 8. Arena AS-F, arena AS-V, hueso de sílice, escoria sin caliza y cemento. Fotografía tomada <i>in situ</i> | 14 |
| Figura 9. Superplastificante BASF 325 y agua. Fotografía tomada <i>in situ</i> | 15 |
| Figura 10 a) y b). Fibras de acero de (a) 12 mm OL 13/0.2 y fibras de acero de (b) 30 mm RC 80/30 BP. Fotografía tomada <i>in situ</i> | 15 |
| Figura 11. Antes de mezclar componentes secos. Fotografía tomada <i>in situ</i> | 16 |
| Figura 12. Mezcla con adición superplastificante y agua. Fotografía tomada <i>in situ</i> | 16 |
| Figura 13. Hormigón de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras en estado fresco. Fotografía tomada <i>in situ</i> | 17 |
| Figura 14. Moldes de las probetas de hormigón. Fotografía tomada <i>in situ</i> | 17 |
| Figura 15. Probetas de hormigón de ultra-altas prestaciones reforzados con fibras. Fotografía tomada <i>in situ</i> | 18 |
| Figura 16. Probetas de hormigón de ultra-altas prestaciones reforzados con fibras en baño térmico. Fotografía tomada <i>in situ</i> | 18 |
| Figura 17. Panel de control Servosis y Prensa hidráulica Servosis modelo MES 300. Fotografía tomada <i>in situ</i> | 19 |

| | |
|---|----|
| Figura 18 a) y b). Horno y máquina servo hidráulica modelo ME 406/15 marca Servosis. Fotografía tomada <i>in situ</i> | 20 |
| Figura 19. Ensayo de compresión simple. Fuente: Fotografía tomada <i>in situ</i> | 22 |
| Figura 20 a) y b). Probeta DSL+PP ensayada compresión simple. Fuente: Fotografía tomada <i>in situ</i> | 22 |
| Figura 21 a) y b). Instrumentación de medida (a) y ensayo de determinación del módulo de deformación (b). Fuente: Fotografía tomada <i>in situ</i> | 23 |
| Figura 22. Ciclos de carga para la determinación del módulo de deformación. Fuente: Norma UNE-EN 12390-13..... | 24 |
| Figura 23. Ensayo MDPT. Fuente: Fotografía tomada <i>in situ</i> | 25 |
| Figura 24 a) y b). Ensayo de flexión en 4 puntos en horno a 300 °C. Fuente: Fotografía tomada <i>in situ</i> | 25 |
| Figura 25. Ensayo flexión en cuatro puntos..... | 26 |
| Figura 26. Probetas DL (izquierda) y DS (derecha) ensayadas a flexión en 4 puntos. Fuente: Fotografía tomada <i>in situ</i> | 26 |
| Figura 27. Etapas curva P-S DSL+PP..... | 33 |
| Figura 28 a) y b). Curva P-S sin rectificar y curva P-S rectificada DSL+PP | 33 |
| Figura 29 a) y b). DSL+PP cara superior e inferior. Fuente: Fotografía tomada <i>in situ</i> | 34 |
| Figura 30. Fibras en grietas de probeta UHPFRC-DSL+PP. Fuente: Fotografía tomada <i>in situ</i> | 34 |
| Figura 31 a) y b). $\sigma - \epsilon$ (a) y $\sigma - w$ (b) obtenidas mediante ensayo de flexión en cuatro puntos. Fuente: (López et al, 2016)..... | 37 |
| Figura 32. Etapas $\sigma - \epsilon$ ensayo de flexión en cuatro puntos..... | 38 |
| Figura 33 a) y b). Ley $\sigma - \epsilon$ DS (a) y ley $\sigma - \epsilon$ DS_300 (b)..... | 40 |
| Figura 34 a) y b). Ley $\sigma - \epsilon$ DL (a) y ley $\sigma - \epsilon$ DL_300 (b)..... | 41 |
| Figura 35 a) y b). Ley $\sigma - \epsilon$ DSL (a) y ley $\sigma - \epsilon$ DSL_300 (b)..... | 41 |
| Figura 36 a) y b). Ley $\sigma - w$ cohesiva DS (a) y ley $\sigma - w$ cohesiva DS_300 (b)..... | 43 |
| Figura 37 a) y b). Ley $\sigma - w$ cohesiva DL (a) y ley $\sigma - w$ cohesiva DL_300 (b)..... | 44 |
| Figura 38 a) y b). Ley $\sigma - w$ cohesiva DSL (a) y ley $\sigma - w$ cohesiva DSL_300 (b)..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 39. Equipo de inspección de rayos X, modelo Y.Cougar SMT de la compañía YXLON. Fuente: Fotografía tomada <i>in situ</i> | 47 |
| Figura 40 a) y b). a) Muestras para ensayos con TAC y b) esquema de la extracción de muestras para TAC DSL+PP. Fotografía tomada <i>in situ</i> | 48 |
| Figura 41. Plano muestra DSL+PP. Fuente: IMAGEJ..... | 48 |
| Figura 42. Zona objeto de estudio. Fuente: Elaboración propia..... | 49 |
| Figura 43 a) y b). a) Fibras de acero y b) Porosidad de la matriz de hormigón. Fuente: AVIZO 8.1..... | 50 |
| Figura 44 a), b) y c). Poros para diferentes umbrales de escalas de grises a) umbral 5500, b) 5900 y c) 6250 para la muestra B-I-2 CL6. Fuente: AVIZO 8.1..... | 50 |
| Figura 45. Curva de porosidad - umbral de escala de grises. Fuente: ORIGIN..... | 51 |
| Figura 46 a) y b). Imagen de la microestructura de un UHPC-PP (a) a temperatura ambiente (b) tras la exposición a 250°C. Fuente: (Li <i>et al</i> ,2018)..... | 52 |
| Figura 47 a), b), c), d), e) y f). Distribución de poros 3D DSL+PP a TA y UHPFRC-DSL+PP a 300°C. Fuente: AVIZO 8.1..... | 52 |
| Figura 48 a), b) y c). Distribución de fibras 3D muestras DSL+PP. Fuente: AVIZO 8.1..... | 53 |
| Figura 49. Distribución de diámetro equivalente de UHPFRC a temperatura ambiente y 300°C densidad de poros..... | 55 |
| Figura 50. Distribución de diámetro equivalente de UHPFRC a temperatura ambiente y 300°C porcentaje de poros..... | 55 |
| Figura 51. Distribución volumen poros de UHPFRC a temperatura ambiente y 300°C densidad de poros..... | 56 |
| Figura 52. Distribución volumen poros de UHPFRC a temperatura ambiente y 300°C porcentaje de poros..... | 57 |

LISTADO DE NOTACIONES

| | |
|---------------------|---|
| UHPC | Hormigón de ultra-alta resistencia sin refuerzo con fibras. |
| UHPRFC | Hormigón de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras. |
| DO | UHPC. |
| DS | UHPRFC con fibras de acero cortas. |
| DL | UHPRFC con fibras de acero largas. |
| DSL | UHPRFC con mezcla de fibras de acero cortas y largas y fibras de polipropileno. |
| DSL+PP | UHPRFC con mezcla de fibras de acero cortas y largas y fibras de polipropileno. |
| MDPT | Ensayo de doble punzonamiento multidireccional. Ensayo Barcelona modificado. |
| TA | Temperatura ambiente |
| ICITECH | Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón |
| E_c | Módulo de deformación longitudinal. |
| f_c | Resistencia a compresión. |
| f_{ct} | Resistencia residual a tracción. |
| P-S | Curva fuerza-desplazamiento del actuador. |
| $\sigma - \epsilon$ | Ley tensión-deformación |
| $\sigma - w$ | Ley tensión-apertura de fisura. |
| f_t | Resistencia a primera fisuración. |
| $f_{t,u}$ | Resistencia última a tracción. |
| $\epsilon_{t,u}$ | Deformación última. |
| $\epsilon_{t,máx}$ | Deformación máxima. |
| $w_{máx}$ | Apertura máxima de fisura. |
| G_F | Energía de fractura. |

| | |
|----------|---|
| l_{ch} | Longitud característica. |
| PP | Polipropileno |
| UPV | Universitat Politècnica de València |
| JSCE | Japan Society of Civil Engineers |
| TFG | Trabajo fin de grado |
| TAC | Tomografía computarizada |
| CITIUS | Centro de investigación tecnológica e innovación de la Universidad de Sevilla |
| ZPF | Zona de proceso de fractura. |

1. INTRODUCCIÓN

Los hormigones de ultra-altas prestaciones son aquellos que poseen propiedades mecánicas mejoradas en relación a los hormigones convencionales. Dichos hormigones se caracterizan por tener una relación agua-cemento por debajo de 0.2, y a la inclusión de componentes de tamaño de partícula muy pequeño en comparación con los empleados en hormigones convencionales (Cai *et al*,2017), lo que se manifiesta en llegar a alcanzar elevada resistencia a compresión, de más de 200 MPa (Wille *et al*,2012), y también un aumento significativo de la resistencia a tracción, aunque menos proporcional que el producido en compresión. La elevada densidad de la matriz de hormigón proporciona alta durabilidad y fragilidad (Cao *et al*,2014). Debido al comportamiento frágil de dichos hormigones se refuerza la matriz con algún tipo de armadura o fibras estructurales, normalmente fibras de acero, y con ello aumentar la ductilidad y la resistencia.

El tener una porosidad muy baja, que es favorable para su comportamiento a temperatura ambiente porque le confiere mayor capacidad resistente, es desfavorable a elevadas temperaturas por el efecto *spalling* (Akca *et al*,2018), el cual es un fenómeno en el que se produce una rotura explosiva del hormigón cuando este se ve afectado por elevadas temperaturas. Además, como se muestra en varios estudios, el empleo de fibras puede modificar la morfología de los poros (Poveda *et al*, 2017), variando la porosidad, que es un parámetro que influye en la conductividad térmica del hormigón y por ello en la exposición de la matriz de hormigón a temperatura y, por tanto, influye en el fenómeno del *spalling*.

A pesar de existir varias investigaciones acerca del comportamiento mecánico y las propiedades de fractura de los hormigones de ultra-altas prestaciones reforzados con fibras de acero (UHPFRC), no hay demasiados estudios acerca de la relación existente entre las propiedades del UHPFRC en relación con su porosidad, y de cómo afecta la influencia de la temperatura a la relación entre las propiedades mecánicas y la porosidad.

Por ello este documento se centrará en el análisis de los hormigones de ultra-alta resistencia reforzados con fibras de acero y polipropileno y cómo afecta la influencia de temperatura de 300°C a sus propiedades mecánicas y a su porosidad. Como ya se ha indicado, existen numerosas investigaciones acerca de UHPFRC a temperatura ambiente, aunque no se puede decir lo mismo de su comportamiento a elevadas temperaturas.

La razón de dicho estudio radica en la falta de información acerca de la influencia de las fibras de acero en las propiedades mecánicas y la porosidad a temperatura elevada. Por el contrario, de las fibras de polipropileno (PP) se cuenta con bastante información acerca de su repercusión en la matriz de hormigón cuando esta se ve afectada por el daño térmico, aunque no en hormigones de ultra-altas prestaciones.

Para poder llevar a cabo dicha investigación se han realizado una serie de apartados con el fin de ir recabando información para llegar a una serie de conclusiones:

- En el tercer apartado se realiza un estudio previo de los hormigones de ultra-alta resistencia basándose en la información de múltiples referencias, en las que muestran las ventajas e inconvenientes que presentan dichos hormigones con respecto a los hormigones convencionales. También se pondrán algunos ejemplos de aplicaciones reales.

- En el cuarto apartado, se describe la campaña experimental llevada a cabo para obtener las propiedades mecánicas, tanto a temperatura ambiente como a 300°C, con el fin de analizar cómo afectan los distintos tipos de fibras a dichas propiedades.
- En el quinto apartado, se analiza el daño térmico de la matriz de hormigón y para ello se empleará el uso de la tomografía computarizada.
- En el sexto apartado, el más relevante del documento, se relacionan los datos del cuarto y quinto apartado, y con ello se podrá llegar a unas conclusiones que sirvan de base a futuras investigaciones.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal del trabajo a desarrollar es conocer cómo afecta la temperatura a las propiedades mecánicas y de fractura, y a la matriz de los hormigones de ultra-altas prestaciones reforzados con diferentes tipos de fibras, tanto de acero como de polipropileno, y además ver las propiedades que le confieren la adición de dichas fibras.

2.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

Para poder llevar a cabo el objetivo principal se requieren hacer una serie de acciones con la finalidad de obtener todos los datos necesarios que se deben analizar:

- Fabricación de hormigones de ultra-altas prestaciones reforzados con diferentes tipos de fibras de acero y polipropileno. Para este estudio, las fibras de acero utilizadas son el modelo OL 13/0.2 (13 mm de longitud) y el RC 80/30 CP (30 mm de longitud) de Bekaert. Las fibras de polipropileno tienen un diámetro de 8.9 dtex y 24 mm de longitud de Geotexan. La finalidad es la fabricación de 5 probetas prismáticas, 4 cúbicas y 2 cilíndricas para cada tipo de hormigón.
- Realizar ensayos experimentales de caracterización mecánica y en fractura de los hormigones de ultra-altas prestaciones reforzados con fibras de acero, OL 13/0.2 (50%) y RC 80/30 CP, mezcladas al 50 % y fibras de polipropileno de 24 mm de longitud.
- Analizar la influencia de la temperatura en las propiedades mecánicas y de fractura de hormigones de ultra-altas prestaciones reforzados con fibras de acero y de polipropileno.
- Analizar el daño térmico generado en la matriz mediante un análisis tomográfico de rayos X y relacionar el comportamiento mecánico y en fractura entre dichos hormigones a temperatura ambiente y exactamente las mismas muestras tras ser calentadas a 300°C con el daño térmico de la matriz.

Se van a estudiar cinco tipos de hormigones con igual dosificación, los cuáles difieren unos de otros en las fibras que contienen.

- DO: Hormigón de referencia sin fibras.
- DS: Hormigón de ultra-altas prestaciones con fibras de acero cortas, OL 13/0.2 (13 mm de longitud).
- DL: Hormigón de ultra-altas prestaciones con fibras de acero largas, RC 80/30 CP (30 mm de longitud).
- DSL: Hormigón de ultra-altas prestaciones con mezcla de fibras de acero cortas y largas.
- DSL+PP: Hormigón de ultra-altas prestaciones con mezcla de fibras de acero cortas y largas y fibras de polipropileno.

3. ANTECEDENTES

3.1. HORMIGÓN DE ULTRA-ALTAS PRESTACIONES

En la actualidad son mayores los requerimientos exigidos a las estructuras que se proyectan y, por tanto, a los materiales estructurales, los cuáles se encuentran en continuos procesos de investigación. Este es el caso del hormigón, el cual es objeto de numerosos estudios con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas y de fractura, así como su durabilidad, y con ello poder alcanzar nuevos retos estructurales.

Se entiende como hormigones de ultra-altas prestaciones o ultra-hormigones a aquellos que presentan una serie de características mejoradas con respecto a los hormigones convencionales, llegando a alcanzar valores de resistencia a compresión de más de 200 MPa (Graybeal, 2007) y también un significativo incremento de resistencia a tracción, bajo procesos de amasado y fraguado convencionales. Dichos hormigones se caracterizan por tener una matriz muy densa debido a la baja relación agua-cemento, normalmente inferior a 0.2, y a la inclusión de componentes de tamaño de partícula muy pequeño en comparación con los empleados en hormigones convencionales (Song *et al*, 2018). La ventaja de ello se refleja en la obtención de una mayor resistencia y durabilidad. Sin embargo, la baja porosidad conlleva un comportamiento del ultra-hormigón mucho más frágil que el de un hormigón convencional (Yousefieh *et al*, 2017).

El defecto añadido del comportamiento frágil, que adquiere este tipo de hormigones, se manifiesta de dos formas. En primer lugar, en la rotura a compresión simple, que es mucho más explosiva y, en segundo lugar, se manifiesta en las curvas tensión-flecha, que, aunque alcanzan tensiones máximas más elevadas, las deformaciones y desplazamientos a tensiones últimas son inferiores en comparación con hormigones convencionales.

Debido al significativo aumento en la fragilidad de estos hormigones es necesario su refuerzo para mejorar la ductilidad y es muy común que sean reforzados con fibras de acero. La adición de fibras durante el proceso de amasado permite que se distribuyan de manera uniforme en la matriz, aunque aleatoriamente, y que el comportamiento mecánico y en fractura del hormigón sea más homogéneo. La presencia de fibras de acero aumenta la ductilidad y, sobre todo, y de manera muy significativa, la resistencia a tracción, pudiendo llegar a alcanzar valores alrededor de los 25 MPa. En cuanto a las propiedades de fractura, como la energía de fractura y la longitud característica del hormigón también le aporta un incremento significativo debido a la presencia de las fibras de acero. Dado el comportamiento frágil de dichos hormigones se podría decir que parece inconcebible el uso de ellos sin el refuerzo de la matriz con algún tipo de armadura o fibras estructurales.

Aunque las fibras más utilizadas son las de acero, por motivos estructurales, existen fibras de distinta naturaleza que también pueden ser añadidas para mejorar otras propiedades del hormigón. Por ejemplo, las fibras de polipropileno se suelen añadir en los hormigones para prolongar el tiempo de vida útil de una estructura sometida a alta temperatura antes de que ocurra una rotura por desconchamiento (*spalling*). Las características geométricas y especificaciones de dichas fibras vienen indicadas en las normas UNE-EN 14889-1:2008 y UNE-EN14889:2008 respectivamente.

3.1.1. Fibras de acero

Por un lado, la adición de las fibras de acero se manifiesta en una mejora notable de las propiedades mecánicas, especialmente la resistencia a tracción y las propiedades de fractura. Ello está relacionado con el efecto cosido de las fibras que favorece el comportamiento en fractura del hormigón (Cifuentes *et al*, 2013).

Según la norma UNE-EN 14889-1:2008, las fibras de acero se clasifican en grupos en función del material empleado para su producción:

Grupo I: Alambres estirados en frío.

Grupo II: Láminas cortadas.

Grupo III: Extractos fundidos.

Grupo IV: Conformados en frío.

Grupo V: Aserrados de bloques de acero.

En cuanto a la forma de dichas fibras, la norma establece que deben ser rectas o deformadas. Dicho parámetro tiene gran importancia en las características de adherencia de la fibra con el hormigón. Cabe destacar dos tipos de fibras metálicas que se suelen emplear, siendo una de ellas la fibra de acero recta y corta, FIGURA 1.a), y la fibra de acero larga con extremos en forma de gancho, FIGURA 1.b). Con las primeras se obtienen mayores cargas máximas pues retrasa la macrofisuración, y las segundas se emplean para mejorar la capacidad de deformación y energía de fractura pues tienen mayor efectividad con las macrofisuras. Se suelen emplear la combinación de ambas con el objetivo de aprovechar la mejora que proporciona ambos tipos de fibras (D.-Y. *et al*,2016).



(a)

(b)

FIGURA 1 a) y b). Fibras de acero cortas y fibras de acero largas.



FIGURA 2. Relación tamaño fibras de acero cortas y fibras de acero largas.

La norma establece otros parámetros que se deben tener en cuenta como son la longitud, el diámetro de las fibras y la relación de aspecto (FIGURA 2). La EHE-08 indica que la longitud de la fibra (l_f), debe ser como mínimo, 2 veces el tamaño del árido mayor, aunque lo usual es el empleo de longitudes comprendidas entre 2,5 a 3 veces el tamaño máximo de árido. La longitud debe ser suficiente para garantizar la adherencia con el hormigón y evitar arrancamientos fácilmente.

Además, a igualdad de longitud, a menor diámetro se aumenta el número de fibras por unidad de volumen y, por tanto, se consigue un comportamiento más eficiente y una mejor distribución de las tensiones.

3.1.2. Fibras de polipropileno

Por otro lado, la adición de fibras de polipropileno (FIGURA 3) no mejora las propiedades mecánicas a temperatura ambiente. No obstante, presenta una serie de ventajas con respecto al empleo de las fibras metálicas, como son la ausencia de la corrosión y, por tanto, contribuye a la mejora de la durabilidad, menor peso añadido al hormigón, reducen la fisuración por retracción plástica, y mejora del comportamiento mecánico cuando el hormigón está sometido a elevadas temperaturas (Cifuentes *et al*, 2012).

Según la norma UNE-EN 14889-2:2008, las fibras poliméricas se clasifican en función de su forma física:

Clase Ia: Micro fibras: < 0,30 mm de diámetro; Mono-filamentosas.

Clase Ib: Micro fibras: < 0,30 mm de diámetro; Fibrilosas.

Clase II: Macro fibras: > 0,30 mm de diámetro.



FIGURA 3. Fibras de polipropileno.

Según lo establecido por la EHE-08, las macro-fibras colaboran estructuralmente, presentando una longitud comprendida entre 20 y 60 mm. En cuanto a las micro-fibras, no tienen ninguna función estructural, pero se emplean para reducir la fisuración y para mejorar el comportamiento frente al fuego.

En este documento se estudiará el comportamiento mecánico y en fractura de hormigones de ultra-altas prestaciones reforzados con diferentes tipos de fibras y sometidos a diferentes temperaturas, y se comprobará las ventajas que ello conlleva con respecto a los hormigones de ultra-altas prestaciones no reforzados con fibras y los hormigones convencionales.

3.2. HORMIGÓN DE ULTRA-ALTAS PRESTACIONES A TEMPERATURA

Los hormigones de ultra-altas prestaciones presentan una porosidad muy baja, lo que es favorable para su comportamiento a temperatura ambiente porque le confiere mayor capacidad resistente, pero desfavorable a elevadas temperaturas por el efecto “*spalling*”. Cuando los hormigones están sometidos a altas temperaturas se producen dos fenómenos fundamentalmente:

a) El primero es un proceso termo-mecánico debido al gradiente térmico que se produce entre el interior y el exterior del material cuando el hormigón está sometido a temperatura (Akca *et al*, 2018). Ello está relacionado con la permeabilidad, es decir, la medida de la capacidad de un material poroso para transmitir fluidos sometidos a gradiente de presión. Por lo tanto, la morfología del poro es un factor importante que influye en la conductividad térmica del hormigón (Tanyildizi *et al*, 2014).

b) El segundo es un proceso termo-hidráulico relacionado con la humedad existente en la matriz de hormigón. Cuando los hormigones están sometidos a temperatura elevada se observan dos etapas diferenciadas. La primera etapa debida a la evaporación del agua libre, que se produce entre los 20-100°C. La segunda etapa está relacionada con la deshidratación del gel C-S-H a temperaturas entre 160-300°C (García, 2011).

Ambos fenómenos generan tensiones dentro de la matriz de hormigón. Por un lado, porque estos hormigones tienen una estructura porosa muy densa, que no permite la liberación del vapor a presión generado por la el agua libre evaporada y la deshidratación química y, por otro lado, las tensiones generadas por gradiente térmico. Cuando dichas tensiones alcanzan la tensión de rotura hace que se produzca desprendimiento a altas temperaturas dando lugar a una rotura explosiva (*spalling*).

Debido a que las estructuras de hormigón, a lo largo de su vida útil pueden estar sometidas a la influencia de elevadas temperaturas, como es el caso de un incendio, se deben plantear una serie de sistemas de protección para evitar que las propiedades mecánicas se vean afectadas y en definitiva el colapso de la estructura prematuro para así evitar la pérdida de vidas humanas. El objetivo es que las propiedades mecánicas del hormigón no se vean drásticamente afectadas durante el tiempo de evacuación de las personas y que, una vez extinguido el fuego, se pueda continuar empleando la estructura sin necesidad de demolerla, lo que económicamente es favorable.

Un sistema de protección pasivo es el uso de barreras térmicas en la superficie de hormigón como es el caso del empleo de materiales inertes al fuego o con alto coeficiente de aislamiento térmico. Dichos recubrimientos pueden encontrarse en forma de placas o como morteros proyectados sobre la superficie.

Pero si se plantea un sistema de protección activo incluido en la propia matriz de hormigón, se habla del empleo de fibras. El hormigón reforzado con fibras (FRC: Fiber Reinforced Concrete), es aquel al que se le incluyen las fibras en el momento del amasado y estas están distribuidas homogéneamente en la matriz de hormigón proporcionando mayor resistencia frente a tensiones de tracción.

La adición de fibras de polipropileno ayuda a reducir el daño térmico ya que funden a 170°C aproximadamente (Varona *et al*, 2018), creando una red de conductos internos por los que la presión de vapor interna se evacua y las tensiones generadas por la influencia de la temperatura se reducen y retrasan.

Con respecto a la influencia de las fibras de acero en las propiedades a temperatura, no existe demasiada información sobre ello. Por dicho motivo, este documento estudia cómo repercute el empleo de las fibras de acero en el daño térmico que se produce en el hormigón.

3.3. APLICACIONES DE LOS HORMIGONES DE ULTRA-ALTAS PRESTACIONES

Las ventajas de las propiedades mecánicas de los hormigones de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras con respecto a los hormigones convencionales hace útil su empleo en diferentes construcciones civiles. A continuación, se van a señalar algunos ejemplos reales donde se ha llevado a cabo su empleo en obra civil:

1) La primera utilización de UHPFRC en pasarelas de España, fue promovida por el grupo de investigación en tecnologías de hormigones especiales del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universitat Politècnica de València (UPV), el cual ha llevado a cabo aplicaciones del UHPFRC en dos intervenciones:

La primera en Alicante, en 2014, se construyó una pasarela con una luz de 42,81 metros (FIGURA 4), resuelta mediante una doble celosía Warren modificada de canto variable conectadas ambas mediante una celosía inferior y un tablero intermedio de 3 m de ancho. Dicha pasarela está compuesta íntegramente de hormigón de ultra-altas prestaciones con distintos tipos de fibras, convirtiéndose en la primera celosía en el mundo realizada en su totalidad con UHPFRC. La idea inicial era realizarla como una pasarela metálica, pero se descartó, ya que el buen comportamiento de dichos hormigones ante los agentes externos eliminaba prácticamente los costes de mantenimiento además de conferirle un carácter innovador a la obra. (Serna *et al*, 2015)



FIGURA 4. Pasarela de UHPFRC sobre el Barranco de las Ovejas (Alicante). Fuente: Google.

La segunda intervención, en Puçol (Valencia) se realizó una pasarela de UHPFRC de 33 metros de luz sobre la V-21 (FIGURA 5). El empleo de dicho material, se debe, al igual que el caso anterior, por el punto de vista de la durabilidad y por tanto el coste en el mantenimiento.



FIGURA 5. Pasarela sobre la V-21 en Puçol. Fuente: Google.

2) En Japón se han empleado losas prefabricadas de UHPFRC en la pista de aterrizaje D del aeropuerto de Haneda (FIGURA 6), el cual se sitúa sobre el río Tamagawa, Tokyo. La razón del uso de dichas losas radica en la reducción del peso propio de la plataforma en un 60% con respecto a losas prefabricadas con hormigón convencional ya que las losas de UHPFRC no requieren de armado, lo que se manifestó en la reducción de las dimensiones del resto de elementos estructurales y, por tanto, en el coste de la construcción. Otra de las razones que se ha indicado con anterioridad es la durabilidad de este material debido a su permeabilidad. Además, este material fue recomendado por la Japan Society of Civil Engineers (JSCE 04). (Mizukami *et al*,2010)



FIGURA 6 a) y b). Haneda Airport Runway D, Tokyo. Fuente: (Mizukami *et al*,2010)

3) Un ejemplo del empleo de hormigón sometido a temperatura es el sistema de almacenamiento térmico sensible en medio sólido realizado en un bucle de prueba cilindro-parabólica en la Plataforma Solar de Almería. Dicho sistema está compuesto por cuatro bloques de almacenamiento, dos de cerámica colada y otros dos con hormigón a alta temperatura como material de almacenamiento. Como se puede observar en la FIGURA 7, las unidades de almacenamiento de hormigón son atravesadas por tubos paralelos por los que circula aceite que actúa como fluido de transferencia del calor (Tamme *et al*, 2003).

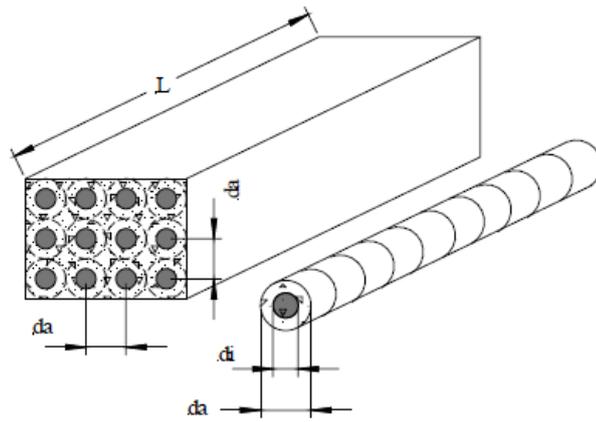


FIGURA 7. Modelo físico para la unidad de almacenamiento de energía. Fuente: (Tamme *et al*,2003)

4. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se va a describir tanto el proceso de fabricación de los hormigones de ultra-altas prestaciones como cada uno de los ensayos que se han realizado para poder caracterizar el comportamiento mecánico y de fractura de dicho material.

La campaña experimental se ha llevado a cabo en el Laboratorio del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

A continuación, en la TABLA 1 se muestra la nomenclatura a emplear, a lo largo de todo el documento, para referirse a los diferentes tipos de hormigones de ultra-altas prestaciones que se van a emplear, los cuáles difieren unos de otros en las fibras que contienen.

TABLA 1. Nomenclatura hormigones de ultra-altas prestaciones.

| NOMENCLATURA | DENOMINACIÓN | ESTADO |
|--------------|--|---------------|
| DO | Hormigón de ultra-altas prestaciones sin reforzar | Ya fabricadas |
| DS | UHPFRC con fibras de acero cortas | A fabricar |
| DL | UHPFRC con fibras de acero largas | A fabricar |
| DSL | UHPFRC con fibras de acero largas y cortas | A fabricar |
| DSL+PP | UHPFRC con fibras de acero largas y cortas y polipropileno | Ya fabricadas |

4.2. FABRICACIÓN DE LOS HORMIGONES

Una de las actividades que se debía llevar a cabo para poder realizar el análisis experimental de los hormigones de ultra-alta resistencia reforzado con fibras y poder caracterizar su comportamiento, era la fabricación de los mismos. Los que estaban fabricados eran los hormigones DSL y DSL+PP, por lo que los que se debían fabricar eran los DS y DL. Para ello se parte de la siguiente dosificación (TABLA 2), la cual ha sido utilizada por el cotutor de este trabajo José David Ríos Jiménez en varios trabajos de investigación.

TABLA 2. Dosificación para las diferentes mezclas de hormigón de ultra-altas prestaciones.

| Componente | DO(Kg/m ³) | DS (Kg/m ³) | DL(Kg/m ³) | DSL(Kg/m ³) | DSL+PP(Kg/m ³) |
|--------------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Cemento 52,5 R-SR | 544 | 544 | 544 | 544 | 544 |
| Humo de sílice (Sika) | 214 | 214 | 214 | 214 | 214 |
| Escoria sin caliza | 312 | 312 | 312 | 312 | 312 |
| Arena AS-F | 470 | 470 | 470 | 470 | 470 |
| Arena AS-V | 470 | 470 | 470 | 470 | 470 |
| Agua | 188 | 188 | 188 | 188 | 188 |
| Superplastificante BASF 325 | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 |
| Fibras de acero de 13 mm OL 13/0.2 | - | 196 | - | 98 | 98 |
| Fibras de acero de 30 mm RC 80/30 BP | - | - | 196 | 98 | 98 |
| Fibras de polipropileno 24 mm | - | - | - | - | 1.2 |
| Relación agua/cemento | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 |
| Relación agua/binder | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 |

El cemento fue producido en la fábrica de cemento Portland Valderribas (Sevilla), la escoria de alto horno y el humo de sílice fue proporcionada por Arcelor, España.

En cuanto a las arenas, que fueron suministradas por INCUSA, se emplearon dos tipos de arenas de cuarzo de diferente tamaño máximo de árido, que presentan las siguientes características:

- Arena AS-F: La arena más fina tiene un tamaño máximo de árido de 0.315 mm.
- Arena AS-V: La arena más gruesa tiene un tamaño máximo de árido de 0.800 mm.

El superplastificante fue proporcionado por BASF Company, modelo ACE-325. Las fibras de polipropileno son de 24 mm de longitud.

Las fibras de acero fueron aportadas por Bekaert (Bélgica) y tienen las siguientes características:

- Micro-fibras: Fibras de acero cortas y rectas de 13 mm de largo y 0,20 mm de diámetro.
- Macro-fibras: Fibras de acero largas con extremos en forma de gancho de 30 mm de longitud y 0,38 mm de diámetro

Partiendo de la dosificación anteriormente descrita se procede a la fabricación del hormigón objeto de estudio. Para ello lo primero que se debe realizar es la preparación de cada una de las cantidades de los componentes a utilizar haciendo uso de un peso.

A continuación, en las FIGURAS 8, 9 y 10, se muestran los materiales utilizados para los hormigones de ultra-altas prestaciones DS y DL:



FIGURA 8. Arena AS-F, arena AS-V, humo de sílice, escoria sin caliza y cemento. Fotografía tomada *in situ*.



FIGURA 9. Superplastificante BASF 325 y agua. Fotografía tomada *in situ*.



(a)



(b)

FIGURA 10 a) y b). Fibras de acero de (a) 12 mm OL 13/0.2 y fibras de acero de (b) 30 mm RC 80/30 BP. Fotografía tomada *in situ*.

El procedimiento para la fabricación de dichos hormigones es el siguiente. Primero se amasan los componentes secos (FIGURA 11), es decir, la arena fina, arena gruesa, humo de sílice, escoria sin caliza y cemento, durante 5 minutos aproximadamente hasta que adquiera un aspecto homogéneo.



FIGURA 11. Antes de mezclar componentes secos. Fotografía tomada *in situ*.

Posteriormente se le añade el superplastificante y el agua junto con la mezcla y se amasa durante 30 minutos aproximadamente. Al principio, el aspecto de la mezcla después de la adición de agua y superplastificante es seco (FIGURA 12), pero a medida que transcurre el tiempo va adquiriendo un aspecto más fluido (FIGURA 13). Luego se le añade las fibras de acero y se mezclan durante 5 minutos.



FIGURA 12. Mezcla con adición superplastificante y agua. Fotografía tomada *in situ*.



FIGURA 13. Hormigón de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras en estado fresco. Fotografía tomada *in situ*.

Se debe recalcar que la mezcla final con fibras acero largas resultó tener un aspecto menos fluido con respecto a la mezcla final con fibras de acero cortas.

Una vez terminado el proceso de mezclado, se elaboran las probetas haciendo uso de moldes de acero de diferentes geometrías (FIGURA 14). En este caso, se emplearon para cada tipo de hormigón, es decir, para DS y DL, 4 moldes cúbicos, 5 moldes prismáticos y 2 moldes cilíndricos. Se debe tener en cuenta que a los moldes se les deben aplicar líquido desmoldante en su interior para facilitar su posterior desmoldeo.



FIGURA 14. Moldes de las probetas de hormigón. Fotografía tomada *in situ*.

Al día siguiente de la fabricación de dichas probetas se procede a realizar el desmoldeo (FIGURA 15) y a introducirlas dentro del baño térmico, el cual se encuentra a una temperatura de 60°C, para el curado de las mismas.



FIGURA 15. Probetas de hormigón de ultra-altas prestaciones reforzados con fibras. Fotografía tomada *in situ*.

Después de lo anterior se espera un tiempo de curado del hormigón de 28 días, y tras ese periodo de tiempo se apartan del baño térmico (FIGURA 16) y con ello se procede a realizar los ensayos de caracterización experimental.



FIGURA 16. Probetas de hormigón de ultra-altas prestaciones reforzados con fibras en baño térmico. Fotografía tomada *in situ*.

4.3. ENSAYOS

Se van a realizar una serie de ensayos para poder caracterizar el comportamiento mecánico y en fractura tanto de los hormigones elaborados en laboratorio (DS y DL), indicados anteriormente, como los ya fabricados (D0 y DSL). Los ensayos son los siguientes:

- 1) Ensayo de hormigón endurecido para la determinación del módulo secante de elasticidad en compresión en probetas cilíndricas (UNE-EN 12390-13).
- 2) Ensayo de doble punzonamiento multidireccional (MDPT), método Barcelona modificado para la determinación de la resistencia a tracción de hormigones reforzados con fibras de acero a partir de probetas cúbicas (Pujadas *et al*, 2014).
- 3) Ensayo a compresión simple para la determinación de la resistencia a compresión de las probetas cúbicas (UNE-EN 12390-3).
- 4) Ensayo de flexión en cuatro puntos en probetas prismáticas (López *et al*, 2015).

El equipo empleado para llevar a cabo los ensayos 1, 2, y 3, es una prensa hidráulica modelo MES 300 de Servosis con un panel de control Servosis con el que se establecen las condiciones del ensayo, tal y como se puede observar en la FIGURA 17.



FIGURA 17. Panel de control Servosis y Prensa hidráulica Servosis modelo MES 300. Fotografía tomada *in situ*.

En cuanto al ensayo 4, este fue realizado mediante una máquina servo hidráulica modelo ME 406/15 marca Servosis, la cual estaba dentro de un horno, ya que los ensayos de flexión en cuatro puntos se realizaron a 300°C (FIGURA 18).



FIGURA 18 a) y b). Horno y máquina servo hidráulica modelo ME 406/15 marca Servosis. Fotografía tomada *in situ*.

Los ensayos se realizaron para probetas a temperatura ambiente y sometidas a 300°C, y se comprobó la influencia de la temperatura en las propiedades mecánicas. El proceso de alcanzar la temperatura de 300°C en las probetas se debe llevar a cabo gradualmente, es decir, no se debe calentar las probetas directamente a 300°C ya que, como se ha indicado con anterioridad, el hormigón de ultra-alta resistencia consta de una matriz poco porosa, dado la relación agua-cemento empleada en su dosificación, y a la inclusión de componentes de tamaño de partícula muy pequeño, y por tanto presenta un comportamiento más frágil en relación con la de los hormigones convencionales. Como consecuencia de ello, se ven afectados por el desprendimiento y agrietamiento (*spalling*) debido a la influencia de dicha temperatura. Por ello, para poder llegar a 300°C sin que se produzca *spalling* se deben calentar las probetas gradualmente a 100°C - 200°C - 300°C dejando 24 horas entre ellos.

A continuación, en la TABLA 3, se muestra un resumen de cuáles han sido los ensayos realizados para cada uno de los tipos de hormigones con diferentes refuerzos indicados con anterioridad:

TABLA 3. Ensayos realizados a temperatura ambiente (TA) y 300°C.

| Nomenclatura | Temperatura | Ensayos |
|--------------|-------------|--|
| DS | TA | Ensayo de compresión simple |
| | | Ensayo determinación módulo de elasticidad |
| | | Ensayo de flexión en 4 puntos |
| | 300°C | Ensayo de compresión simple |
| | | Ensayo determinación módulo de elasticidad |
| | | Ensayo de flexión en 4 puntos |
| DL | TA | Ensayo de compresión simple |
| | | Ensayo determinación módulo de elasticidad |
| | | Ensayo de flexión en 4 puntos |
| | | Ensayo de compresión simple |

| | | |
|--------|-------|--|
| | 300°C | Ensayo determinación módulo de elasticidad |
| | | Ensayo de flexión en 4 puntos |
| DSL | TA | Ensayo de compresión simple |
| | | Ensayo determinación módulo de elasticidad |
| | 300°C | Ensayo de flexión en 4 puntos |
| | | Ensayo de compresión simple |
| DSL+PP | TA | Ensayo determinación módulo de elasticidad |
| | | MDPT |
| | | Tomografía computarizada (TAC) |
| | | Ensayo de compresión simple |
| | 300°C | Ensayo determinación módulo de elasticidad |
| | | MDPT |
| | | TAC |
| | | |

Las dimensiones de las probetas que se van a ensayar son las siguientes:

- 1) Cúbicas: 100 x 100 x 100 mm.
- 2) Prismáticas: 100 x 100 x 440 mm.
- 3) Cilíndricas: d= 100 mm y h= 200 mm.

4.3.1. Ensayo de compresión simple

Dicho ensayo, el cual está recogido en la norma UNE-EN 12390-3, consiste en la aplicación de una carga de compresión mediante una prensa hidráulica sobre una probeta cúbica de hormigón a una velocidad de carga constante con el fin de determinar su resistencia a compresión.

Al igual que el ensayo anterior, para que la distribución de la carga sea uniforme sobre toda la superficie de carga de la probeta se colocan dos platos, tal y como se puede observar en la FIGURA 19. Debido a la posible irregularidad de las caras de las probetas, se deben colocar aquellas que resulten más planas y paralelas en la dirección de aplicación de la carga para asegurar que esta se aplique de forma uniforme y se eviten posibles excentricidades. En cualquier caso, el equipo de ensayos posee platos adaptativos.



FIGURA 19. Ensayo de compresión simple. Fuente: Fotografía tomada *in situ*.

En la FIGURA 20 se muestra el tipo de rotura de este tipo de hormigones. A diferencia de un hormigón de ultra-alta resistencia sin fibras, la presencia de las fibras hace que no se produzca separación de los elementos ya que actúan cosiendo las grietas que se producen.



FIGURA 20 a) y b). Probeta DSL+PP ensayada compresión simple. Fuente: Fotografía tomada *in situ*.

4.3.2. Ensayo de determinación del módulo secante de elasticidad en compresión

Se realiza el ensayo definido en la norma UNE-EN 12390-13 para determinar el módulo secante de elasticidad en compresión de UHPFRC-DSL, UHPFRC-DS, UHPFRC-DL y UHPFRC-DSL+PP.

De los dos métodos diferentes que define la norma para llevar a cabo el ensayo, se empleó el método B. El ensayo consiste en lo siguiente:

Se someten probetas cilíndricas ($d= 100$ mm y $h= 200$ mm) a compresión uniaxial, registrando las tensiones y las deformaciones para determinar la pendiente de la recta secante de la curva tensión-deformación. Se mide el acortamiento longitudinal de la probeta a través de dos transductores

ubicados simétricamente, respecto al eje central, gracias al empleo de un anillo metálico que se coloca exterior a la probeta cilíndrica, a 1/3 de la altura desde la base. Cumpliendo así lo que establece la norma, que la instrumentación de medida de la deformación se debe colocar de tal forma que la base de medición sea equidistante de los extremos de la probeta (FIGURA 21). Dichos transductores tienen una precisión de 0,01 mm y un rango de 2,5 mm.

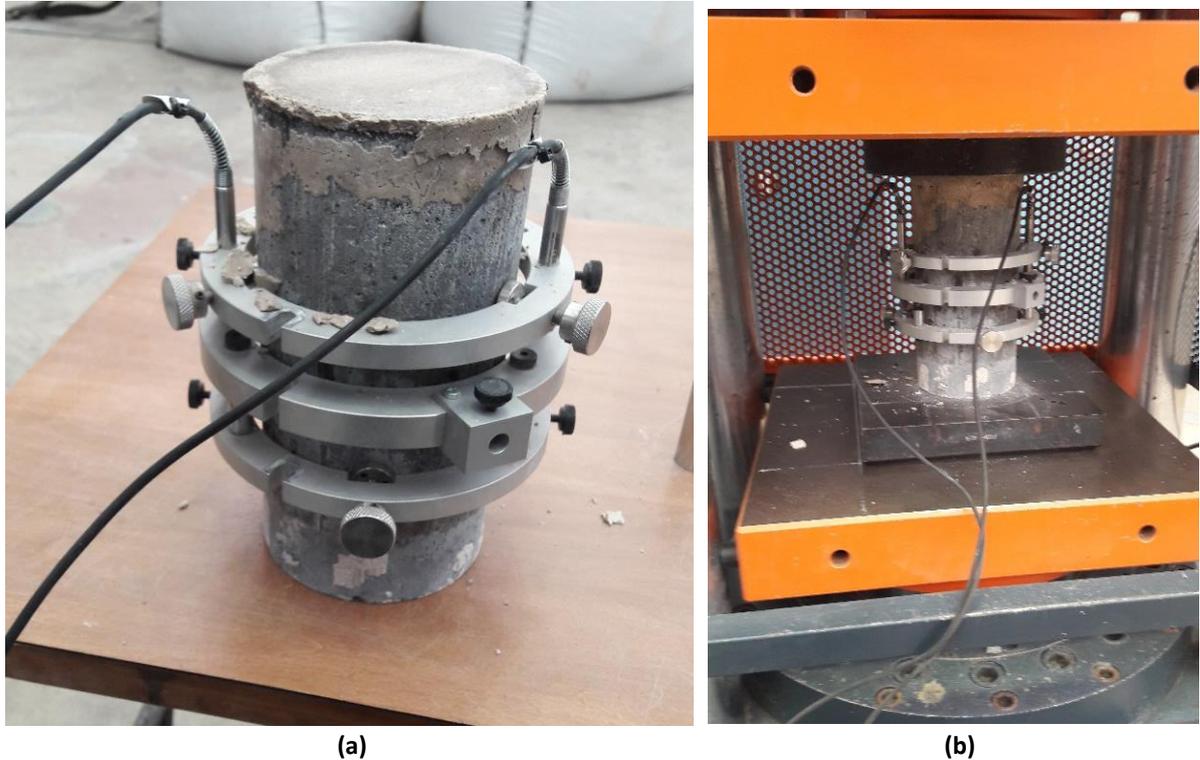


FIGURA 21 a) y b). Instrumentación de medida (a) y ensayo determinación módulo de deformación (b). Fuente: Fotografía tomada *in situ*.

Todas las probetas ensayadas han sido sometidas a 300°C, aunque el ensayo se realiza a temperatura ambiente para poder instrumentar las probetas. A todas ellas se les ha aplicado una torta de escayola en su cara superior para que la superficie sea plana y, por tanto, la aplicación de la carga sea uniforme a lo largo de ella y las medidas de un transductor a otro no difieran entre sí.

Previo a la realización de dicho ensayo se debe obtener la resistencia a compresión, f_c , para definir los tres niveles de tensión del ciclo de carga de ensayo. Se definen los parámetros de fuerza máxima, fuerza mínima y fuerza de precarga en función de la resistencia a compresión del hormigón ensayado. En la FIGURA 22, obtenida de la norma, se muestra cómo se deben aplicar los ciclos de carga.

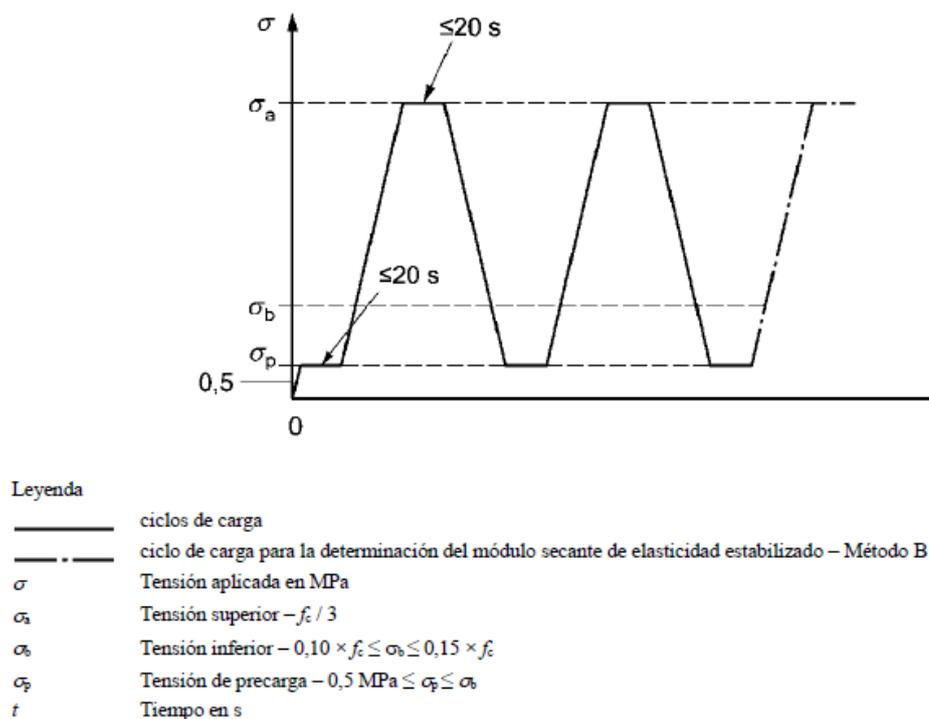


FIGURA 22. Ciclos de carga para la determinación del módulo de deformación. Fuente: Norma UNE-EN 12390-13.

4.3.2. Ensayo del método Barcelona modificado

El ensayo realizado es el de doble punzonamiento multidireccional (MDPT) (Pujadas *et al*, 2014). Este ensayo es una modificación del método Barcelona definido en la norma UNE-EN 83515 para obtener la resistencia a tracción de hormigones reforzados con fibras.

La razón de llevar a cabo dicha modificación del método Barcelona radica en poder tener en cuenta la influencia que tiene la orientación de las fibras en la resistencia a tracción del material sin instrumentar la probeta como ocurre en el ensayo Barcelona, por ello en el siguiente método a describir se emplean probetas cúbicas en vez de las probetas cilíndricas que se ensayan siguiendo el mismo procedimiento que, pero sin medir la deformación circunferencial.

Se van a ensayar 46 probetas cúbicas de hormigón reforzado con una mezcla de fibras de acero largas y cortas y polipropileno. De esas 46 probetas, 30 han sufrido previamente un proceso de calentamiento a 300°C, mientras que los 16 restantes no han estado sometidas a ningún proceso térmico.

El ensayo es una prueba de tracción indirecta para evaluar la dureza y la resistencia a tracción residual de un hormigón reforzado con fibras considerando la distribución y la orientación de las fibras. Es una prueba a tracción aplicando cargas a compresión mediante dos punzones concéntricos.

Para poder realizar el ensayo, se deben de colocar dos platos metálicos, para que la distribución de la carga sea uniforme sobre la superficie de carga de la probeta (FIGURA 23). Además, se colocan dos punzones cilíndricos de acero dispuestos concéntricamente encima y debajo de la probeta cúbica para poder transmitir la carga aplicada por las placas de la prensa que se acercan entre sí a velocidad constante. Para poder colocar los punzones adecuadamente y evitar excentricidades se emplean unas plantillas.



FIGURA 23. Ensayo MDPT. Fuente: Fotografía tomada *in situ*.

4.3.4. Ensayo de flexión en cuatro puntos

Para poder determinar las propiedades de fractura y ley de ablandamiento de las probetas de UHPFRC se ha empleado un método de análisis inverso mediante la realización de un ensayo de flexión en cuatro puntos sin entalla (López *et al*, 2015). Tal y como se puede observar en las FIGURAS 24.a) y 24.b) dicho ensayo se ha realizado directamente en el horno a 300°C.



FIGURA 24 a) y b). Ensayo de flexión en 4 puntos en horno a 300°C. Fuente: Fotografía tomada *in situ*.

El motivo de la realización del ensayo de flexión en cuatro puntos en lugar del ensayo de flexión en tres puntos radica en que este último es válido para hormigones con una resistencia hasta 80 MPa y un contenido en fibras inferior de 80 kg/m³, por tanto, no son adecuados para los UHPFRC (López *et al*, 2015).

Para la realización del ensayo, se coloca la probeta prismática sobre dos rodillos, cuya distancia es 400 mm. La carga se aplica mediante dos rodillos, a 1/3 de la longitud de la probeta, como se muestra en la FIGURA 25. En ensayo se realizó con control de desplazamiento a una velocidad de carga de 0.5 mm/min en una máquina servo hidráulica modelo ME 406/15 marca Servosis (FIGURA 24.b)) con una capacidad máxima de carga de 200 kN.

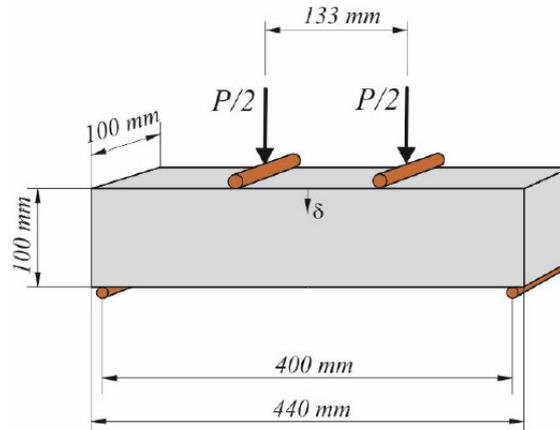


FIGURA 25. Ensayo flexión en cuatro puntos.

Ya que las probetas se ensayaron directamente en el horno a 300°C no se podía emplear transductores para medir directamente la flecha, por lo que el procesamiento de datos posterior resultó más complejo.

Como se puede observar en la FIGURA 26, la grieta aparece en el tercio central de la probeta, entre los rodillos superiores. Zona de momento máximo.



FIGURA 26. Probetas DL (izquierda) y DS (derecha) ensayadas a flexión en 4 puntos. Fuente: Fotografía tomada *in situ*.

4.4. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos realizados y descritos anteriormente. En ellos se pondrá de manifiesto la influencia de la temperatura en las propiedades mecánicas y en fractura de dichos hormigones.

4.4.1. Ensayo de compresión simple

En este apartado se muestran los resultados de resistencia a compresión simple uniaxial (TABLA 4), tanto los obtenidos en la campaña experimental como los aportados por los tutores del trabajo fin de grado (TFG). Primero se van a describir los resultados obtenidos individualmente en cada uno de los distintos tipos de hormigones, y posteriormente se compararán los valores promedio entre sí, haciendo hincapié en la influencia de la temperatura.

Del ensayo de compresión uniaxial realizado, se obtiene la carga máxima en kN, es decir, la carga de rotura, con la que se puede determinar la resistencia a compresión mediante el empleo de:

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

donde:

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

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

A_c : es el área de la probeta sobre la que se aplica la fuerza de compresión (mm²).

TABLA 4. Resultados de ensayo de compresión en probetas cúbicas.

| D0 | | | | |
|--------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| DENOMINACIÓN | Tensión de rotura - f_c (MPa) | Tensión media rotura - f_c (MPa) | Desviación (MPa) (\pm) | Coefficiente de variación(%) |
| DO_C_1 | 133 | 125 | 12 | 9 |
| DO_C_2 | 130 | | | |
| DO_C_3 | 111 | | | |
| DS | | | | |
| DENOMINACIÓN | Tensión de rotura - f_c (MPa) | Tensión media rotura - f_c (MPa) | Desviación (MPa) (\pm) | Coefficiente de variación(%) |
| DS_C_1 | 147 | 155 | 8 | 5 |
| DS_C_2 | 155 | | | |
| DS_C_3 | 162 | | | |
| DS_C_1_300 | 128 | 129 | 19 | 15 |
| DS_C_2_300 | 154 | | | |
| DS_C_3_300 | 107 | | | |
| DS_C_4_300 | 126 | | | |
| DL | | | | |
| DENOMINACIÓN | Tensión de rotura - f_c (MPa) | Tensión media rotura - f_c (MPa) | Desviación (MPa) (\pm) | Coefficiente de variación(%) |
| DL_C_1 | 153 | 141 | 17 | 12 |
| DL_C_2 | 147 | | | |

| DL_C_3 | 121 | | | |
|-----------------|------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| DL_C_1_300 | 156 | | | |
| DL_C_2_300 | 159 | 125 | 37 | 30 |
| DL_C_3_300 | 92 | | | |
| DL_C_4_300 | 93 | | | |
| DSL | | | | |
| DENOMINACIÓN | Tensión de rotura - f_c (MPa) | Tensión media rotura - f_c (MPa) | Desviación (MPa) (\pm) | Coefficiente de variación(%) |
| DSL_C_1 | 150 | | | |
| DSL_C_2 | 135 | 147 | 12 | 8 |
| DSL_C_3 | 157 | | | |
| DSL_C_1_300 | 99 | | | |
| DSL_C_2_300 | 121 | | | |
| DSL_C_3_300 | 103 | 112 | 11 | 10 |
| DSL_C_4_300 | 114 | | | |
| DSL_C_5_300 | 123 | | | |
| DSL+PP | | | | |
| DENOMINACIÓN | Tensión de rotura - f_c (MPa) | Tensión media rotura - f_c (MPa) | Desviación (MPa) (\pm) | Coefficiente de variación(%) |
| DSL+PP_C_1 | 149 | | | |
| DSL+PP_C_2 | 139 | | | |
| DSL+PP_C_3 | 140 | | | |
| DSL+PP_C_4 | 129 | | | |
| DSL+PP_C_5 | 122 | | | |
| DSL+PP_C_6 | 120 | | | |
| DSL+PP_C_7 | 133 | | | |
| DSL+PP_C_8 | 152 | | | |
| DSL+PP_C_9 | 150 | | | |
| DSL+PP_C_10 | 142 | | | |
| DSL+PP_C_11 | 121 | 135 | 13 | 10 |
| DSL+PP_C_12 | 127 | | | |
| DSL+PP_C_13 | 137 | | | |
| DSL+PP_C_14 | 122 | | | |
| DSL+PP_C_15 | 153 | | | |
| DSL+PP_C_16 | 112 | | | |
| DSL+PP_C_17 | 120 | | | |
| DSL+PP_C_18 | 156 | | | |
| DSL+PP_C_19 | 135 | | | |
| DSL+PP_C_20 | 128 | | | |
| DSL+PP_C_21 | 147 | | | |
| DSL+PP_C_1_300 | 128 | | | |
| DSL+PP_C_2_300 | 131 | | | |
| DSL+PP_C_3_300 | 127 | | | |
| DSL+PP_C_4_300 | 127 | | | |
| DSL+PP_C_5_300 | 148 | | | |
| DSL+PP_C_6_300 | 161 | 138 | 14 | 10 |
| DSL+PP_C_7_300 | 116 | | | |
| DSL+PP_C_8_300 | 153 | | | |
| DSL+PP_C_9_300 | 149 | | | |
| DSL+PP_C_10_300 | 140 | | | |

| | | | | |
|-----------------|-----|--|--|--|
| DSL+PP_C_11_300 | 148 | | | |
| DSL+PP_C_12_300 | 148 | | | |
| DSL+PP_C_13_300 | 122 | | | |

Como se puede observar, la resistencia a compresión de los hormigones de ultra-alta resistencia es muy elevada en comparación con los hormigones convencionales, ya que éstos suelen tener un valor en torno a 30 MPa. Dicho aumento es debido a la composición de estos hormigones, ya que el cemento empleado de 52.5 R/SR posee menor tamaño de partícula que los de resistencia normal (32.5 N), la relación agua/cemento en este caso es inferior a 0.2, el tamaño máximo de árido es inferior a 0.8 mm, y al propio curado, ya que, como se ha indicado con anterioridad, se somete a un baño térmico a 60°C.

a) A temperatura ambiente

La adición de las fibras de acero en la matriz de hormigón aumenta significativamente la resistencia a compresión en todos los hormigones, DS, DL, DSL y DSL+PP en relación con el hormigón no reforzado con fibras, D0.

Comparando los resultados obtenidos de los distintos tipos de hormigones, se puede observar que la mayor resistencia a compresión se obtiene en el caso del hormigón DS, con un incremento del 24% de resistencia respecto a D0. Además, con DS se obtiene un 10% más de resistencia a compresión, f_c , con respecto a DL y ello es debido a que, las fibras de acero cortas son más efectivas para evitar la propagación de microfisuras, ya que para un mismo volumen hay más cantidad de fibras que si se tratase de fibras de mayor longitud. Además, las fibras largas son propensas a agolparse entre sí durante el proceso de amasado y empeorar así la homogeneidad de la distribución de las fibras dentro de la matriz. Con el empleo de ambos tipos de fibras de acero mezcladas al 50%, DSL, se consigue un efecto intermedio, aumentando la f_c un 18% respecto a D0. La mezcla de ambas fibras de acero aporta los beneficios de ambas, ya que las fibras de acero cortas son más efectivas frente a la propagación de microfisuras mientras que las fibras largas son más efectivas para evitar la propagación de fisuras de mayor tamaño.

Por otro lado, la adición de fibras de polipropileno disminuye la f_c respecto a los hormigones reforzados exclusivamente con fibras de acero (DS, DL y DSL), ya que se está incorporando en la matriz un material con baja capacidad resistente.

b) Temperatura 300°C

En términos generales, el efecto de la temperatura produce una disminución de la resistencia a compresión, aunque el daño térmico no tiene igual efecto en todos los UHPFRC.

A 300°C, la resistencia a compresión disminuye en DS en torno a un 17%, y en DL se reduce un 11%, con relación a sus respectivos valores a temperatura ambiente. En cuanto a las probetas con mezcla de fibras largas y cortas, DSL, se produce una disminución de la resistencia a compresión del orden del 24%.

No obstante, se obtiene una alta variabilidad en los resultados de los ensayos realizados para DL, del orden de un 30%, y ello es debido al daño térmico no homogéneo que se produce debido a la temperatura. Por tanto, de las cuatro probetas ensayadas a 300 °C para cada tipo de hormigón, dos han sufrido un mayor daño térmico. Algo similar les sucede a las probetas con fibra de acero cortas,

DS, aunque la variación entre los resultados no es tan reseñable que en el caso de DL. Por tanto, se puede concluir que, aunque el valor de f_c promedio a 300 °C para el hormigón DL tenga un valor más elevado que DSL, la dispersión de un 30% en DL muestra que es la que se ve más afectada por la temperatura y que en valores absolutos se alcancen las resistencias más bajas.

Se obtienen resultados con menor dispersión con las probetas que tienen mezcla de fibras de acero larga y corta y polipropileno, DSL+PP, ya que la presencia de las fibras de polipropileno reduce los efectos del daño térmico en la matriz de hormigón.

TABLA 5. Tabla resumen del ensayo de compresión en probetas cúbicas.

| f_c (MPa) | | |
|---------------|-----------|-----------|
| | TA | 300°C |
| D0 | 125 ± 9% | - |
| DS | 155 ± 5% | 129 ± 15% |
| DL | 141 ± 12% | 125 ± 30% |
| DSL | 147 ± 8% | 112 ± 10% |
| DSL+PP | 135 ± 10% | 138 ± 10% |

De la TABLA 5, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- A temperatura ambiente (TA) se consigue una mayor resistencia a compresión, respecto a D0, mediante la adición de fibras de acero cortas, del orden de 24%, y con las fibras de acero largas aumenta en torno a 13%. Con la mezcla de ambas se llega a un valor intermedio entre ambos valores anteriores, de 18% aproximadamente.
- La disminución de la resistencia a compresión por la influencia de la temperatura es más pronunciada en DS que en DL, siendo aún mayor en DSL.
- Con la presencia de fibras de polipropileno, DSL+PP, se consigue un aumento menor de la resistencia a compresión en comparación con los otros tipos de hormigones reforzados con fibras de acero, un 8% a temperatura ambiente con respecto a D0. Por contrapartida, la influencia de la temperatura no afecta a la resistencia a compresión obtenida a temperatura ambiente.

4.4.2. Ensayo de determinación del módulo secante de elasticidad en compresión

Los datos que se obtienen del ensayo para la determinación de módulo de Young son con control en fuerza a velocidad constante y las medidas que los transductores obtienen en milímetros (mm). Dichos datos se procesan para obtener la ley tensión-deformación ($\sigma - \epsilon$).

La tensión se obtiene dividiendo la fuerza por el área:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde:

F = Fuerza en Newton (N).

A = Área promedio, 7854 mm².

En cuanto a la deformación, ésta se obtiene de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{2 \cdot L_0}$$

Donde:

ΔL_1 = medida en el transductor 1 en mm.

ΔL_2 = medida en el transductor 2 en mm.

L_0 = altura probeta en mm.

No obstante, sólo es de interés el último ciclo de carga, por tanto, de él se determina la ley tensión-deformación para poder obtener finalmente el módulo de deformación buscado.

A continuación, en la TABLA 6, se muestran los resultados del módulo de deformación longitudinal obtenidos en la campaña experimental y los aportados por los tutores del TFG en trabajos previos:

TABLA 6. Resultados de ensayos para la obtención del módulo de deformación longitudinal.

| D0 | | | | |
|--------------|----------------------|-------------|-----------------------------|-------------------------------|
| DENOMINACIÓN | E _c (MPa) | Media (MPa) | Desviación típica (MPa) (±) | Coefficiente de variación (%) |
| DO_1 | 38190 | 44507 | 5676 | 13 |
| DO_2 | 49180 | | | |
| DO_3 | 46150 | | | |
| DO_1_300 | 28190 | - | - | |
| DS | | | | |
| DENOMINACIÓN | E _c (MPa) | Media (MPa) | Desviación típica (MPa) (±) | Coefficiente de variación (%) |
| DS_E_1 | 43430 | - | - | - |
| DS_E_1_300 | 25711 | 26873 | 1643 | 6 |
| DS_E_2_300 | 28035 | | | |
| DL | | | | |
| DENOMINACIÓN | E _c (MPa) | Media (MPa) | Desviación típica (MPa) (±) | Coefficiente de variación (%) |
| DL_E_1 | 42566 | - | - | - |
| DL_E_1_300 | 26982 | 25096 | 2668 | 11 |
| DL_E_2_300 | 23209 | | | |
| DSL | | | | |
| DENOMINACIÓN | E _c (MPa) | Media (MPa) | Desviación típica (MPa) (±) | Coefficiente de variación (%) |
| DSL_E_1 | 49231 | - | - | - |
| DSL_E_1_300 | 23622 | 24077 | 643 | 3 |
| DSL_E_2_300 | 24532 | | | |
| DSL+PP | | | | |
| DENOMINACIÓN | E _c (MPa) | Media (MPa) | Desviación típica (MPa) (±) | Coefficiente de variación (%) |
| DSL+PP_E_1 | 44348 | 47363 | 2767 | 6 |

| | | | | |
|----------------|-------|-------|------|---|
| DSL+PP_E_2 | 49786 | | | |
| DSL+PP_E_3 | 47955 | | | |
| DSL+PP_E_1_300 | 29570 | | | |
| DSL+PP_E_2_300 | 34270 | 32400 | 2493 | 8 |
| DSL+PP_E_3_300 | 33360 | | | |

El módulo de deformación longitudinal es un indicador de la rigidez de la matriz. Al tener los hormigones de ultra-alta resistencia una matriz más densa, le confiere una mayor rigidez y por tanto un mayor módulo de deformación respecto a los hormigones convencionales, ya que éstos suelen tener un módulo de deformación en torno a 30 GPa aproximadamente.

TABLA 7. Tabla resumen del módulo de deformación longitudinal.

| E _c (MPa) | | |
|----------------------|-------|-------|
| | TA | 300°C |
| DO | 44507 | 28190 |
| DS | 43430 | 26873 |
| DL | 42566 | 25096 |
| DSL | 49231 | 24077 |
| DSL+PP | 47363 | 32400 |

a) A temperatura ambiente

Se puede apreciar que las fibras de acero no producen una mejora significativa de E_c (TABLA 7), al igual que lo obtenido por otros autores (ACI Committee 544, 2001). Por otro lado, la adición de fibras de PP mejora el módulo de Young, E_c, muy ligeramente incrementando su valor promedio un 6% respecto a DO.

b) Temperatura 300°C

En relación con los resultados de la TABLA 7, se puede observar una disminución del módulo de deformación longitudinal con la temperatura. Ello es debido a que el daño térmico conlleva la disminución de la rigidez de la matriz de hormigón debido a la microfisuración de la pasta de cemento durante el proceso de calentamiento y enfriamiento previo al ensayo. En los hormigones reforzados con fibras de acero la disminución del módulo de Young por la influencia de la temperatura ha sido significativa, DS (38%), DL (41%) y DSL (51%) y con valores muy similares entre sí. En el caso del DSL+PP, la adición de fibras de polipropileno a la matriz de hormigón es favorable para reducir el deterioro producido por el daño térmico, sin embargo, su disminución en un 32% respecto a la misma a temperatura ambiente está en el orden de los casos sin fibras de polipropileno. En términos generales se puede decir que es la menos afectada por la influencia de la temperatura, pero su repercusión en esta propiedad no es muy relevante.

4.4.3. Ensayo método Barcelona modificado

A continuación, se van a describir las curvas fuerza-posición del actuador (P-S), obtenidas mediante el procesamiento de los datos experimentales. En dichas curvas se pueden diferenciar tres etapas (FIGURA 27), que muestran lo que va sucediendo a lo largo del ensayo (Pujadas *et al*, 2013):

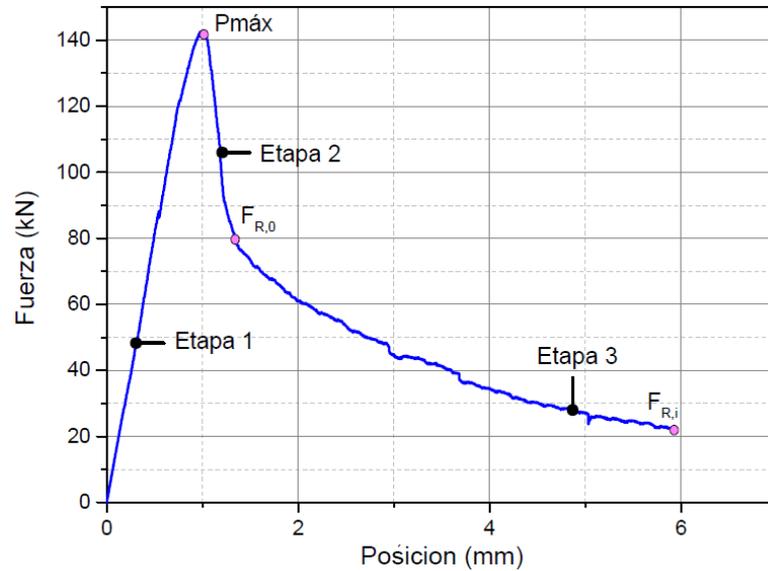


FIGURA 27. Etapas curva P-S DSL+PP.

Etapa 1: Aplicación de la carga

Para los valores iniciales de carga, las gráficas fuerza-desplazamiento obtenidas presentan un tramo no lineal (zona punteada en rojo en la FIGURA 28.a) debido a las posibles imperfecciones de las caras de las probetas y al acoplamiento definitivo de los elementos de aplicación de carga, es decir, del punzón y el plato metálico descrito con anterioridad. Por tanto, todas las curvas deben ser corregidas para eliminar ese tramo no lineal (FIGURA 28.b)), ya que este no es de interés.

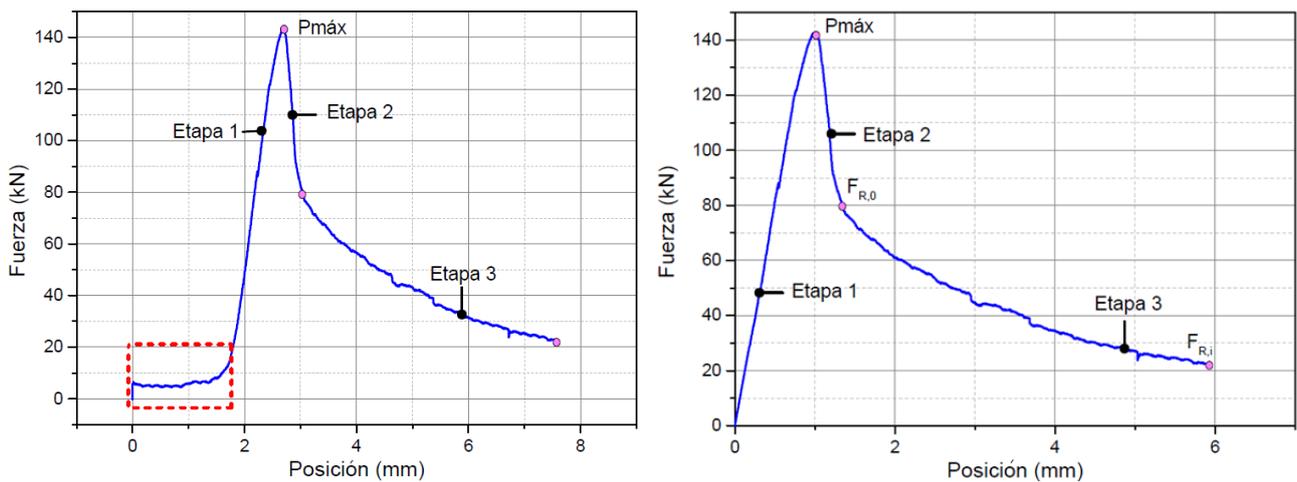


FIGURA 28 a) y b). Curva P-S sin rectificar y curva P-S rectificada DSL+PP.

Una vez corregido lo anterior, se puede decir que esta primera etapa se caracteriza por su linealidad creciente hasta llegar a la carga máxima que es la que produce la fisuración ($P_{máx}$).

Etapa 2: Formación grietas gran tamaño

Se forman unas cuñas cónicas de diámetro igual a la de los punzones metálicos utilizados para la realización del ensayo. También se puede observar en dicha etapa que aparecen grietas de mayor tamaño que intentan dividir a la probeta en partes, lo cual es evitado debido a la presencia de las fibras en el hormigón. Normalmente en la mayoría de probetas ensayadas se producían dos grietas principales de gran tamaño que unían las cuñas cónicas superior e inferior entre sí como se puede observar en la FIGURA 29.a y b. Dicha etapa evoluciona hasta llegar a un cambio de pendiente en la recta decreciente correspondiente a una fuerza $F_{R,0}$.



FIGURA 29 a) y b). DSL+PP cara superior e inferior. Fuente: Fotografía tomada *in situ*.

Etapa 3: Agrietamiento final estabilizado

Dicha etapa es decreciente, al igual que la anterior, y en ella se puede observar cómo las grietas se estabilizan gracias al cosido de las fibras (FIGURA 30) que contiene el hormigón. El final de esta etapa, y por tanto, de todo el ensayo, termina al llegar a una deformación de 6 mm correspondiente a una fuerza $F_{R,i}$.



FIGURA 30. Fibras en grietas de probeta DSL+PP. Fuente: Fotografía tomada *in situ*.

Una vez obtenidas las curvas fuerza-posición P-S para cada una de las probetas ensayadas, se procede a la obtención de la resistencia residual a tracción (f_{ct}) de las probetas de UHPFRC ensayadas mediante el uso de la siguiente expresión obtenida de la norma UNE-EN 83515:

$$f_{ct} = \frac{4 \cdot P_{m\acute{a}x}}{9 \cdot \pi \cdot a \cdot H}$$

donde:

f_{ct} = Resistencia residual a tracción (MPa).

$P_{m\acute{a}x}$ = Carga que produce la fisuración (N). Es la correspondiente a la fuerza máxima en la curva fuerza-posición del actuador (P-S).

a = Diámetro del disco de aplicación de carga = 25 mm.

H = Altura de la probeta = 100 mm.

En la TABLA 8 se muestran los parámetros que definen cada una de las etapas del ensayo MDPT.

TABLA 8. Resultados del ensayo MDPT en probetas cúbicas DSL+PP.

| DSL+PP | | | | | | |
|--------------|----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| DENOMINACIÓN | F _{máx} (N) | f _{ct} (MPa) | S _{cr} (mm) | F _{ro} (N) | S _{ro} (mm) | F _{ri} (N) |
| DSL+PP_B_1 | 137200 | 16 | 0.684 | 54700 | 0.745 | 16800 |
| DSL+PP_B_2 | 146400 | 17 | 0.767 | 94500 | 0.901 | 13900 |
| DSL+PP_B_3 | 99900 | 11 | 0.585 | 56700 | 0.781 | 17500 |
| DSL+PP_B_4 | 149000 | 17 | 0.751 | 87500 | 1.069 | 33900 |
| DSL+PP_B_5 | 120600 | 14 | 0.778 | 82100 | 1.016 | 14100 |
| DSL+PP_B_6 | 105300 | 12 | 0.772 | 76400 | 0.981 | 22500 |
| DSL+PP_B_7 | 142800 | 16 | 0.635 | 52300 | 0.788 | 13700 |
| DSL+PP_B_8 | 125300 | 14 | 0.586 | 86700 | 0.793 | 13000 |
| DSL+PP_B_10 | 134300 | 15 | 0.835 | 90800 | 1.134 | 22100 |
| DSL+PP_B_11 | 144400 | 16 | 0.986 | 119300 | 1.066 | 44200 |
| DSL+PP_B_12 | 127700 | 14 | 0.668 | 99700 | 0.772 | 18600 |
| DSL+PP_B_13 | 124900 | 14 | 0.882 | 97500 | 0.955 | 24600 |
| DSL+PP_B_14 | 122600 | 14 | 0.909 | 90300 | 0.97 | 27900 |
| DSL+PP_B_15 | 131000 | 15 | 0.654 | 108400 | 0.801 | 15400 |
| DSL+PP_B_17 | 137300 | 16 | 0.727 | 86900 | 0.91 | 17500 |
| DSL+PP_B_18 | 134300 | 15 | 0.746 | 52900 | 0.85 | 12300 |
| DSL+PP_B_19 | 115600 | 13 | 0.565 | 72000 | 0.62 | 1300 |
| DSL+PP_B_20 | 135700 | 15 | 0.611 | 103800 | 0.843 | 18700 |
| DSL+PP_B_21 | 152500 | 17 | 0.832 | 122900 | 0.887 | 29800 |
| DSL+PP_B_22 | 169500 | 19 | 0.863 | 89400 | 0.911 | 49400 |
| DSL+PP_B_23 | 157800 | 18 | 0.87 | 131000 | 1.108 | 33400 |
| DSL+PP_B_24 | 166900 | 19 | 0.919 | 95400 | 0.992 | 30300 |
| DSL+PP_B_25 | 164000 | 19 | 0.774 | 127800 | 0.89 | 32800 |
| DSL+PP_B_26 | 142200 | 16 | 0.623 | 95500 | 0.793 | 14300 |
| DSL+PP_B_27 | 130300 | 15 | 0.667 | 98100 | 0.796 | 16500 |
| DSL+PP_B_28 | 99000 | 11 | 0.888 | 66600 | 1.004 | 17500 |
| DSL+PP_B_29 | 92700 | 10 | 0.956 | 87600 | 1.041 | 22100 |
| DSL+PP_B_30 | 141200 | 16 | 0.772 | 116100 | 0.778 | 16300 |

| | | | | | | | |
|---------------------|-------------------------------|--------|----|-------|--------|-------|-------|
| DSL+PP_B_1_300 | | 112400 | 13 | 0.867 | 40900 | 1.654 | 4600 |
| DSL+PP_B_2_300 | | 142600 | 16 | 0.979 | 92100 | 1.223 | 22300 |
| DSL+PP_B_3_300 | | 125600 | 14 | 0.94 | 69300 | 1.074 | 11300 |
| DSL+PP_B_4_300 | | 106200 | 12 | 0.893 | 57300 | 1.034 | 13800 |
| DSL+PP_B_5_300 | | 135000 | 15 | 1.03 | 97700 | 1.146 | 29300 |
| DSL+PP_B_6_300 | | 118400 | 13 | 0.955 | 63700 | 1.059 | 14400 |
| DSL+PP_B_7_300 | | 118300 | 13 | 0.941 | 79700 | 1.155 | 19800 |
| DSL+PP_B_8_300 | | 135300 | 15 | 1.282 | 97200 | 1.404 | 41600 |
| DSL+PP_B_9_300 | | 118700 | 13 | 0.912 | 52300 | 1.071 | 12800 |
| DSL+PP_B_10_300 | | 142800 | 16 | 1.362 | 97100 | 1.783 | 38900 |
| DSL+PP_B_11_300 | | 144100 | 16 | 1.047 | 82700 | 1.102 | 28100 |
| DSL+PP_B_13_300 | | 154600 | 17 | 1.239 | 124700 | 1.49 | 54900 |
| DSL+PP_B_14_300 | | 118800 | 13 | 0.993 | 81700 | 1.133 | 21500 |
| DSL+PP_B_15_300 | | 129100 | 15 | 1.092 | 93800 | 1.257 | 23900 |
| DSL+PP_B_16_300 | | 115500 | 13 | 0.951 | 79700 | 1.25 | 21400 |
| DSL+PP_TA | Media | 133943 | 15 | 0.8 | 90818 | 0.9 | 21800 |
| | Desviación típica (\pm) | 19856 | 2 | 0.1 | 21810 | 0.1 | 10325 |
| | Coefficiente de variación (%) | 15 | 15 | 16 | 24 | 14 | 47 |
| DSL+PP_300°C | Media | 127827 | 14 | 1.0 | 80660 | 1.3 | 23907 |
| | Desviación típica (\pm) | 13990 | 2 | 0.1 | 21434 | 0.2 | 13159 |
| | Coefficiente de variación (%) | 11 | 11 | 14 | 27 | 18 | 55 |

Se ha de decir que se han rechazado de las probetas DSL+PP_B_9, DSL+PP_B_16, DSL+PP_B_12_300 al obtener unos valores no razonables.

A continuación, se comentarán cada una de las etapas anteriormente descritas, indicando cómo influye el efecto de la temperatura y la adición de las fibras de acero y polipropileno en ellas.

Con respecto a la etapa 1, no existe una variación apreciable entre la resistencia a tracción obtenida a temperatura ambiente y a 300°C, produciéndose una disminución de un 7%. Ello es debido a la influencia de las fibras de polipropileno ya que disminuyen el daño térmico que se produce en la matriz de hormigón llevando a valores de resistencia muy similares que a 300 °C.

La etapa 2 es decreciente y representa la apertura de grietas desde el momento que se llega a la resistencia máxima a tracción. La influencia de la temperatura hace que se produzca una disminución de la fuerza (F_{ro}), del orden de 13 %, en la que se empiezan a estabilizar las grietas, no obstante, el desplazamiento alcanzado para dicha fuerza (S_{ro}) aumenta un 36%.

La etapa 3 está caracterizada por el efecto cosido de las fibras, que estabilizan la apertura de las grietas que se producen en la etapa 2. Se observa una mayor dispersión de los valores de fuerza obtenidos en esta etapa, con un 47% de variación a temperatura ambiente y un 55% a 300°C, pues tiene una fuerte dependencia con la efectividad de la orientación de las fibras. El incremento de la fuerza (F_{ri}) que se ha de aplicar para alcanzar el mismo desplazamiento, 6 mm en ambos casos, se incrementa en un 10% a 300°C.

4.4.4. Ensayo de flexión en cuatro puntos

La caracterización del comportamiento a flexotracción de los ultra-hormigones fue realizada a partir de probetas prismáticas de $440 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ sin entalla. El método de cálculo para determinar dichas propiedades fue desarrollado y aplicado por López *et al*, 2016, cuyo trabajo trata sobre la determinación de un método de aplicación a ultra-hormigones para caracterizar el comportamiento a flexotracción. La adición de fibras en la matriz de hormigón conlleva la aparición de múltiples fisuras, las cuales inician su propagación y son retenidas por el efecto cosido de las fibras de acero. Los métodos para la determinación del comportamiento a flexotracción mediante probeta de flexión en tres puntos con entalla no estarían teniendo en cuenta la contribución de las fibras durante la fisuración del material alrededor de la grieta predominante (zona multifisurada) y, por tanto, estaría sobreestimando el comportamiento del material. El método propuesto por López *et al*, 2016 consiste en utilizar ensayos de flexión en cuatro puntos (4PBT), sin entalla, de manera que haya múltiples secciones sometidas a momento máximo y la grieta predominante que llevará a la rotura de la probeta pueda aparecer en cualquiera de esas secciones.

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos de flexión en cuatro puntos, se puede determinar la ley tensión-deformación ($\sigma - \epsilon$) del material (FIGURA 31.a), así como la ley de ablandamiento ($\sigma - w$) (FIGURA 31.b) que caracterizan el comportamiento en fractura. La ley tensión-deformación se define mediante cuatro etapas, dos de ellas previas a la tensión máxima de rotura y dos posteriores a dicha tensión. El modelo de ley de ablandamiento utilizado corresponde con el de una ley bilineal, como puede verse en la FIGURA 31.b.

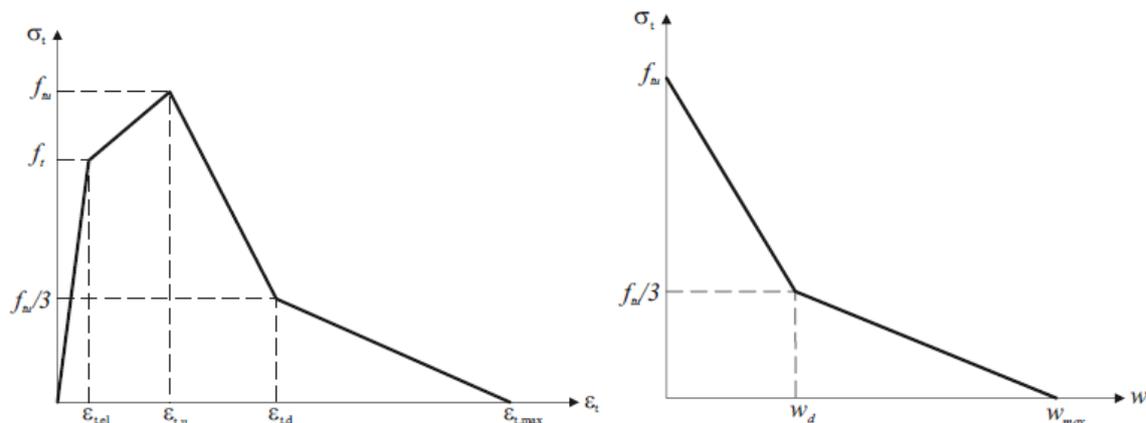


FIGURA 31 a) Ley tensión-deformación, $\sigma - \epsilon$, y b) ley cohesiva, $\sigma - w$ obtenidas mediante el ensayo de flexión en cuatro puntos. Fuente: (López *et al*, 2016)

Ley tensión-deformación ($\sigma - \epsilon$)

A continuación, se va a describir en detalle las distintas etapas que se distinguen en la ley $\sigma - \epsilon$ (FIGURA 32), ya que son importantes para comprender el comportamiento en fractura del hormigón, y poder relacionarlo con los datos que se han obtenido de los ensayos de flexión en cuatro puntos realizados en laboratorio sobre probetas de UHPFRC. Se pretende obtener cinco parámetros para poder modelizar el comportamiento de los UHPFRC (López *et al*, 2016).

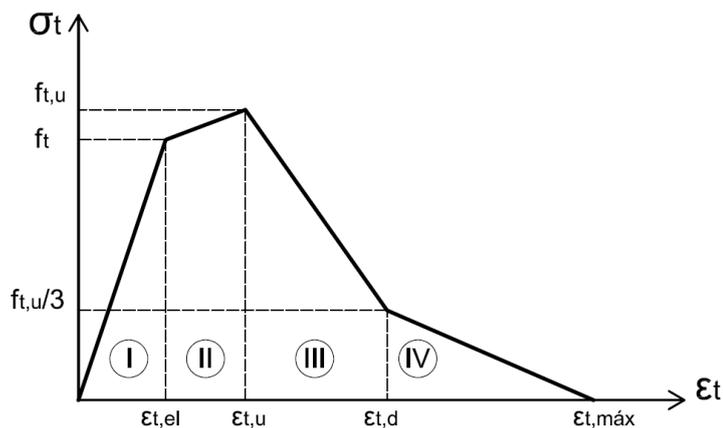


FIGURA 32. Etapas $\sigma - \epsilon$ ensayo de flexión en cuatro puntos.

Etapa I

Corresponde a la etapa de comportamiento elástico-lineal, que está gobernada fundamentalmente por el módulo de deformación (E_c) y por ende la rigidez del material. Los parámetros de dicha etapa están limitados por f_t , resistencia a tracción de primera fisuración y $\epsilon_{t,el}$, deformación correspondiente a la creación de micro-fisuras.

Etapa II

Es la etapa de endurecimiento y se caracteriza por la tensión última $f_{t,u}$ y la deformación última $\epsilon_{t,u}$, que son las que marcan el límite entre la etapa de endurecimiento y la etapa de ablandamiento a partir de la cual las micro-fisuras que se crean al final de la Etapa I pasan a ser macro-fisuras y comienzan a propagarse.

Etapa III y IV

Son las etapas de ablandamiento y están caracterizadas por la energía de fractura. Se puede observar cómo se desarrollan las grietas (Etapa III) hasta que se produce la apertura máxima de la grieta predominante donde la tensión es nula (Etapa IV). A mayor ductilidad del material dichas etapas son más prolongadas.

Ley cohesiva tensión-apertura de fisura ($\sigma - w$)

La ley cohesiva se caracteriza por definir la etapa de ablandamiento del comportamiento en fractura del hormigón, es decir, las correspondientes a las etapas III y IV, donde se produce la propagación de la fisuración. En este caso se ha optado por la simplificación mediante una ley bilineal en la que la primera pendiente está relacionada con el micro-agrietamiento, es decir, la propagación de micro-fisuras que pasan a ser macro-fisuras y con ello se produce un aumento de apertura de fisura w_d . En la segunda rama, se produce una significativa propagación de las fisuras. Al ser éstas de gran tamaño la pendiente de esta segunda rama aumenta hasta el punto donde la tensión es nula y la apertura de fisura máxima, $w_{máx}$, que es donde se produce la rotura definitiva.

Los parámetros de fractura real más significativos que se obtienen de las curvas anteriores son los siguientes:

- 1)** La energía de fractura, G_f (N/m), es el área encerrada por la curva de comportamiento $\sigma - w$ y representa la cantidad de energía necesaria para la creación de una grieta de superficie unidad en el hormigón.

2) La longitud característica, l_{ch} (mm), es un parámetro introducido por Hillerborg (Hillerborg *et al*, 1976) que caracteriza la fragilidad intrínseca del material cohesivo y se define como:

$$l_{ch} = \frac{G_F \cdot E_c}{f_{tu}^2}$$

Una propiedad del material a tener en cuenta en el estudio de su comportamiento en fractura es la zona de proceso de fractura, ZPF, que está relacionada con la longitud característica, y por tanto con la fragilidad o la ductilidad que el material posea. Es la zona de crecimiento de la grieta, en la que las microfisuras pueden transmitir tracciones entre ellas hasta un límite.

Como se ha comentado anteriormente, los hormigones de ultra-alta resistencia tienen una matriz muy compacta debido a los componentes que la forman, lo que lleva consigo tener muy baja porosidad y con ello tener mayor rigidez y comportamiento más frágil que los hormigones convencionales. Por ello, la energía de fractura y la longitud característica es menor.

Con el objetivo de mejorar dicha carencia se le añaden fibras de acero distribuidas homogéneamente durante el proceso de amasado para aumentar la ductilidad y con ello incrementar la energía de fractura y por consiguiente la longitud característica. En definitiva, el objetivo es asegurar un comportamiento menos frágil después del agrietamiento de la matriz, por tanto, que las etapas de ablandamiento, etapa III y IV, sean más prolongadas y se mejore el comportamiento en fractura.

A continuación, en la TABLA 9 y 10, se muestran los resultados de los ensayos de flexión en 4 puntos realizadas.

Ley tensión-deformación ($\sigma - \epsilon$)

TABLA 9. Ley $\sigma - \epsilon$ ensayo de flexión en 4 puntos.

| DS | | | | | | | | |
|--------------|------------------------------|-------------|-----------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------|--------|
| DENOMINACIÓN | E_c (MPa) | f_t (MPa) | $f_{t,u}$ (MPa) | $\epsilon_{t,el}$ | $\epsilon_{t,u}$ | $\epsilon_{t,d}$ | $\epsilon_{t,máx}$ | |
| DS_1 | 44500 | 7.6 | 10.5 | 0.00017 | 0.0080 | 0.022 | 0.061 | |
| DS_2 | 44500 | 9.3 | 11.8 | 0.00021 | 0.0089 | 0.021 | 0.053 | |
| DS_3 | 44500 | 6.7 | 6.2 | 0.00015 | 0.0021 | 0.017 | 0.046 | |
| DS_4 | 44500 | 5.7 | 5.8 | 0.00013 | 0.0023 | 0.012 | 0.056 | |
| DS_5 | 44500 | 9.8 | 12.7 | 0.00022 | 0.0069 | 0.190 | 0.049 | |
| DS_2_300 | 26873 | 3.2 | 4.1 | 1.2E-04 | 0.0056 | 0.020 | 0.102 | |
| DS_3_300 | 26873 | 3.6 | 4.6 | 1.3E-04 | 0.0062 | 0.023 | 0.049 | |
| DS_4_300 | 26873 | 3.1 | 3.9 | 1.1E-04 | 0.0040 | 0.016 | 0.059 | |
| DS_TA | Media | 44500 | 7.8 | 9.4 | 0.00018 | 0.0056 | 0.052 | 0.053 |
| | Desviación típica (\pm) | - | 1.7 | 3.2 | 0.000039 | 0.0032 | 0.0770 | 0.0059 |
| | Coeficiente de variación (%) | - | 22 | 34 | 22 | 57 | 147 | 11 |
| DS_300°C | Media | 26873 | 3.3 | 4.2 | 0.00012 | 0.0053 | 0.020 | 0.070 |
| | Desviación típica (\pm) | - | 0.3 | 0.4 | 0.000011 | 0.0011 | 0.0037 | 0.028 |
| | Coeficiente de variación (%) | - | 9 | 9 | 9 | 21 | 18 | 40 |
| DL | | | | | | | | |
| DENOMINACIÓN | E_c (MPa) | f_t (MPa) | $f_{t,u}$ (MPa) | $\epsilon_{t,el}$ | $\epsilon_{t,u}$ | $\epsilon_{t,d}$ | $\epsilon_{t,máx}$ | |
| DL_1 | 43199 | 6.5 | 5.9 | 0.00015 | 0.0020 | 0.015 | 0.012 | |
| DL_2 | 43199 | 8.2 | 12.2 | 0.00019 | 0.0060 | 0.014 | 0.064 | |
| DL_3 | 43199 | 5.6 | 8.1 | 0.00013 | 0.0052 | 0.017 | 0.046 | |
| DL_2_300 | 25096 | 1.9 | 3.0 | 7.7E-05 | 0.0039 | 0.010 | 0.151 | |

| DL_3_300 | | 25096 | 2.3 | 3.3 | 9.3E-05 | 0.0039 | 0.015 | 0.081 |
|--------------|-------------------------------|-------------|-------------|-----------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------|
| DL_4_300 | | 25096 | 2.9 | 4.1 | 1.2E-04 | 0.0061 | 0.024 | 0.144 |
| DL_5_300 | | 25096 | 3.0 | 3.9 | 1.2E-04 | 0.0067 | 0.025 | 0.118 |
| DL_TA | Media | 43199 | 6.8 | 8.7 | 0.00016 | 0.0044 | 0.0153 | 0.0406 |
| | Desviación típica (\pm) | - | 1.3 | 3.2 | 0.000030 | 0.0021 | 0.0013 | 0.0260 |
| | Coefficiente de variación (%) | - | 19 | 37 | 19 | 49 | 9 | 64 |
| DL_300°C | Media | 25096 | 2.5 | 3.6 | 0.00010 | 0.0051 | 0.019 | 0.123 |
| | Desviación típica (\pm) | - | 0.5 | 0.5 | 0.0000197 | 0.0015 | 0.0073 | 0.032 |
| | Coefficiente de variación (%) | - | 19 | 14 | 19 | 29 | 39 | 26 |
| DSL | | | | | | | | |
| DENOMINACIÓN | | E_c (MPa) | f_t (MPa) | $f_{t,u}$ (MPa) | $\epsilon_{t,eI}$ | $\epsilon_{t,u}$ | $\epsilon_{t,d}$ | $\epsilon_{t,máx}$ |
| DSL_1 | | 47800 | 2.3 | 4.6 | 4.8E-05 | 0.0015 | 0.012 | 0.092 |
| DSL_3 | | 47800 | 6.6 | 9.6 | 1.4E-04 | 0.0059 | 0.013 | 0.041 |
| DSL_4 | | 47800 | 5.9 | 5.1 | 1.2E-04 | 0.0016 | 0.012 | 0.045 |
| DSL_5 | | 47800 | 7.2 | 8.1 | 1.5E-04 | 0.0038 | 0.024 | 0.065 |
| DSL_1_300 | | 24076 | 2.4 | 3.7 | 9.8E-05 | 0.0093 | 0.032 | 0.076 |
| DSL_2_300 | | 24076 | 3.0 | 3.8 | 1.3E-04 | 0.0079 | 0.024 | 0.092 |
| DSL_3_300 | | 24076 | 1.1 | 3.8 | 4.7E-05 | 0.0117 | 0.020 | 0.101 |
| DSL_TA | Media | 47800 | 5.5 | 6.8 | 0.00012 | 0.0032 | 0.016 | 0.061 |
| | Desviación típica (\pm) | - | 2.2 | 2.4 | 0.000046 | 0.0021 | 0.0058 | 0.023 |
| | Coefficiente de variación (%) | - | 40 | 35 | 40 | 65 | 38 | 39 |
| DSL_300°C | Media | 24076 | 2.2 | 3.7 | 0.00009 | 0.0096 | 0.025 | 0.090 |
| | Desviación típica (\pm) | - | 1.0 | 0.1 | 0.0000397 | 0.0019 | 0.0059 | 0.012 |
| | Coefficiente de variación (%) | - | 44 | 2 | 44 | 20 | 24 | 14 |

Las FIGURAS 33, 34 y 35 muestran las leyes tensión-deformación a temperatura ambiente y a 300°C de DS, DL y DSL.

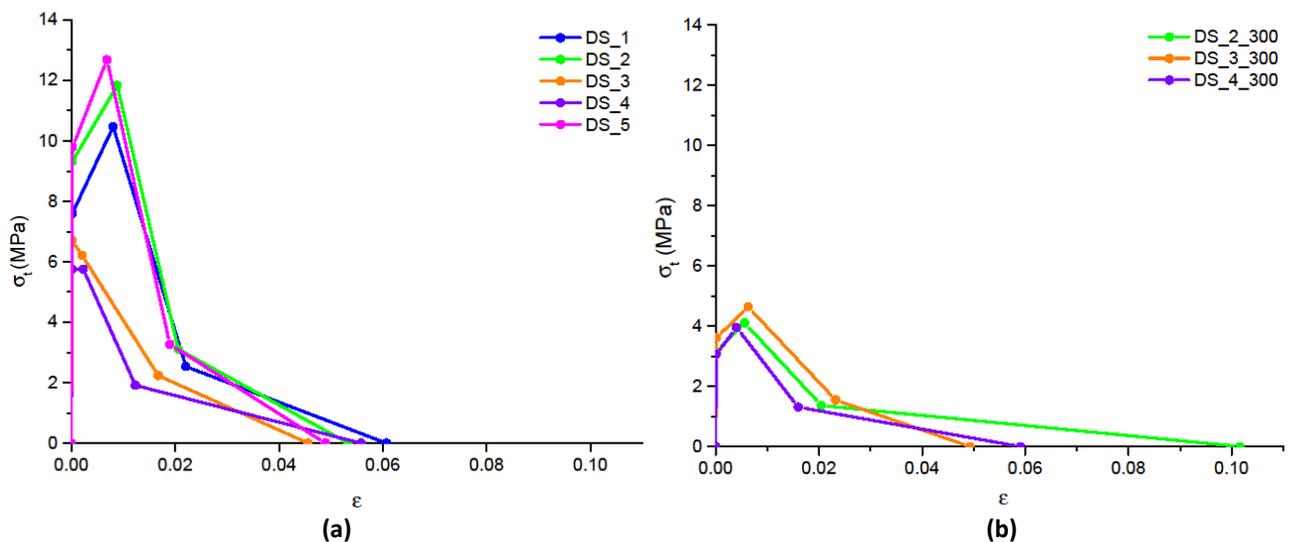


FIGURA 33 a) y b). Ley $\sigma - \epsilon$ DS (a) y ley $\sigma - \epsilon$ DS_300 (b).

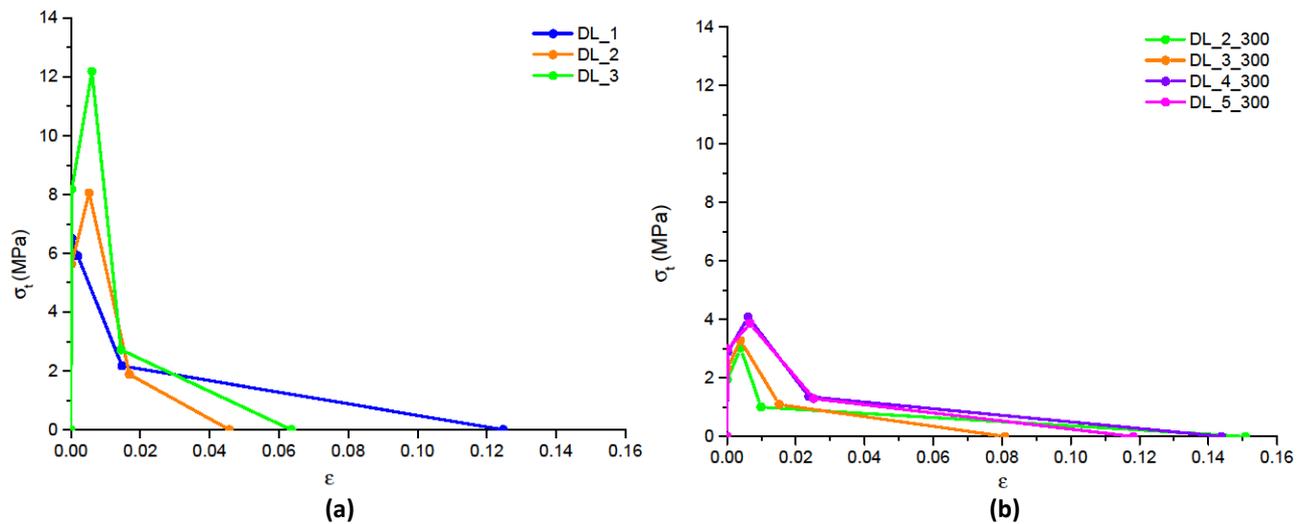


FIGURA 34 a) y b). Ley $\sigma - \epsilon$ DL(a) y ley $\sigma - \epsilon$ DL_300 (b).

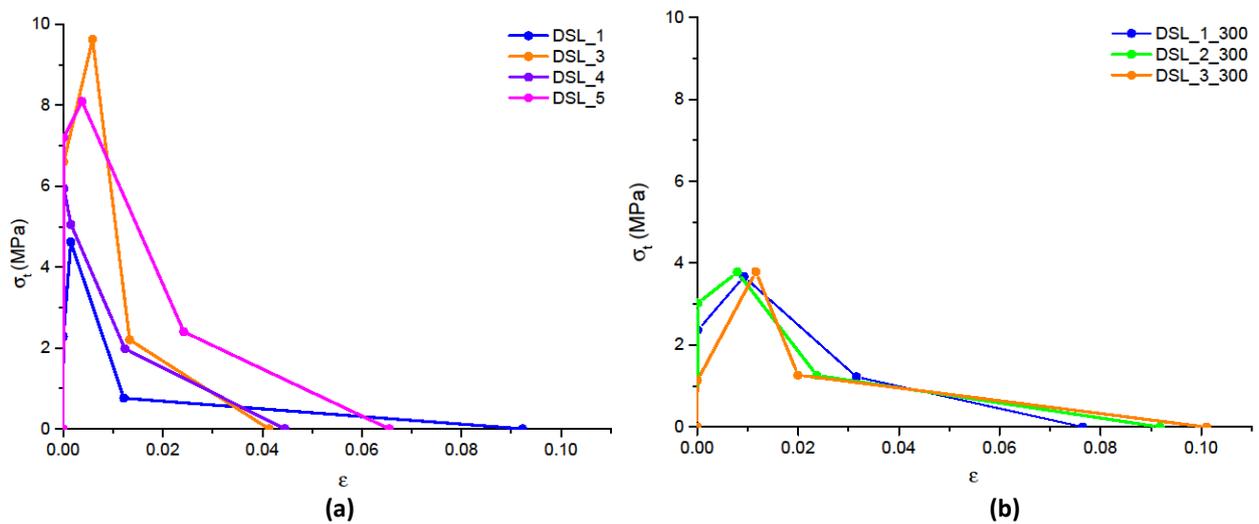


FIGURA 35 a) y b). Ley $\sigma - \epsilon$ DSL (a) y ley $\sigma - \epsilon$ DSL_300 (b).

a) A temperatura ambiente

En la Etapa I y II, se alcanzan mayores valores de f_t y $f_{t,u}$ mediante el empleo de fibras de acero cortas. Con DL se obtiene una disminución de un 13% de f_t y un 7% $f_{t,u}$ respecto a los valores de DS, mientras que con DSL se produce una mayor reducción de los valores, de un 30% de f_t y un 27% $f_{t,u}$ en relación a los valores obtenidos para DS.

No obstante, en la etapa III y IV, se alcanzan unas mayores deformaciones, $\epsilon_{t,máx}$, mediante el uso de DL. Con respecto a DS aunque se obtienen mayores valores de $\epsilon_{t,d}$, los valores de $\epsilon_{t,máx}$ son un 30% inferiores en relación a DL. No obstante, con DSL se consigue el mayor $\epsilon_{t,máx}$, un 50% más que el obtenido con DL.

Por tanto, se puede concluir que, aunque las fibras de acero aportan mayor resistencia en las etapas de endurecimiento (Etapa I y II), las fibras que aportan mejores resultados a la etapa de ablandamiento son las fibras de acero largas (III y IV) ya que permiten mayores deformaciones antes de la rotura.

b) Temperatura 300°C

En la Etapa I, se aprecia una considerable disminución del módulo de deformación por la influencia de la temperatura. En este caso, la variación fue mayor en DSL, con una disminución de un 50%, y ello es

debido a que dichas probetas sufrieron un mayor daño térmico en comparación que DS y DL. Además, la resistencia de fisuración, f_t , y la resistencia última a tracción disminuye en todos los casos, ya que la rigidez del material disminuye.

En la etapa III y IV, se observa como los valores de las deformaciones a 300°C aumentan en relación con los de temperatura ambiente. La gran variación de pendiente de la etapa IV para un mismo tipo de hormigón se debe a la acción de las fibras, ya que en esta última etapa el número de fibras que cosen las grietas para evitar que se propaguen depende de la orientación y efectividad de dichas fibras. Por tanto, a mayor efecto de dichas fibras mayor es la deformación máxima, $\epsilon_{t,máx}$, que se puede alcanzar sin que se produzca la rotura total de la probeta. Se consiguen valores superiores de $\epsilon_{t,máx}$ mediante el empleo de fibras de acero larga, DL, que en el caso de fibras de acero corta DS. Haciendo uso de ambos tipos de fibras, DSL, se llega a un resultado intermedio.

Partiendo de lo anterior, y fijándose en la FIGURA 33, en el caso de DS_2_300, se observa que llega a una mayor deformación máxima en la Etapa IV con respecto a DS_3_300 y DS_4_300, en las cuales se obtienen valores $\epsilon_{t,máx}$ similares. Ello se debe a una mayor concentración de fibras en la zona donde se produce la apertura de fisura. Algo similar ocurre en el caso de DL, FIGURA 34. Mediante el empleo de ambos tipos de fibras, DSL, la dispersión de los valores obtenidos es menor.

Por tanto, en la Etapa I y II, se puede llegar a la conclusión que el efecto de la temperatura reduce la rigidez del material y su capacidad de resistir esfuerzos de tracción, pero, por otro lado, la prolongación de las Etapas III y IV por el efecto cosido que ejercen las fibras lleva consigo un incremento de la ductilidad del material, siendo esta mayor mediante el empleo de fibras de acero largas ya que hace que la zona de propagación de fisuras aumente.

Ley cohesiva tensión-apertura de fisura ($\sigma - w$)

TABLA 10. Ley $\sigma - w$ ensayo de flexión en 4 puntos.

| DS | | | | | |
|--------------|-------------------------------|-----------------|------------|----------------|-------------|
| DENOMINACIÓN | | $f_{t,u}$ (MPa) | W_d (mm) | $W_{máx}$ (mm) | G_F (N/m) |
| DS_1 | | 10.5 | 1.9 | 7.1 | 22225 |
| DS_2 | | 11.8 | 1.6 | 6.0 | 21168 |
| DS_3 | | 6.2 | 2.0 | 5.8 | 12143 |
| DS_4 | | 5.8 | 1.4 | 7.2 | 10753 |
| DS_5 | | 12.7 | 1.6 | 5.7 | 22348 |
| DS_2_300 | | 4.1 | 2.0 | 12.8 | 12819 |
| DS_3_300 | | 4.6 | 2.3 | 5.7 | 9702 |
| DS_4_300 | | 3.9 | 1.6 | 7.3 | 7980 |
| DS_TA | Media | 9.4 | 1.7 | 6.3 | 17727 |
| | Desviación típica (\pm) | 3.2 | 0.2 | 0.7 | 5772 |
| | Coefficiente de variación (%) | 34.2 | 14.7 | 11.3 | 33 |
| DS_300°C | Media | 4.2 | 1.9 | 7.7 | 10167 |
| | Desviación típica (\pm) | 0.4 | 0.3 | 3.7 | 2453 |
| | Coefficiente de variación (%) | 8.6 | 17.4 | 47.9 | 24 |
| DL | | | | | |
| DENOMINACIÓN | | $f_{t,u}$ (MPa) | W_d (mm) | $W_{máx}$ (mm) | G_F (N/m) |
| DL_1 | | 5.9 | 1.7 | 16.4 | 21199 |
| DL_2 | | 12.2 | 1.1 | 7.7 | 22631 |
| DL_3 | | 8.1 | 1.6 | 5.4 | 13635 |

| DL_2_300 | | 3.0 | 0.8 | 19.6 | 11082 |
|--------------|-------------------------------|-----------------|------------|------------------------|-------------|
| DL_3_300 | | 3.3 | 1.5 | 10.3 | 8084 |
| DL_4_300 | | 4.1 | 2.4 | 18.4 | 17316 |
| DL_5_300 | | 3.9 | 2.5 | 14.9 | 14362 |
| DL_TA | Media | 8.7 | 1.5 | 9.8 | 19155 |
| | Desviación típica (\pm) | 3.2 | 0.3 | 5.8 | 4834 |
| | Coefficiente de variación (%) | 37 | 20 | 59 | 25 |
| DL_300°C | Media | 3.6 | 1.8 | 15.8 | 12711 |
| | Desviación típica (\pm) | 0.5 | 0.8 | 4.2 | 4000 |
| | Coefficiente de variación (%) | 14 | 44 | 27 | 31 |
| DSL | | | | | |
| DENOMINACIÓN | | $f_{t,u}$ (MPa) | W_d (mm) | $W_{m\acute{a}x}$ (mm) | G_F (N/m) |
| DSL_1 | | 4.6 | 1.4 | 12.1 | 12611 |
| DSL_3 | | 9.6 | 1.0 | 4.8 | 12491 |
| DSL_4 | | 5.1 | 1.5 | 5.7 | 8503 |
| DSL_5 | | 8.1 | 2.7 | 8.2 | 22234 |
| DSL_1_300 | | 3.7 | 3.0 | 9.0 | 10932 |
| DSL_2_300 | | 3.8 | 2.1 | 11.2 | 11021 |
| DSL_3_300 | | 3.8 | 1.1 | 11.9 | 9646 |
| DSL_TA | Media | 6.8 | 1.7 | 7.7 | 13960 |
| | Desviación típica (\pm) | 2.4 | 0.8 | 3.3 | 5837 |
| | Coefficiente de variación (%) | 35 | 45 | 43 | 42 |
| DSL_300°C | Media | 3.7 | 2.1 | 10.7 | 10533 |
| | Desviación típica (\pm) | 0.1 | 0.9 | 1.5 | 769 |
| | Coefficiente de variación (%) | 2 | 45 | 14 | 7 |

Las FIGURAS 36, 37 y 38 muestran las leyes tensión-deformación a temperatura ambiente y a 300°C de DS, DL y DSL.

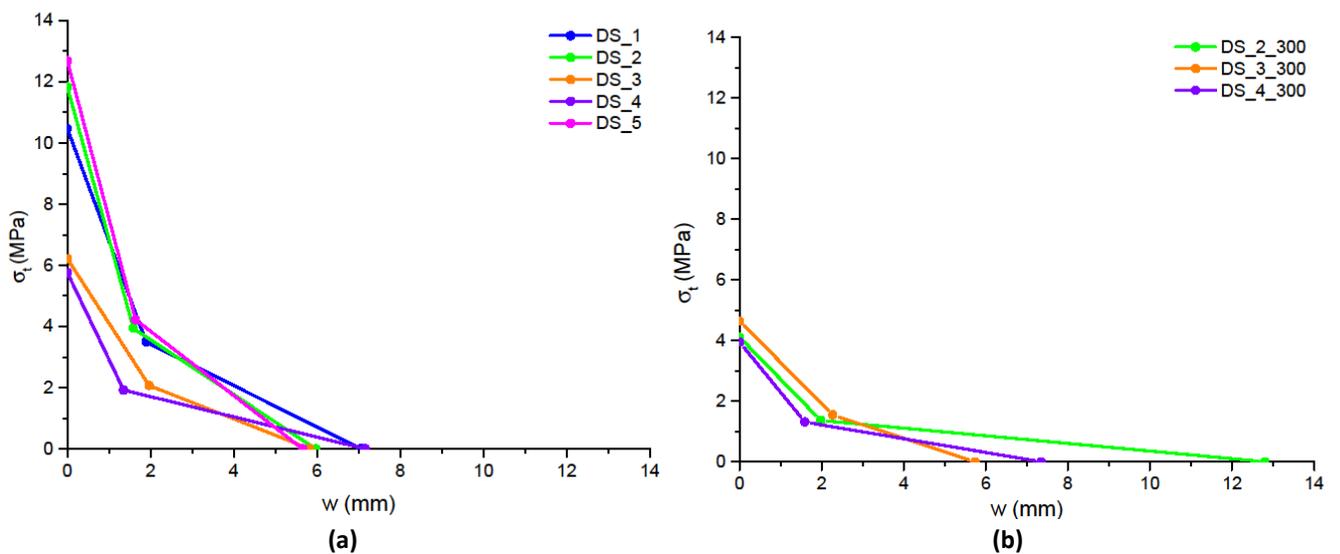


FIGURA 36 a) y b). Ley cohesiva $\sigma - w$ DS (a) y ley cohesiva $\sigma - w$ DS_300 (b).

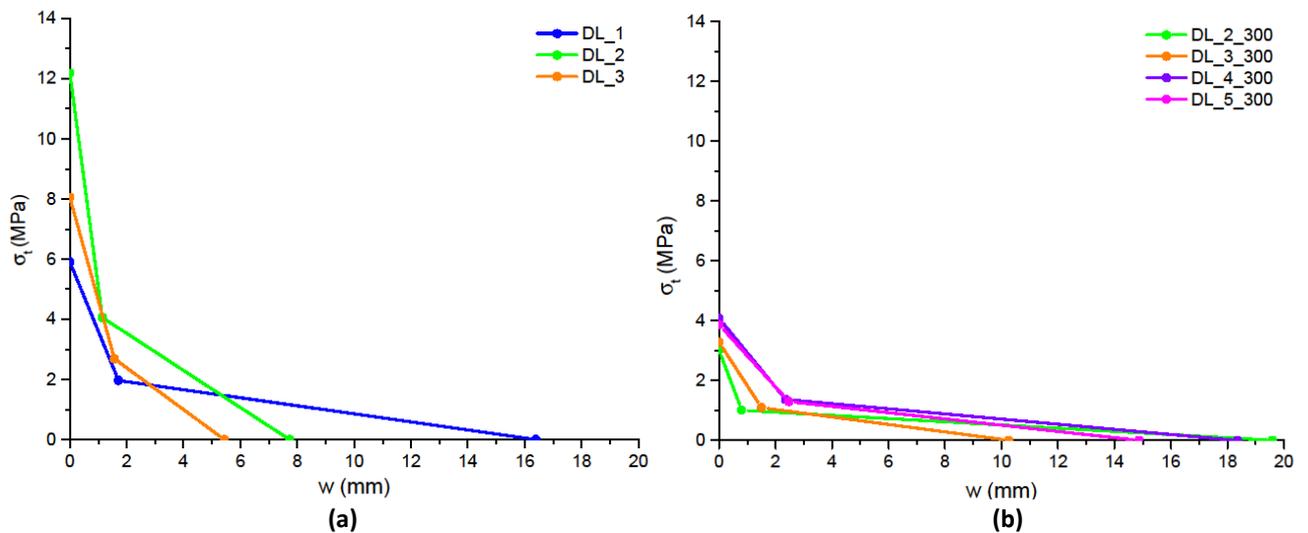


FIGURA 37 a) y b). Ley cohesiva $\sigma - w$ DL (a) y ley cohesiva $\sigma - w$ DL₃₀₀ (b).

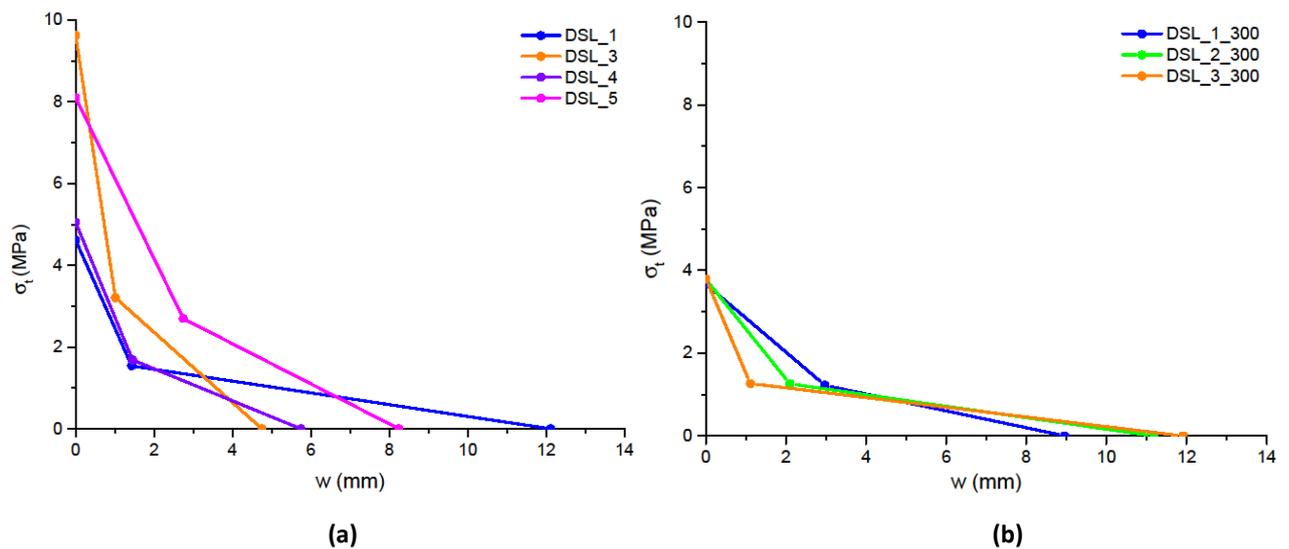


FIGURA 38 a) y b). Ley $\sigma - w$ cohesiva DSL (a) y ley cohesiva $\sigma - w$ DSL₃₀₀ (b)

De las leyes de $\sigma - w$ para cada uno de los tipos de hormigones, los datos más relevantes para poder conocer como es el comportamiento de fractura son los valores de energía de fractura y la longitud característica (TABLA 11). A continuación, se muestran los valores medios de energía de fractura y la longitud característica de cada uno de los tipos de hormigones.

TABLA 11. Energía de fractura y longitud característica.

| | G_F (N/m) | | l_{ch} (mm) | |
|-----|-------------|--------------|---------------|-------------|
| | TA | 300°C | TA | 300°C |
| D0 | 64 | - | 128 | - |
| DS | 17727 ± 33% | 10167 ± 24 % | 10079 ± 39 % | 15440 ± 29% |
| DL | 19155 ± 25% | 12711 ± 31% | 13960 ± 77 % | 24858 ± 19% |
| DSL | 13960 ± 42% | 10533 ± 7% | 16720 ± 54 % | 18085 ± 10% |

a) A temperatura ambiente

A temperatura ambiente, con respecto a D0, la adición de fibras de acero en la matriz de hormigón aumenta la energía de fractura ya que disminuyen la fisuración gracias al efecto cosido. Ello hace que

longitud característica aumente y ello se manifiesta en una mayor ductilidad, ya que las fibras hacen que la zona de propagación de las fisuras sea mayor ya que cosen una mayor longitud de fisura que si dichas fibras no estuviesen y absorben las tracciones que las microfisuras no son capaces de resistir.

El aumento de la longitud característica, con respecto a D0, es mayor con DL, un 39% más que la obtenida con DS, ya que las fibras de acero largas permiten mayores deformaciones antes de la rotura total. Con DSL se consigue un mayor incremento, hasta un 20 % con respecto a DL.

b) Temperatura 300°C

El efecto de la temperatura reduce la energía de fractura. Por el contrario, la longitud característica aumenta y, por ello, la zona de propagación de fisuras del material es mayor, confiriéndole una mayor ductilidad al material.

La mayor disminución de la energía de fractura se produce para DS, un 43%. Con el empleo de fibras de acero larga se reduce un 34% y si se usan ambos tipos de fibras de acero disminuye un 25%.

La influencia de la temperatura, para DL hace que se produzca un aumento de la longitud característica de un 78% con respecto a la misma a temperatura ambiente, siendo, por tanto, la fibra de acero larga, la que proporciona al UHPFRC una mayor ductilidad porque permite el cosido de fisuras de mayor tamaño.

Por tanto, el objetivo de que el hormigón de ultra-alta resistencia sea más dúctil para mejorar su comportamiento en fractura, se consigue mediante la adición de fibras de acero. El efecto de la temperatura es favorable para dicha ductilidad pero desfavorable para las resistencia a tracción, f_t , u , y la primera resistencia a la fisuración, f_t , ya que disminuyen en relación a las mismas probetas a temperatura ambiente.

5. TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA (TAC)

5.1. OBTENCIÓN DATOS TAC

Como se indicó en el apartado 4.1, el hormigón de ultra-alta resistencia se caracteriza por tener una matriz muy densa debido a la baja relación agua-cemento y a la inclusión de componentes de tamaño de partícula muy pequeño en comparación con los empleados en hormigones convencionales. Ello se manifiesta en que dicha matriz de hormigón presenta una porosidad muy baja.

Para poder estudiar cómo varía la porosidad de este tipo de hormigones cuando se encuentran sometidos a temperatura, se empleó tomografía computarizada (TAC) para así poder comparar entre los UHPFRC-DSL+PP a temperatura ambiente y a 300°C. Con ello se podrá visualizar como varía dicha porosidad cuando es sometido el hormigón a 300°C, que está relacionado con las propiedades mecánicas obtenidas en la campaña experimental llevada cabo. No obstante, dicha relación se detallará más adelante.

El análisis mediante TAC se llevó a cabo en el Centro de Investigación Tecnológica e Innovación de la Universidad de Sevilla (CITIUS), mediante el empleo de un equipo de inspección de rayos X tal y como se puede observar en la FIGURA 39. Dicho equipo genera imágenes 2D y 3D, que se reconstruyen y tratan haciendo uso del programa VGStudio MAX 2.2.3 del Servicio de rayos X de la Universidad de Sevilla.



FIGURA 39. Equipo de inspección de rayos X, modelo Y.Cougar SMT de la compañía YXLON. Fuente: Fotografía tomada *in situ*.

Se analizaron cuatro muestras de UHPFRC-DSL+PP, cuya nomenclatura es B-I-2 CL3, B-I-3 CL6, B-I-2 CL7 Y B-I-3 CL2 (FIGURA 40.a). La FIGURA 40.b indica de qué zona de una probeta prismática se han obtenido dichas muestras. Ya que la nomenclatura de las muestras es B-I, se han extraído de la zona central de la fila superior, ya que es la zona más desfavorable al acumularse más aire atrapado cuando el hormigón está en estado fresco.

Como se ha indicado, dichas muestras fueron en primera instancia escaneadas a temperatura ambiente y posteriormente, las mismas muestras se calentaron a 300°C, y se les realizaron un TAC de la misma zona que a temperatura ambiente.

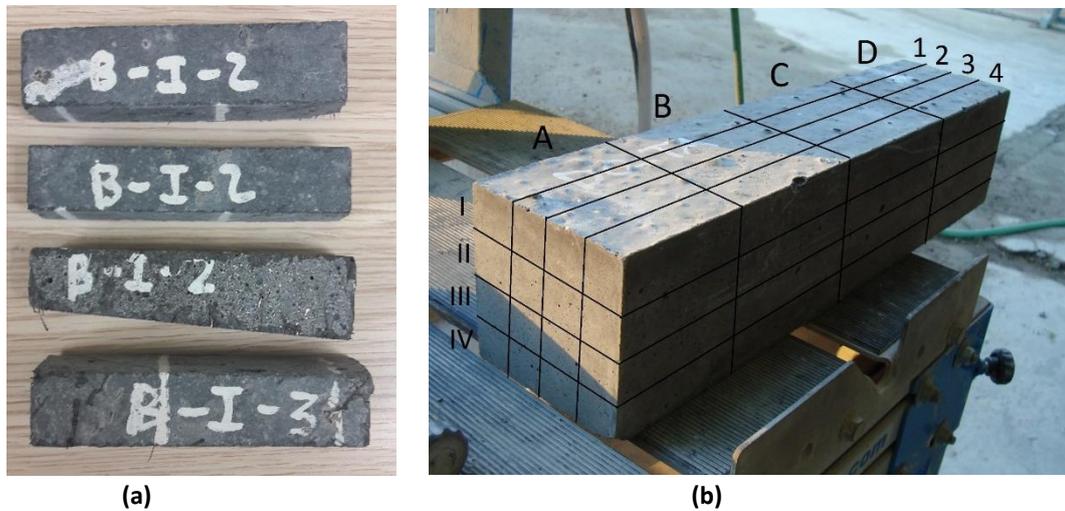


FIGURA 40 a) y b). a) Muestras para ensayos con TAC y b) esquema de la extracción de muestras para TAC DSL+PP. Fotografía tomada *in situ*.

A continuación, se va a describir el proceso seguido para llevar a cabo el procesamiento de datos obtenido con la tomografía computarizada.

El TAC proporciona imágenes de rayos X en 2D de 1024x1024 píxeles, que da información de la densidad de diferentes zonas de la matriz de hormigón. La región analizada es exactamente la misma a temperatura ambiente y a 300°C, para reducir la dispersión de porosidad propia del material y que se pueda determinar con mayor precisión el efecto de la temperatura en la matriz. Por tanto, lo que se debe realizar es la elección de la zona de estudio de la probeta mediante el análisis de dichos planos. Para ello se deben analizar por parejas, es decir, la probeta a temperatura ambiente con su respectiva a 300°C, y para ello se hará uso del programa ImageJ.

En la FIGURA 41, se puede observar uno de los planos obtenidos en el que se visualizan los componentes. En él se aprecian unas zonas blancas correspondientes a las fibras de acero (zonas de mayor densidad), áreas más oscuras correspondientes a los poros que contiene el hormigón (zonas de menor densidad) y la matriz de hormigón que está en una escala de grises.

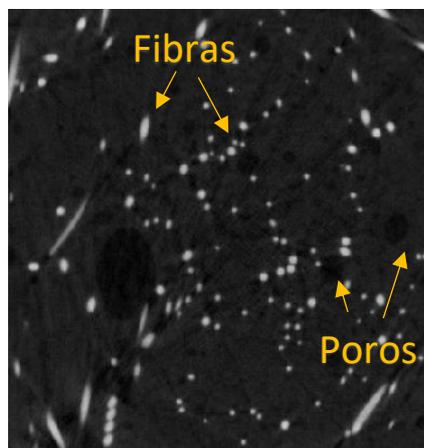


FIGURA 41. Plano muestra DSL+PP. Fuente: IMAGEJ.

Los siguientes pasos que se realizan en IMAGEJ, se basan en la búsqueda de la zona objeto de estudio, es decir, cuál es el plano de inicio y el final, en los que se puedan apreciar la escala de grises y la mayor nitidez de la matriz de hormigón, los poros y fibras que contiene. En dicha zona se eliminan los defectos artificiales como el endurecimiento del haz y los efectos de anillo.

Lo primero que se debe realizar es la búsqueda de la sección representativa, es decir, donde sea similar el plano a TA con el plano a 300°C. Seguidamente se realiza el cálculo de la distancia entre la sección de referencia y la sección inicial, para lo que se debe conocer el tamaño de voxel (mm/pixel). Para ello, mediante la ayuda del programa VGL, y abriendo uno de los archivos que ha sido proporcionado por el TAC para la probeta a TA, se obtiene dicho tamaño de voxel.

$$\text{Distancia 1 (mm)} = (\text{Sección referencia} - \text{Sección inicio}) \cdot \text{tamaño de voxel (mm/pixel)}$$

Una vez conocida dicha distancia 1, se puede conocer la sección inicial de la probeta que ha sido sometida a 300°C, ya que la distancia entre la sección de referencia y la sección inicial debe ser la misma que la de la probeta a TA. Para ello se requiere también el tamaño de voxel de ésta.

Una vez realizado lo anterior, se busca la sección final con el mismo proceso seguido para el cálculo de la sección inicial, con la diferencia que la distancia entre ellos se calcula variando los términos:

$$\text{Distancia 2 (mm)} = (\text{Sección final} - \text{Sección referencia}) \cdot \text{tamaño de voxel (mm/pixel)}$$

Se procede de la misma forma que la empleada para la búsqueda de la sección inicial en la probeta sometida a 300°C, para hallar su respectiva sección final.

Una vez realizado lo anterior se comprueban que las secciones calculadas en ambos casos coinciden unas con otras. En la FIGURA 42 se puede observar lo anteriormente descrito.

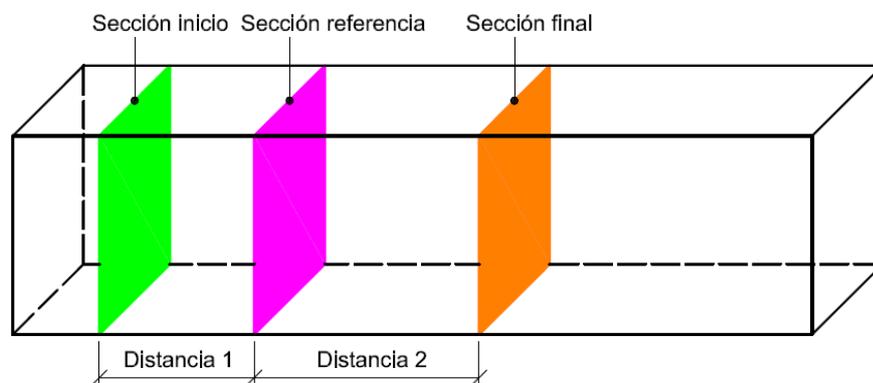


FIGURA 42. Zona objeto de estudio. Fuente: Elaboración propia.

En la TABLA 12 se muestra cuáles han sido las zonas de estudio seleccionadas para cada una de las probetas.

TABLA 12. Información de la zona objeto de estudio de las probetas analizadas mediante TAC.

| | Sección inicio | Sección referencia | Sección final | Tamaño analizado (mm) | Tamaño de voxel (mm/pixel) | L (mm) | B (mm) | D (mm) | volumen (mm ³) |
|------------------|----------------|--------------------|---------------|-----------------------|----------------------------|---------|---------|---------|----------------------------|
| B-I-2 CL3 | 48 | 77 | 956 | 41.70 | 0.04592976 | 41.7042 | 21.6329 | 20.438 | 18438.8118 |
| B-I-2 CL6 | 65 | 85 | 960 | 32.00 | 0.03575913 | 32.0044 | 20.9191 | 19.9894 | 13382.9681 |
| B-I-2 CL7 | 68 | 78 | 960 | 31.90 | 0.03575934 | 31.8973 | 19.9895 | 19.4888 | 12426.2748 |
| B-I-3 CL2 | 55 | 83 | 975 | 42.26 | 0.04592976 | 42.2554 | 25.8585 | 19.7957 | 21629.9945 |

| | | | | | | | | | |
|----------------------|----|----|-----|-------|------------|---------|---------|---------|------------|
| B-I-2 CL3 300 | 48 | 77 | 956 | 41.70 | 0.04592967 | 41.7041 | 21.5869 | 20.4846 | 18441.5118 |
| B-I-2 CL6 300 | 55 | 75 | 950 | 32.00 | 0.03575891 | 32.0042 | 20.919 | 20.0607 | 13430.5556 |
| B-I-2 CL7 300 | 59 | 69 | 951 | 31.90 | 0.03575913 | 31.8971 | 19.9894 | 19.1311 | 12198.0638 |
| B-I-3 CL2 300 | 33 | 61 | 953 | 42.26 | 0.04592967 | 42.2553 | 25.8584 | 19.7957 | 21629.8597 |

Una vez definida la zona objeto de estudio, se tratan dichos planos que contiene haciendo uso del programa AVIZO 8.1. En dicho programa se definen unos umbrales de escalas de grises con los que se pueden visualizar las áreas de interés. Para los umbrales de grises más claros se distinguen las fibras de acero (FIGURA 43.a) y para los umbrales de grises más oscuros se identifican los poros (FIGURA 43.b).

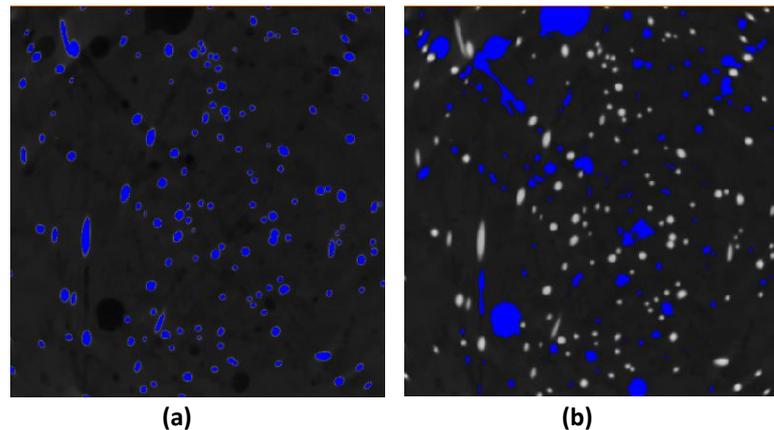


FIGURA 43 a) y b). a) Fibras de acero y b) Porosidad de la matriz de hormigón. Fuente: AVIZO 8.1.

El objetivo de este análisis es determinar la porosidad de la matriz de acuerdo con los valores umbrales de escala de grises. No basta con obtener la porosidad para un determinado umbral, sino que es necesario determinar cuál es el umbral óptimo el que se observe que están seleccionados la totalidad de los poros. En las FIGURAS 44.a), b) y c) se muestran los poros de las imágenes 2D para diferentes umbrales de escala de grises.

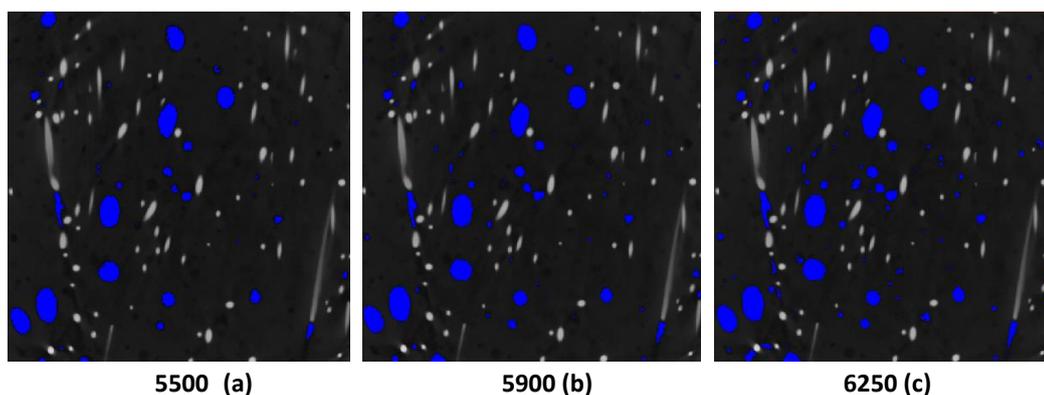


FIGURA 44 a), b) y c). Poros para diferentes umbrales de escalas de grises a) umbral 5500, b) 5900 y c) 6250 para la muestra B-I-2 CL6. Fuente: AVIZO 8.1.

Para cada una de las tablas obtenidas en función del umbral seleccionado se obtiene la fracción de volumen ocupado por los poros en la matriz de hormigón. Se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\text{Porosidad (\%)} = \frac{\text{Volumen poros}}{\text{Volumen pieza} - \text{Volumen fibras}}$$

En la FIGURA 45 se muestra un ejemplo de la tendencia de los valores de porosidad en relación con los umbrales de escala de grises seleccionados para la muestra B-I-2 CL6 a temperatura ambiente. En él se puede observar que para valores bajos de los umbrales de escala de grises la porosidad presenta una tendencia lineal. A medida que se seleccionan valores más altos de umbrales de escala de grises, la porosidad empieza a presentar una tendencia exponencial. Este último suceso es debido a que los valores más altos de umbrales comienzan a seleccionar las zonas menos densas de la matriz de hormigón no correspondientes a los poros.

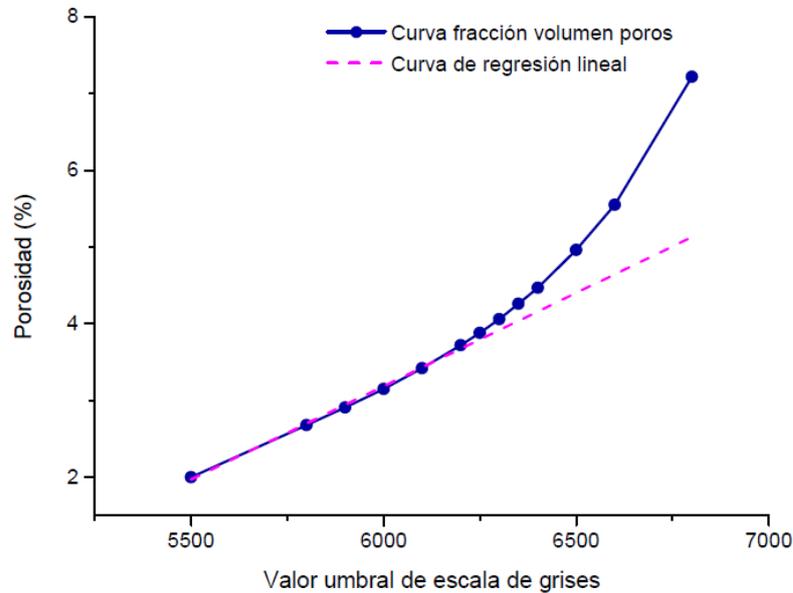


FIGURA 45. Curva de porosidad - umbral de escala de grises.

Una vez obtenida la curva porosidad-umbral de grises para cada muestra analizada, se determina cuál es el valor umbral óptimo, que se ha definido como aquel valor de la porosidad que difiere menos de 0.1 % de la recta de regresión lineal, ya que para dicho valor se ha comprobado que no se producen variaciones significativas en la solución.

Una vez determinado el valor umbral óptimo, se analizarán los resultados geométricos de la porosidad y se podrán elaborar dos gráficas, la primera del diámetro equivalente y la segunda del volumen de los poros. Así pues, se podrá finalmente analizar la influencia de la temperatura en la morfología de los poros, que como se indicó con anterioridad, está relacionado con el gradiente térmico.

5.2. RESULTADOS TAC

Los datos obtenidos muestran como la presencia de fibras, tanto de acero como de polipropileno, afectan a la matriz de hormigón cuando ésta se ve sometida a temperatura.

La adición de fibras de polipropileno al hormigón de ultra-alta resistencia sin refuerzo de fibras de acero (UHPC) reduce el fenómeno del *spalling*, ya que dichas fibras funden a 170°C aproximadamente (Li *et al*, 2018) creando canales que reducen las tensiones locales producidas por el gradiente térmico y por el vapor de agua generados por la acción de la temperatura. En las FIGURAS 46.a) y 46.b) se pueden observar dichos fenómenos:

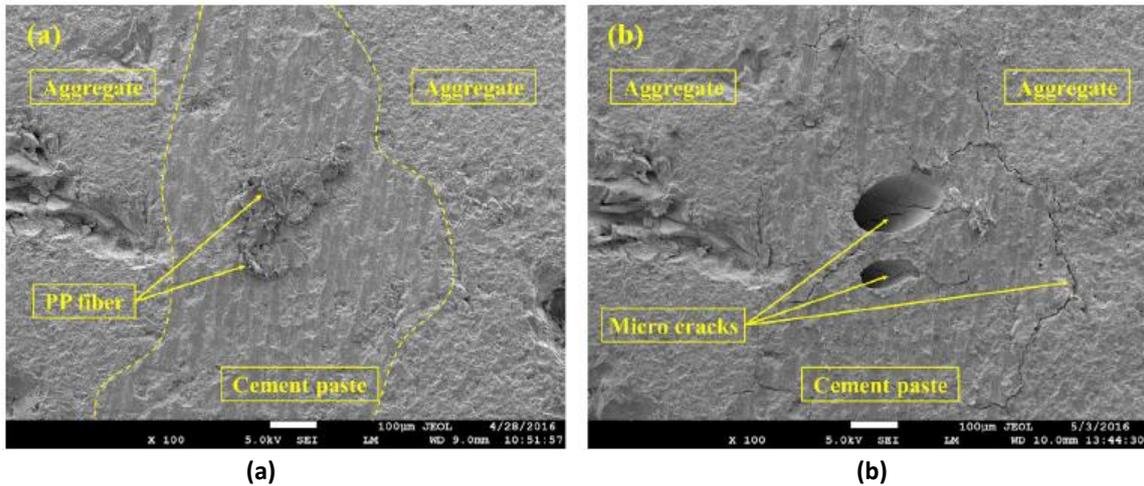


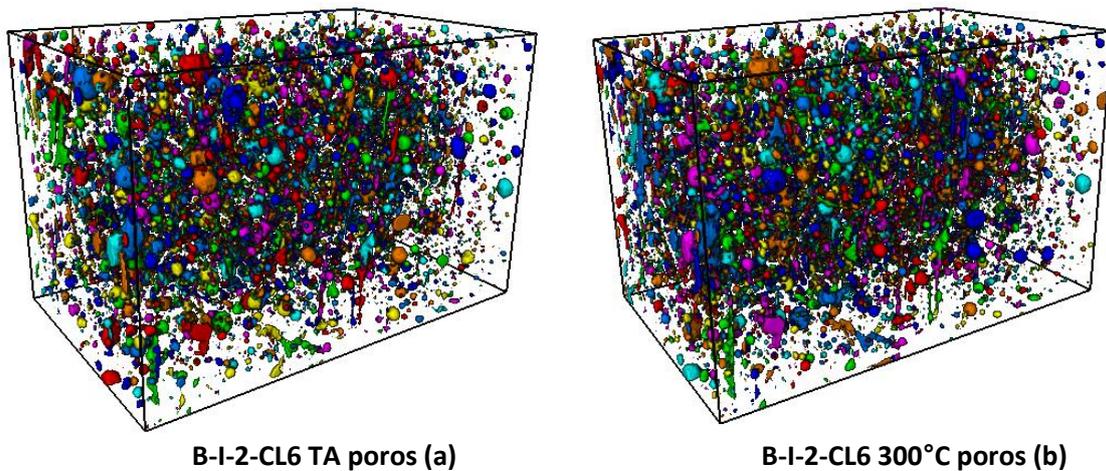
FIGURA 46 a) y b). Imagen de la microestructura de un UHPC-PP (a) a temperatura ambiente (b) tras la exposición a 250°C. Fuente: (Li *et al*,2018).

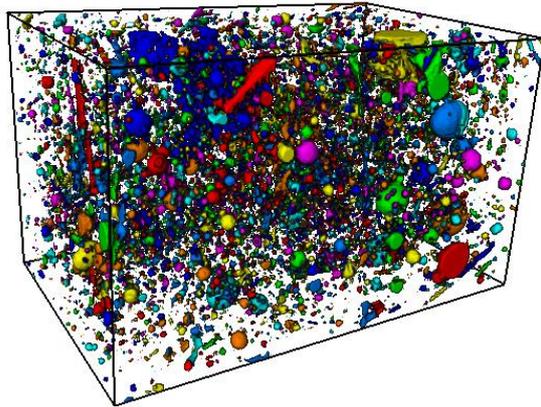
Como se puede observar en la TABLA 13, la porosidad aumenta al someter al hormigón a temperatura debido al daño térmico descrito con anterioridad.

TABLA 13. Porosidad de DSL+PP a temperatura ambiente y 300°C.

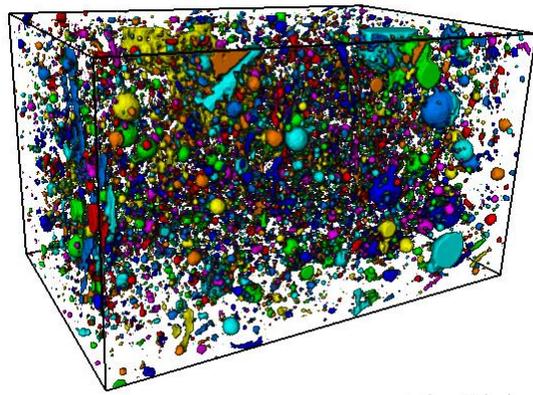
| Porosidad (%) | | |
|-------------------------------|------|-------|
| DENOMINACIÓN | TA | 300°C |
| B-I-2 CL6 | 3.88 | 4.37 |
| B-I-2 CL7 | 4.13 | 4.46 |
| B-I-3 CL2 | 4.01 | 4.32 |
| Media | 4.01 | 4.38 |
| Desviación típica (±) | 0.13 | 0.07 |
| Coefficiente de variación (%) | 3% | 2% |

En la FIGURA 47 a) a la FIGURA 47 f) se representa la distribución de poros tridimensional a temperatura ambiente y a 300°C respectivamente para una misma muestra obtenida mediante los análisis tomográficos realizados.

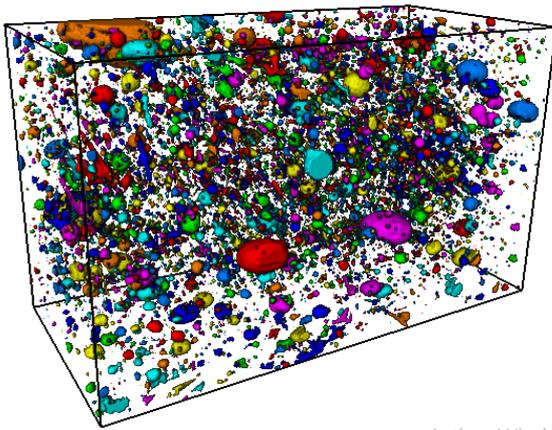




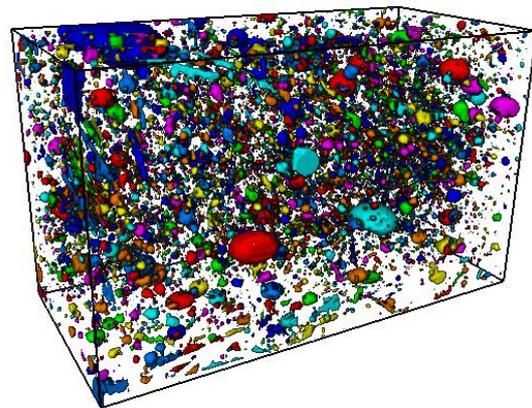
B-I-2-CL7 TA poros (c)



B-I-2-CL7 300°C poros (d)



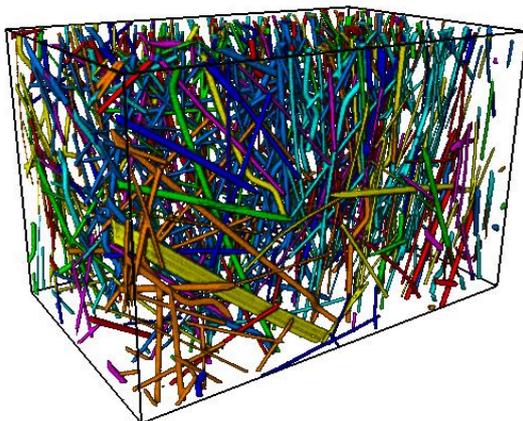
B-I-3-CL2 TA poros (e)



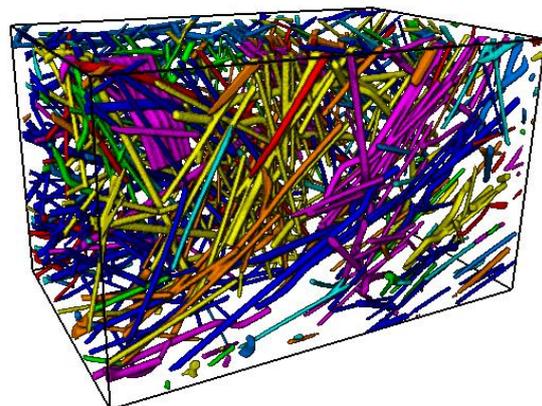
B-I-3-CL2 300°C poros (f)

FIGURA 47 a), b), c), d), e) y f). Distribución de poros 3D DSL+PP a TA y UHPFRC-DSL+PP a 300°C. Fuente: AVIZO 8.1.

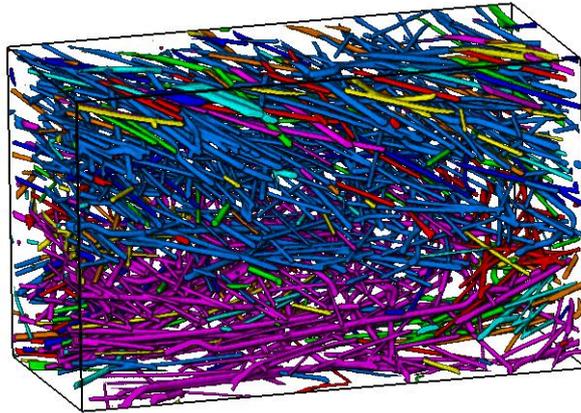
Por otro lado, de la FIGURA 48 a) a la FIGURA 48 c) se observa la distribución de las fibras de acero en cada una de las muestras.



B-I-2-CL6 fibras (a)



B-I-2-CL7 fibras (b)



B-I-3-CL2 fibras (c)

FIGURA 48 a), b) y c). Distribución de fibras 3D muestras DSL+PP. Fuente: AVIZO 8.1.

Gráfica de diámetro equivalente

A continuación, se muestran dos gráficas con relación al diámetro equivalente de los poros a temperatura ambiente y 300°C. La primera gráfica, FIGURA 49, muestra la densidad de poros, es decir, el número de poros por centímetro cúbico mientras que la segunda gráfica, FIGURA 50, representa la densidad de poros en términos relativos, es decir, el porcentaje de poros.

Lo que se puede observar en la FIGURA 49, es que a excepción del intervalo 0.10-0.15, el efecto de la temperatura en la matriz de hormigón provocó un ligero aumento de la densidad de poros. En términos de porcentaje de poros este efecto fue similar. Dicho aumento de porosidad es provocado por el daño térmico generado por el efecto combinado de la deshidratación y la descomposición de productos de hidratación y el gradiente térmico en la matriz. La formación de huecos por la fusión de las fibras de polipropileno cuando éstas alcanzan una temperatura de 170°C (Varona *et al*, 2018) no es posible apreciarse con el TAC, cuya precisión es de más de 40 micras.

No obstante, en el intervalo de 0.10-0.15, se puede observar que se produce una disminución tanto de la densidad como del porcentaje de poros. Esto es debido al efecto cosido de las fibras de acero, que evitan la propagación de daño en la matriz de hormigón para los rangos más pequeños de poros (Abbas *et al*, 2014).

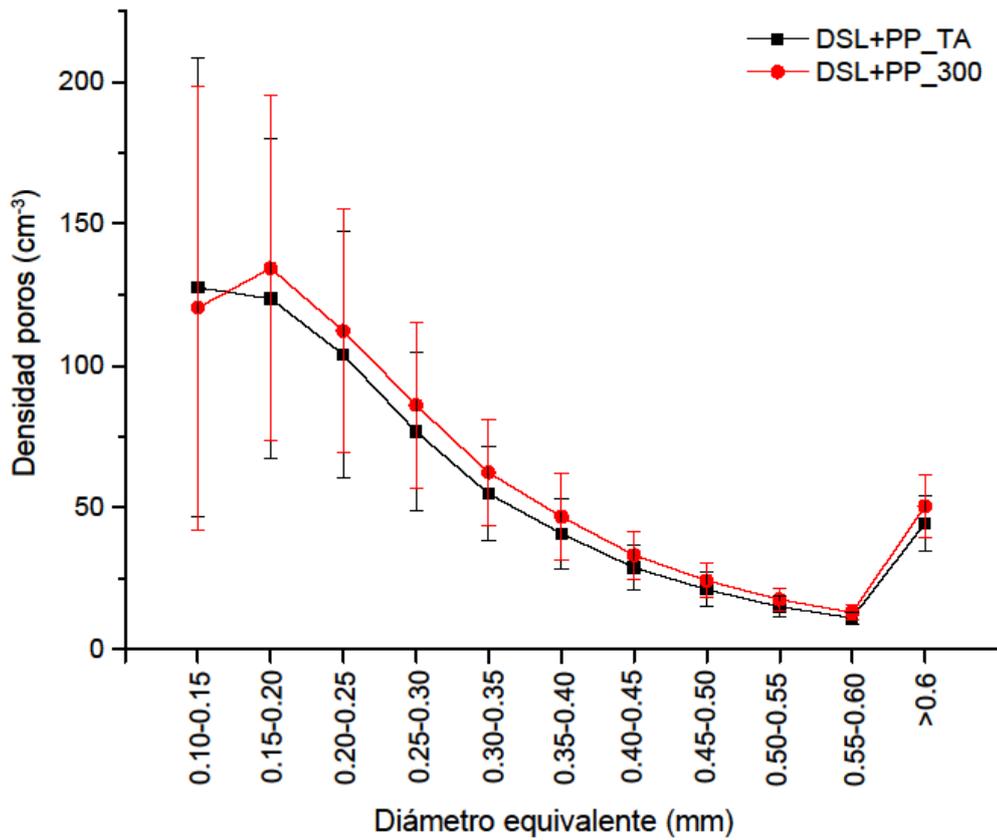


FIGURA 49. Distribución de diámetro equivalente de UHPFRC a temperatura ambiente y 300°C densidad de poros.

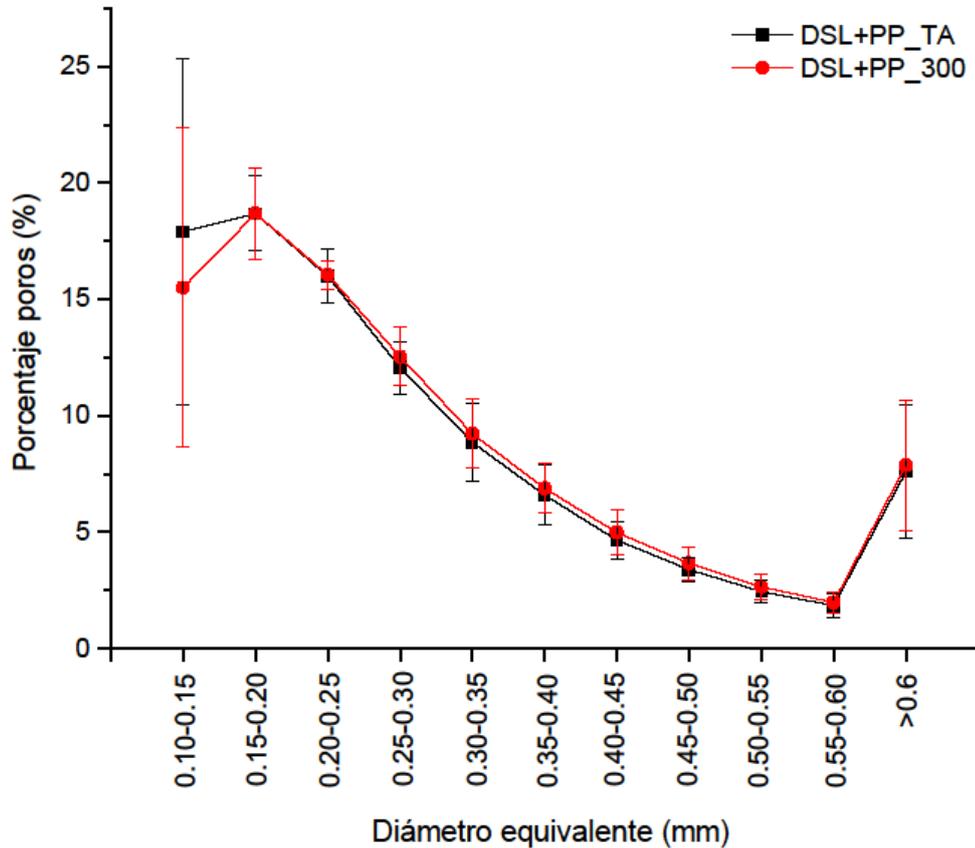


FIGURA 50. Distribución de diámetro equivalente de UHPFRC a temperatura ambiente y 300°C porcentaje de poros.

Gráfica de volumen poros

En la FIGURA 51 se muestra la densidad de poros (poros/cm³) de las muestras a TA y 300°C y en la FIGURA 52 se representa la densidad de poros en términos relativos (porcentaje de la porosidad total) para TA y 300°C, pero ambos relacionados esta vez con el volumen de poros. Se ha añadido a cada gráfica global una gráfica en detalle del primer rango, es decir, el rango por debajo de 0.010 mm³.

En la gráfica general se puede observar que se produce en todos los rangos un ligero aumento de la densidad de poros. Por otro lado, en la gráfica en detalle ocurre algo similar salvo en el rango inferior a 0.002 mm³. Lo cual indica que el daño térmico no afecta a poros de volumen inferior a 0.001 mm³. Sin embargo, el rango de poros con volúmenes entre 0.003 – 0.04 mm³ es el más afectado por el daño térmico.

Con respecto a la gráfica del porcentaje de poros se puede ver que los valores son muy similares a temperatura ambiente y a 300°C. Esto indica que, aunque se produce un aumento del volumen de poros por daño térmico, la distribución en la matriz es muy similar que a TA. Por el contrario, en el rango inferior a 0.01 mm³ el porcentaje de poros a 300°C disminuye en relación con su respectivo a temperatura ambiente.

Con ello se puede decir que los poros más grandes no se ven afectados por las tensiones locales que se generan por la influencia de la temperatura.

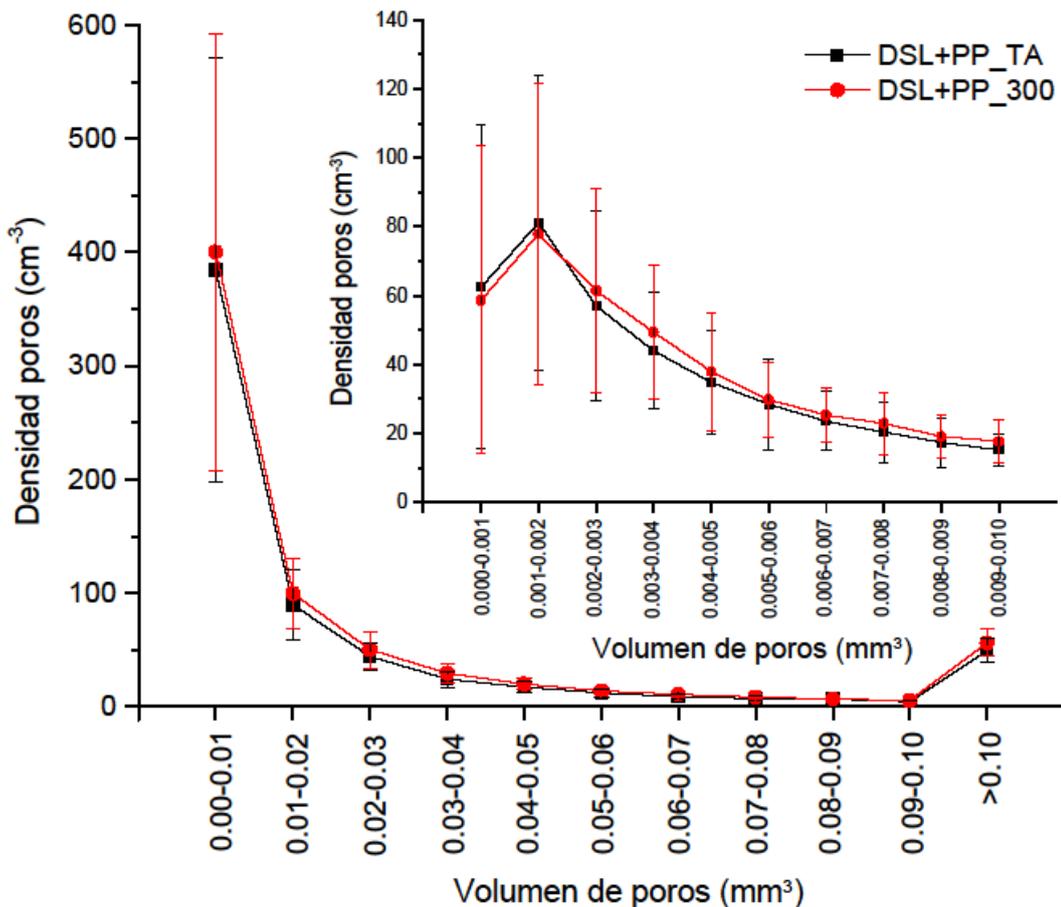


FIGURA 51. Distribución volumen poros de UHPFRC a temperatura ambiente y 300°C densidad de poros.

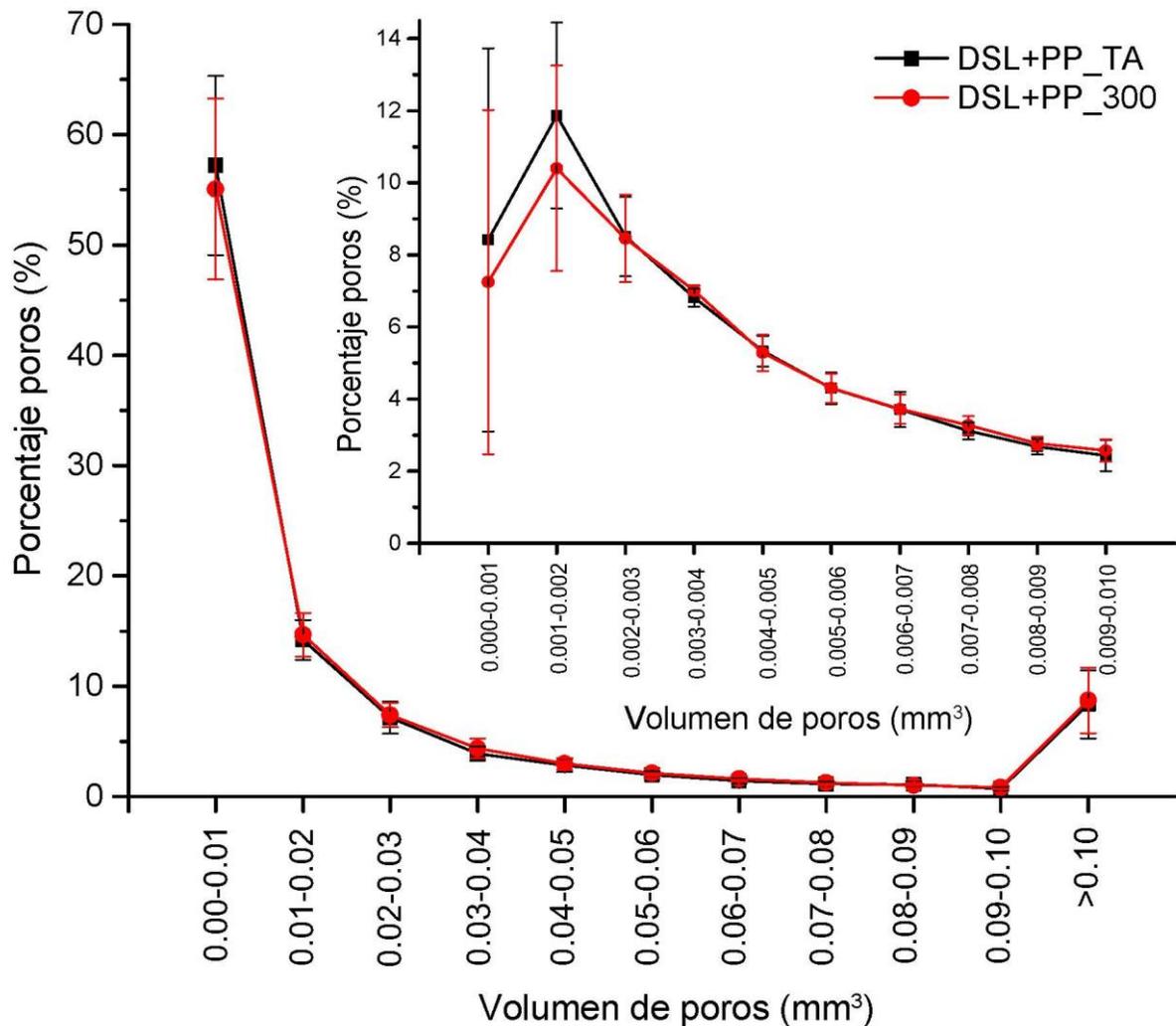


FIGURA 52. Distribución volumen poros de UHPFRC a temperatura ambiente y 300°C porcentaje de poros.

El someter al UHPFRC a 300°C provoca un daño térmico que genera mayor porosidad total (TABLA 13) en la matriz debido a las tensiones internas generadas por el gradiente térmico y la presión de vapor (Zhang *et al*, 2015). La adición de fibras de polipropileno, que se funden a 170 °C, permite la evacuación de la presión de vapor y reduce el daño térmico, de manera que la porosidad generada es menor. La adición de fibras de acero evita la propagación del daño por el efecto cosido (Abbas *et al*, 2014) en el caso de los poros que se encuentran en un rango inferior a 0.01 mm³. Si no existieran las fibras (de polipropileno y de acero), la propagación del daño sería mayor y más distribuida, y, por tanto, aumentaría la porosidad total en mayor medida.

Se puede observar que los poros en los rangos a partir de 0.01 mm³ no varían por la influencia de la temperatura, por tanto, no se ven afectados por las tensiones locales generadas por la temperatura. Sin embargo, en los poros de tamaño inferior a 0.01 mm³, al ser de menor tamaño, las tensiones son mayores y se produce un daño más generalizado por efecto de la temperatura.

5.3. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS FIBRAS

A continuación, en la TABLA 14, se muestran los resultados de la porosidad a temperatura ambiente y a 300°C tanto del hormigón de ultra-alta resistencia sin reforzar, UHPC, como de los reforzados, UHPFRC, con los diferentes tipos de fibras empleadas. Dichos datos han sido aportados por los tutores del documento para poder profundizar en los efectos que provoca la adición de distintos tipos de fibras

en la matriz de hormigón. Además, los resultados de la tomografía computarizada se emplearán en el apartado 6 para relacionarlas con las propiedades mecánicas obtenidas en la campaña experimental realizada.

TABLA 14. Porosidad de los distintos UHPFRC a temperatura ambiente y 300°C.

| Porosidad (%) | | |
|---------------|------------|------------|
| | TA | 300°C |
| DO | 3.9 ± 0.1 | 5.0 ± 0.3 |
| DS | 1.9 ± 0.3 | 3.87 ± 0.3 |
| DL | 3.4 ± 0.8 | 4.32 ± 0.9 |
| DSL | 2.2 ± 0.5 | 2.6 ± 0.1 |
| DSL+PP | 4.01 ± 0.1 | 4.38 ± 0.1 |

De la TABLA 14 se pueden extraer las siguientes conclusiones diferenciando las variaciones de porosidad a temperatura ambiente y a 300°C:

a) A temperatura ambiente

La presencia de fibras en la matriz de hormigón modifica la estructura de los poros y reduce la porosidad con respecto al mismo tipo de hormigón sin reforzar. Dicha disminución de la porosidad es mayor en el caso de los hormigones reforzados con fibras de acero cortas, DS, que se reduce hasta un 2% aproximadamente, en relación a la minoración mediante el refuerzo con fibras de acero larga, DL, en la que la porosidad varía 0.5 % aproximadamente.

Con la mezcla de ambos tipos de fibras de acero, DSL, se consigue un resultado intermedio, ya que se reduce la porosidad de un 1.7% aproximadamente, con respecto a el mismo tipo de hormigón sin reforzar.

Si además a los hormigones reforzados con fibra de acero larga y corta se le añade fibras de polipropileno, DSL+PP, se consigue aumentar la porosidad, aunque no de forma significativa.

b) Temperatura 300°C

El aumento de la porosidad debido a la influencia de la temperatura en los hormigones que contienen fibras de acero corta, DS, es un 2% más elevado aproximadamente, que, en el caso de fibras de acero largas, DL, que aumenta un 1%. Lo que se busca es que la porosidad una vez haya sido sometido a temperatura sea mayor, para que las tensiones locales generadas sean menores y, por tanto, no se produzca el fenómeno de *spalling* o que se minoren sus efectos. Al igual que a temperatura ambiente, con la combinación de ambos tipos de fibras de acero, DSL, se consigue un efecto intermedio.

La adición de fibras de polipropileno, DSL+PP, aumenta ligeramente la porosidad y tiene un efecto favorable, como se ha comentado con anterioridad, ya que dichas fibras funden a 170°C, creando canales que reducen las tensiones locales producidas por el gradiente térmico y por el vapor de agua generados por la acción de la temperatura.

6. RELACIÓN EFECTOS RESULTADOS ENSAYOS – RESULTADOS TAC

6.1. INTRODUCCIÓN

Una vez realizado el análisis de resultados tanto de las propiedades mecánicas obtenidas mediante la realización de los ensayos experimentales y los datos de porosidad adquiridos mediante el empleo de tomografía computarizada de rayos X, se procede a relacionar ambos resultados para poder determinar cuál es la influencia de la temperatura sobre dichos hormigones. Se destacará la influencia de los distintos tipos de fibras empleadas en el refuerzo de los hormigones de ultra-alta resistencia en sus propiedades mecánicas y cómo modifica la matriz de hormigón, comprobando su influencia a temperatura ambiente y a 300°C.

6.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Los hormigones de ultra-alta resistencia tienen una dosificación tal que le confiere elevada resistencia y baja porosidad, como se puede ver en la TABLA 15.

TABLA 15. Relación resistencia a compresión y porosidad.

| | TA | | 300°C | |
|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|
| | f _c (MPa) | Porosidad (%) | f _c (MPa) | Porosidad (%) |
| DO | 125 ± 9% | 3.9 ± 0.1 | - | 5.0 ± 0.3 |
| DS | 155 ± 5% | 1.9 ± 0.3 | 129 ± 15% | 3.87 ± 0.3 |
| DL | 141 ± 12% | 3.4 ± 0.8 | 125 ± 30% | 4.32 ± 0.9 |
| DSL | 147 ± 8% | 2.2 ± 0.5 | 112 ± 10% | 2.6 ± 0.1 |
| DSL+PP | 135 ± 10% | 4.01 ± 0.1 | 138 ± 10% | 4.38 ± 0.1 |

a) Temperatura ambiente

En términos generales se puede observar que una disminución de la porosidad causada por la adición de fibras de acero durante el amasado se manifiesta en un aumento de la resistencia a compresión ya que la matriz de hormigón es más densa.

La adición de fibras de acero cortas, DS, es la que más disminuye la porosidad y, por tanto, con la que se obtiene una resistencia a compresión superior respecto al resto de refuerzos. Ello se debe a que la cantidad de fibras que se cruzan por unidad de área es superior que, si se tratase de fibras de acero largas, DL, con la que se disminuye menos la porosidad y por ello la resistencia a compresión no es tan elevada como en el caso de DS. Con el refuerzo mediante fibras de acero corta y fibras de acero larga, DSL, se obtiene un valor intermedio entre DS y DL. El empleo de fibras de polipropileno, DSL+PP, no mejora la resistencia a compresión, obteniéndose una resistencia a compresión menor con respecto a los otros tipos de hormigones.

b) Temperatura 300°C

Aunque a temperatura ambiente la adición de fibras de acero corta confiere a este tipo de hormigones una mayor resistencia a compresión, por contrapartida es precisamente con DS con la que se obtienen peores resultados por la influencia de la temperatura. El daño térmico es mayor, ya que la porosidad a temperatura ambiente es muy baja y por tanto las tensiones locales que se generan en los poros son

muy elevadas, lo que se manifiesta en una disminución de la resistencia a compresión del orden de un 17%.

Este mismo planteamiento, de que a menor porosidad a temperatura ambiente mayor daño térmico y por ello menor resistencia a compresión, se puede aplicar a DL con el que se disminuye en torno a 15 MPa. No obstante, se debe recalcar que los datos de resistencia a compresión en DL obtenidos en laboratorio a 300°C fueron muy dispares, con una variación de un 30%, ya que la temperatura afectó de manera diferente a las probetas a ensayar y, por tanto, se comprobó que DL es la que peor se comporta ante la temperatura.

La adición de fibras de polipropileno no confería al hormigón ventaja con respecto al empleo de otro tipo de fibras, no obstante, la mejora se manifiesta por la influencia de la temperatura. Se produce un ligero aumento de la porosidad y de la resistencia a compresión. Ello se debe a que el PP funde a 170°C, y crea canales conectando los poros y evitando que las tensiones que se generan por el gradiente térmico sean elevadas.

Por tanto, se puede llegar a concluir que:

- A menor porosidad a temperatura ambiente mayor resistencia a compresión, pero mayor daño térmico que produce una disminución de la resistencia.
- La adición de fibras de polipropileno ayuda a evitar el daño térmico y por ello, que la resistencia a compresión no se vea afectada por la influencia de la temperatura.

6.3. MÓDULO DE DEFORMACIÓN LONGITUDINAL

Algunos autores (ACI Committee 544 (2001)) han comprobado que el módulo de deformación no depende de la porosidad.

6.4. RESISTENCIA A TRACCIÓN (BARCELONA)

TABLA 16. Relación de la resistencia a tracción (Ensayo Barcelona) y la porosidad.

| | TA | | 300°C | |
|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| | f_{ct} (MPa) | Porosidad (%) | f_{ct} (MPa) | Porosidad (%) |
| DSL+PP | 15 ± 15% | 4.01 ± 0.1 | 14 ± 11% | 4.38 ± 0.1 |

Como se puede observar en la TABLA 16, la variación de la resistencia a tracción debido a la influencia de la temperatura es mínima, de un 7%, ya que la adición de fibras de polipropileno disminuye el daño térmico al aumentar la porosidad. El empleo de fibras de acero largas y cortas cose las grietas que se producen una vez que se ha alcanzado el pico de carga, aumentando la ductilidad de dicho material.

6.5. COMPORTAMIENTO EN FRACTURA (ENSAYO DE FLEXIÓN EN 4 PUNTOS)

TABLA 17. Relación de los parámetros del comportamiento en fractura y la porosidad.

| | TA | | | 300°C | | |
|------------|----------------------|----------------------|---------------|----------------------|----------------------|---------------|
| | G _F (N/m) | l _{ch} (mm) | Porosidad (%) | G _F (N/m) | l _{ch} (mm) | Porosidad (%) |
| D0 | 64 | 128 | 3.9 ± 0.1 | - | - | 5.0 ± 0.3 |
| DS | 17727 ± 33% | 10079 ± 39% | 1.9 ± 0.3 | 10167 ± 24 % | 15440 ± 29% | 3.87 ± 0.3 |
| DL | 19155 ± 25% | 13960 ± 77% | 3.4 ± 0.8 | 12711 ± 31% | 24858 ± 19% | 4.32 ± 0.9 |
| DSL | 13960 ± 42% | 16720 ± 54% | 2.2 ± 0.5 | 10533 ± 7% | 18085 ± 10% | 2.6 ± 0.1 |

a) Temperatura ambiente

La adición de fibras de acero largas, DL, es la que produce un mayor incremento de la energía de fractura y la longitud característica (TABLA 17), ya que dichas fibras cosen fisuras de mayor tamaño antes de la rotura. Si se relaciona con los resultados del TAC, se puede ver que el empleo de DL disminuye ligeramente la porosidad con respecto a D0.

Por tanto, se puede llegar a la conclusión, que a mayor porosidad del UHPFRC mayor energía de fractura y mayor longitud característica.

b) Temperatura 300°C

El efecto de la temperatura ocasiona dos fenómenos. Por un lado, la energía de fractura disminuye. Por otro lado, la longitud característica aumenta ya que, al aumentar la porosidad en todos los casos, hace que la matriz de hormigón sea menos compacta y con ello que el material se ablande, por tanto, aumenta la ductilidad del material. Dicho incremento es mayor en DL, al tener este una mayor porosidad a 300°C.

Con fibras de acero cortas se produce una disminución mayor de la energía de fractura, pero un menor aumento de la longitud característica, ya que dichas fibras, al ser más cortas, presentan menos capacidad de deformación antes de la rotura, y por ello, la ductilidad que confiere no es tan elevada como la conseguida con DL. Con DSL se consigue un efecto intermedio entre ambos y además el valor de su porosidad también entre los valores de porosidad de DS y DL.

Por tanto, se puede llegar a la conclusión de que, con respecto a temperatura ambiente, a mayor porosidad a 300°C se produce un mayor aumento de la longitud característica pero menor disminución de la energía de fractura.

7. CONCLUSIONES

Del estudio de las propiedades mecánicas y de fractura, y de la porosidad a temperatura ambiente y a 300°C de los hormigones de ultra-altas prestaciones, en relación con la influencia de las fibras de acero y polipropileno se han extraído una serie de conclusiones que aparte de servir para finalizar dicho documento, pueden ser de utilidad para futuras investigaciones que vayan en la misma línea de estudio.

- La adición de fibras de acero aumenta la resistencia a compresión, incrementándose en mayor medida mediante el empleo de fibras de acero cortas debido a la mayor cantidad de fibras y más homogénea distribución en la matriz.
- El empleo de los distintos tipos de fibras no tiene repercusión significativa en el módulo de deformación longitudinal.
- La presencia de fibras de acero largas aumenta las deformaciones antes del momento de la rotura, produciendo un incremento de la ductilidad del material. El empleo de fibras de acero cortas proporciona valores mayores de la resistencia a tracción. Por tanto, el empleo de ambos tipos de fibras resulta beneficioso para la mejora de ambos parámetros.
- La presencia de fibras de acero en la matriz de hormigón de ultra-alta resistencia modifica la estructura de los poros reduciendo la porosidad con respecto al mismo tipo de hormigón sin reforzar, el cual ya tiene muy baja porosidad debido su a dosificación.
- A menor porosidad se produce mayor daño térmico, ya que el gradiente térmico produce unas tensiones locales que afectan en mayor medida a poros de tamaño inferior a 0.01 mm³, por tanto, si la porosidad es mayor, implica un rango de tamaño de poros mayor, y por tanto menor daño térmico.
- A menor porosidad a temperatura ambiente se adquiere una mayor resistencia a compresión. No obstante, los UHPFRC con menor porosidad son los más afectados por el daño térmico produciéndose una disminución de la resistencia.
- La adición de fibras de polipropileno ayuda a evitar el daño térmico ya que aumenta la porosidad y, por ello, que la resistencia a compresión no se vea afectada por la influencia de la temperatura, reduciendo el efecto del *spalling*.
- A mayor porosidad del UHPFRC a temperatura ambiente, se alcanza mayor energía de fractura y mayor longitud característica.
- A mayor porosidad a 300°C se produce un mayor aumento de la longitud característica pero menor disminución de la energía de fractura. Por tanto, la exposición del hormigón a temperaturas elevadas mejora las propiedades del comportamiento en fractura del hormigón ya que el material se ablanda y se vuelve más dúctil.

8. DESARROLLOS FUTUROS

Llegados a este punto, y obtenidas las conclusiones del trabajo, se observaron una serie de detalles que se deberían tener cuenta si se quisiera profundizar en el estudio ya realizado en este documento. A continuación, se exponen aquellos planteamientos e ideas que han surgido a lo largo y al final de la redacción del TFG:

- Los valores obtenidos de los ensayos a 300°C presentan una gran aleatoriedad debido a que el daño térmico no afecta de la misma manera. Por tanto, sería útil el aumentar el número de probetas a ensayar a temperaturas elevadas.
- Debido a la alta variación de resultados obtenidos en el ensayo de flexión en 4 puntos, tanto a temperatura ambiente como a 300°C, sería interesante la repetición de dicho ensayo con un mayor número de probetas con el fin de llegar a unos resultados menos dispares y más fiables.
- En el caso de que fuera posible la fabricación de un hormigón con un rango de poros a partir de 0.01 mm³, sería interesante comprobar si no se produce una disminución de las propiedades a 300°C, como ocurre en el caso de la adición de fibras de polipropileno.
- Con el fin de reducir los costes, estudiar cuál es la cantidad óptima de fibras de acero y polipropileno en el hormigón tanto a temperatura como cuando esté sometido a elevadas temperaturas.
- Obtener las propiedades mecánicas a 100°C y 200°C con sus respectivos TAC, con el fin de obtener una investigación más completa.
- Una vez que tenemos caracterizado el comportamiento mecánico y en fractura del material se podría hacer simulaciones mediante elemento finitos de elementos estructurales con estos tipos de hormigones a temperatura ambiente y 300°C, por ejemplo, sistemas de almacenamientos de energía.

9. BIBLIOGRAFÍA

ACI Committee 544. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. ACI 1R.544-96, American Concrete Institute (2001)

Abbas S, Soliman A.M, Nehdi M. L. (2014). *Chloride ion penetration in reinforced concrete and steel fiber-reinforced concrete precast tunnel lining segments*. Aci Materials Journal 111 (1-6) 1–10.

Akca A.H, Özyurt Zihnioglu N, (2018) *Effects of re-curing on residual mechanical properties of concrete after high temperature exposure*, Construction and Building Materials 159: 540–552.

Cai Y, Hou P, Cheng X, Du P, Ye Z, (2017) *The effects of nanosio₂ on the properties of fresh and hardened cement-based materials through its dispersion with silica fume*, Construction and Building Materials 148: 770–780.

Cao M, Zhang C, Lv H, (2014) *Mechanical response and shrinkage performance of cementitious composites with a new fiber hybridization*, Construction and Building Materials 57:45–52.

Cifuentes H, García F, Maeso O, Medina F. (2013). *Influence of the properties of polypropylene fibres on the fracture behaviour of low-, normal- and high-strength FRC*. Construction and Building Materials 45: 130–137.

Cifuentes H, Medina F. (2013). *Mecánica de la fractura aplicada al hormigón: conceptos, análisis experimental y modelos numéricos*. Sevilla: Universidad de Sevilla, Secretariado de Publicaciones.

D.-Y. Yoo, N. Banthia. (2016). *Mechanical properties of ultra-high-performance fiber reinforced concrete: A review*, Cement and Concrete Composites 73 267– 280.

EHE-08. Instrucción de hormigón estructural (2008)

Graybeal B. (2007). *Compressive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete*. ACI Materials Journal 104 (2) 146–152.

Hillerborg A, Modéer M, Petersson P (1976). *Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements*. Cement and Concrete Research 6 (6) 773–781.

I. G. Garcia. (2011) Carbonatación del hormigón: combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH, PhD. Thesis. School of Engineering. Universidad Politecnica de Madrid.

López J.A, Serna P, Navarro-Gregori J, Camacho E. (2015). *An inverse analysis method based on deflection to curvature transformation to determine the tensile properties of UHPFRC*. Materials and Structures 48: 3703–3718.

López J.A, Serna P, Navarro-Gregori J, Coll H. (2016). *A simplified five-point inverse analysis method to determine the tensile properties of UHPFRC from unnotched four-point bending tests*. Composites Part B: Engineering 91: 189–204.

Mizukami J, Matsunagai Y. (2010). *Construction of D-Runway at Tokyo International Airport*. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

N. Yousefieh, A. Joshaghani, E. Hajibandeh, M. Shekarchi (2017). *Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete*, *Construction and Building Materials*. 148: 833–845.

Pujadas P, Blanco A, Cavalaro S, de la Fuente A, Aguado A. (2013). *New analytical model to generalize the Barcelona test using axial displacement*. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(2): 259 – 71.

Pujadas P, Blanco A, Cavalaro S.H.P, de la Fuente A, Aguado A. (2014). *Multidirectional double punch test to assess the post-cracking behaviour and fibre orientation of FRC*. *Construction and Building Materials*, 58: 214 – 224.

Poveda E, Ruiz G, Cifuentes H, Yu R.C, Zhang X.X, (2017) *Influence of the fiber content on the compressive low-cycle fatigue behavior of self-compacting sfrc*, *International Journal of Fatigue* 101: 9–17.

Song Q, Yu R, Wang X, Rao S, Shui Z(2018), *A novel self-compacting ultra-high performance fibre reinforced concrete (scuhpfrfc) derived from compounded highactive powders*, *Construction and Building Materials* 158: 883–893.

Tamme R, Laing D, Steinmann W-D. (2003). *Advances Thermal Energy Storage Technology for Parabolic Trough*. *Proceedings of International Solar Energy Conference 2003*.

Varona F.B, Baeza F.J, Bru D, Ivorra S. (2018). *Influence of high temperature on the mechanical properties of hybrid fibre reinforced normal and high strength concrete*. *Construction and Building Materials* 159: 73–82.

Wille K, Naaman A, Parra-Montesinos G, (2012) *Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way*, *ACI Materials Journal* 108 (1) 1–11.

Zhang W, Min H, Gu X, X Yi, Xing Y (2015). *Mesoscale model for thermal conductivity of concrete*. *Construction and Building Material* 98 (2015) 8–16.

Ye Li, Kang Hai Tan, En-Hua Yang. (2018). *Influence of aggregate size and inclusion of polypropylene and Steel fibers on the hot permeability of ultra-high performance concrete (UHPC) at elevated temperatura*. *Construction and Building Materials*, 169: 629 – 637.

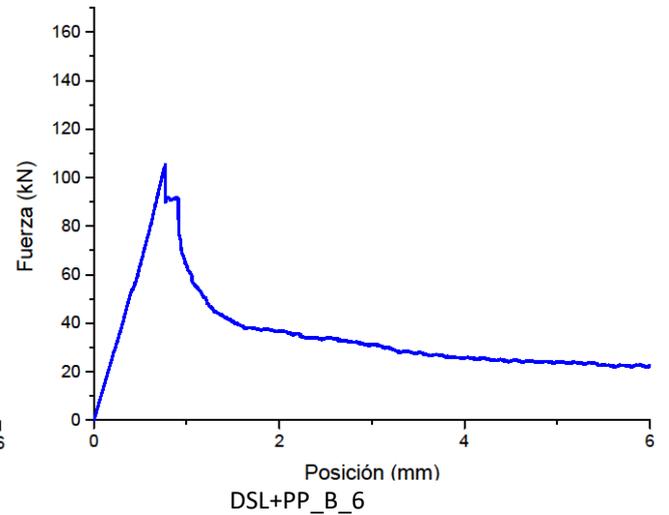
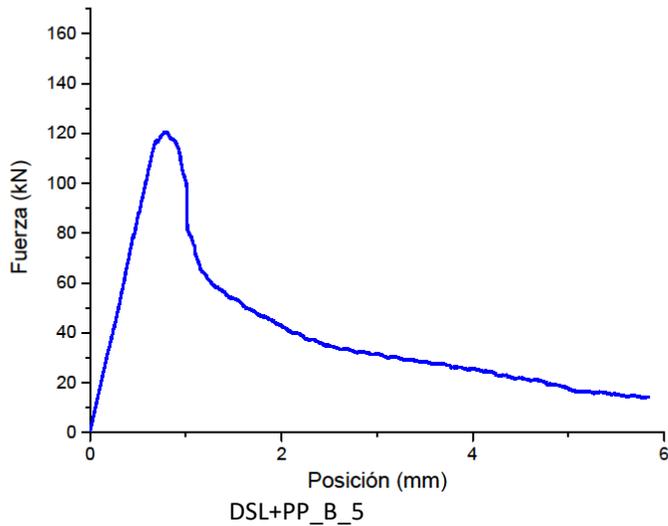
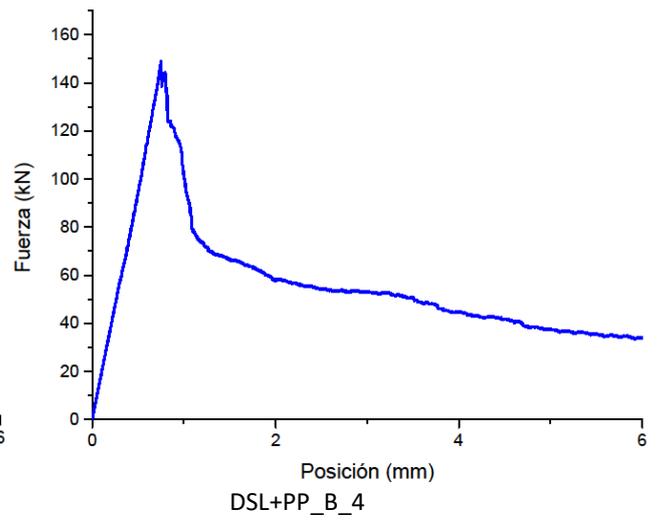
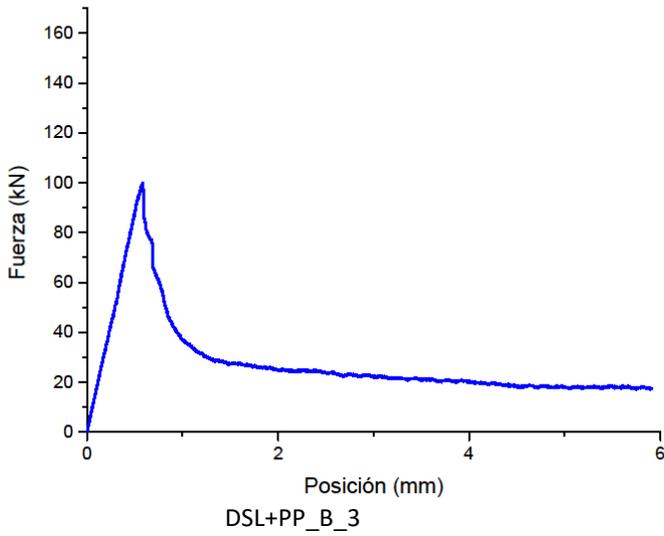
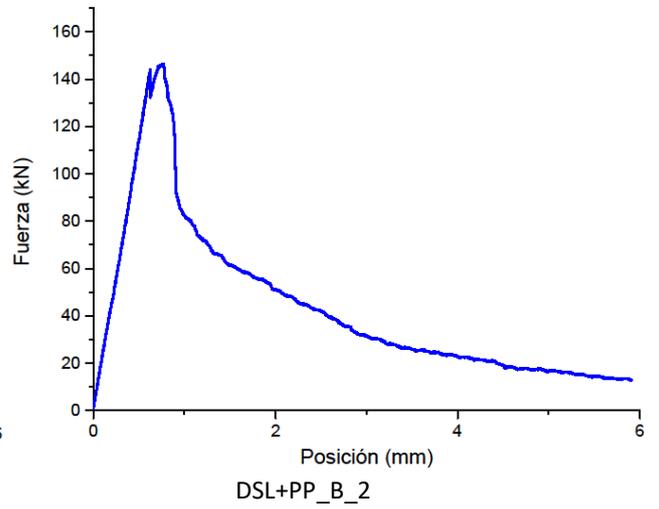
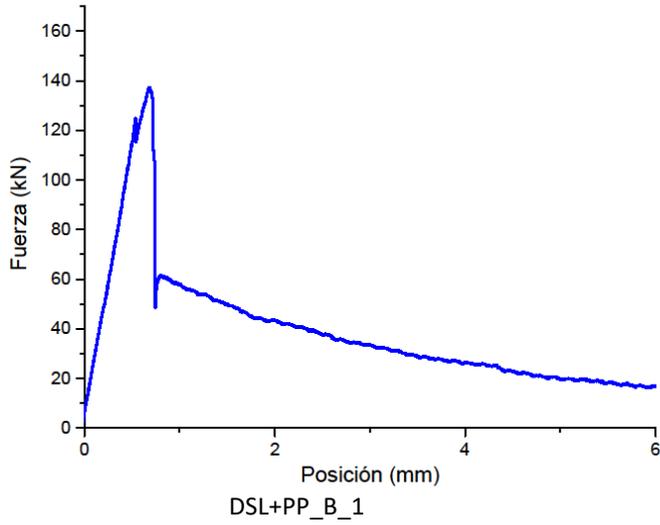
UNE-EN 14889-1:2008. Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad.

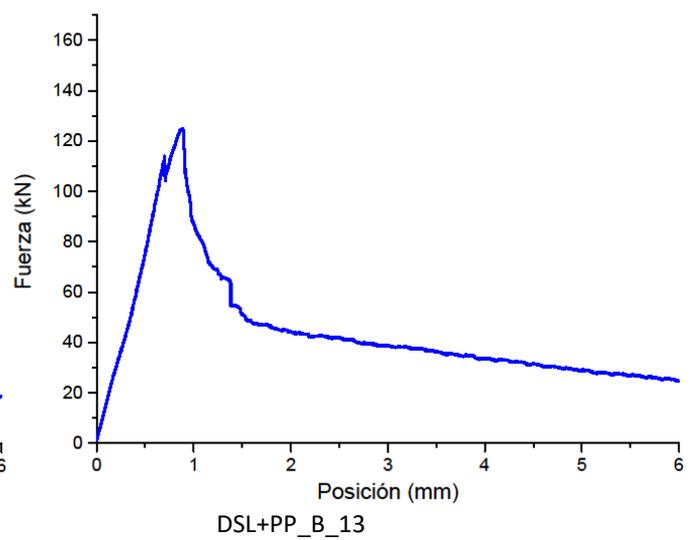
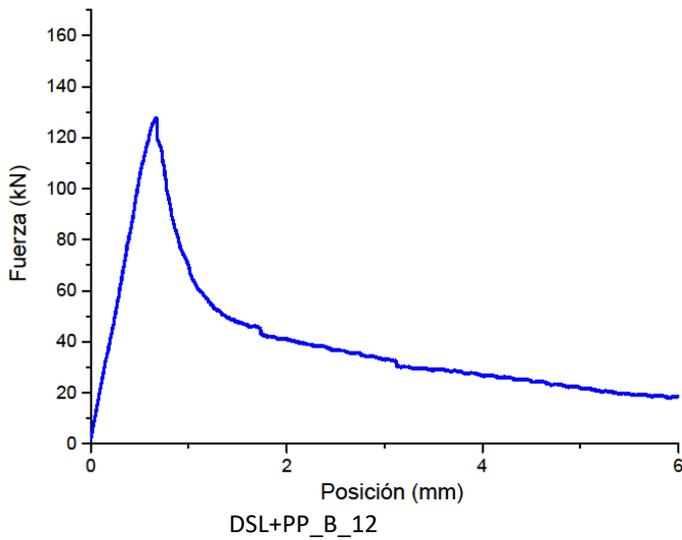
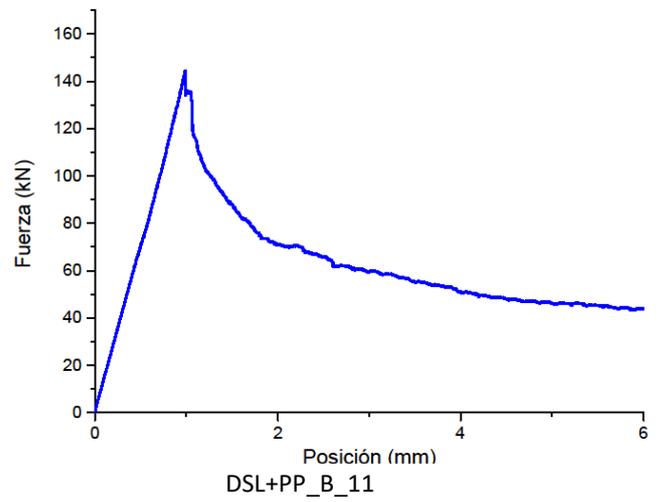
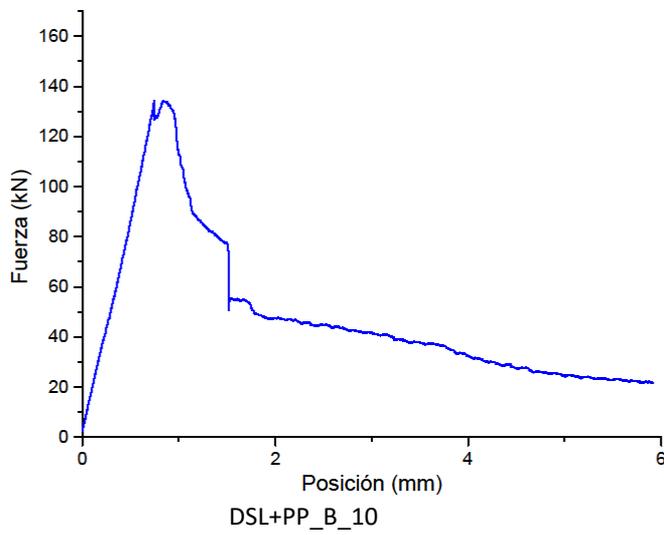
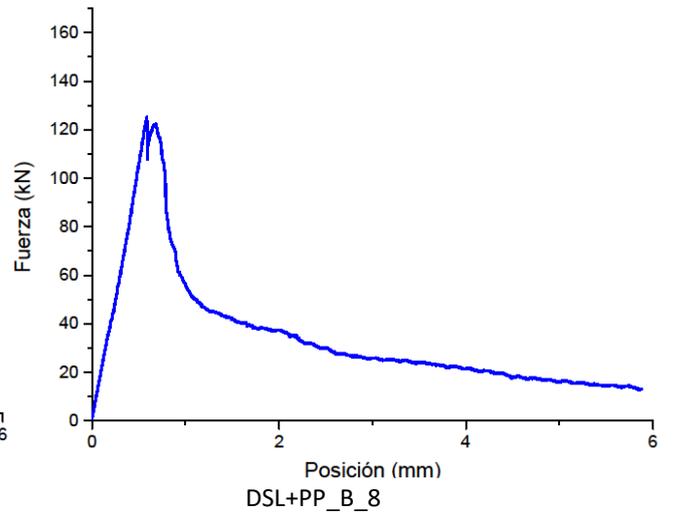
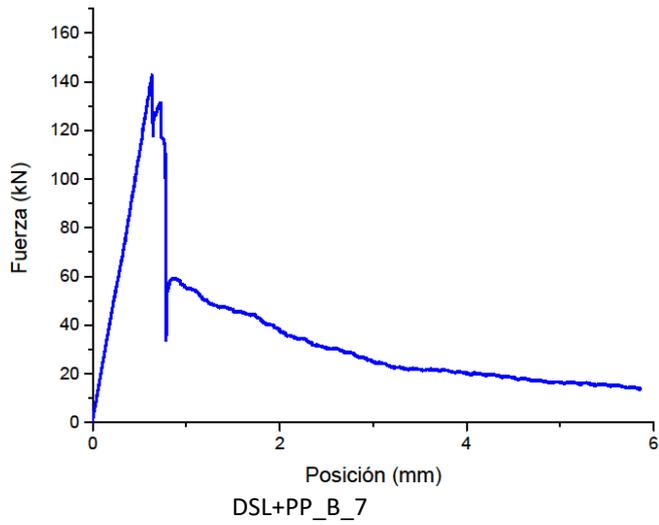
UNE-EN 14889-2:2008. Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad.

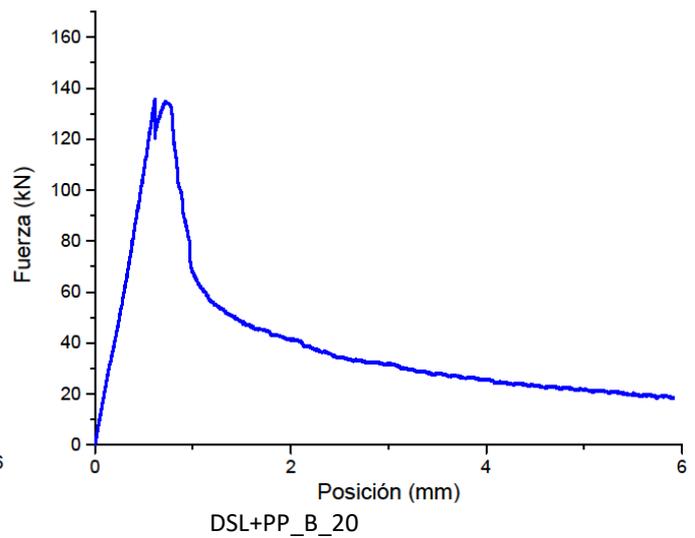
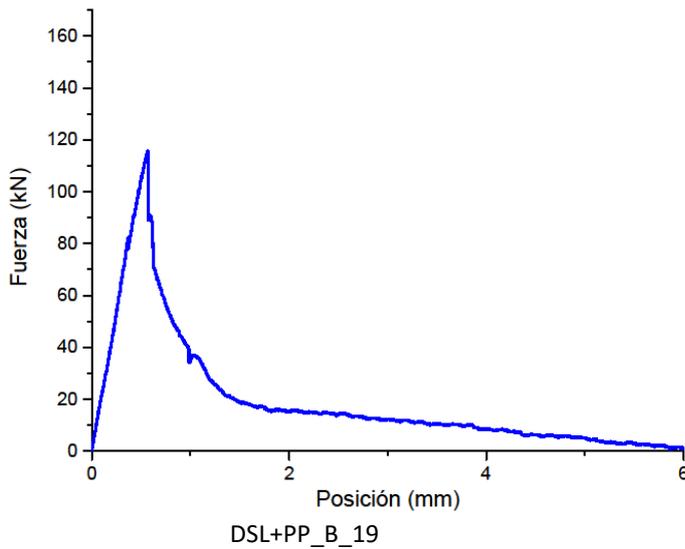
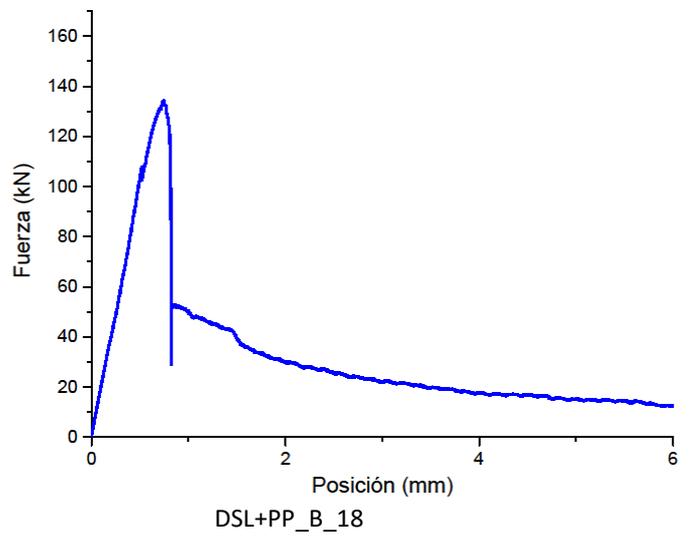
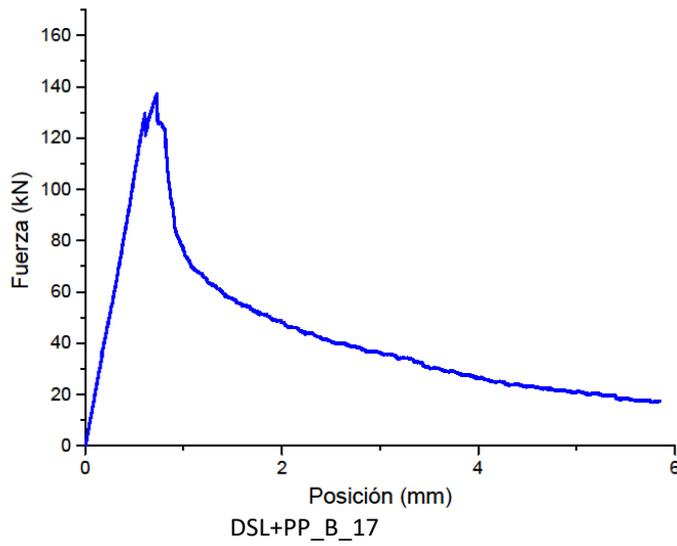
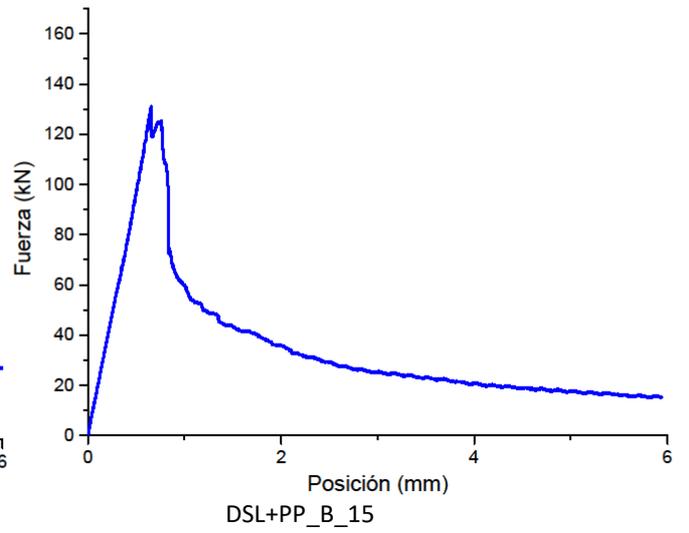
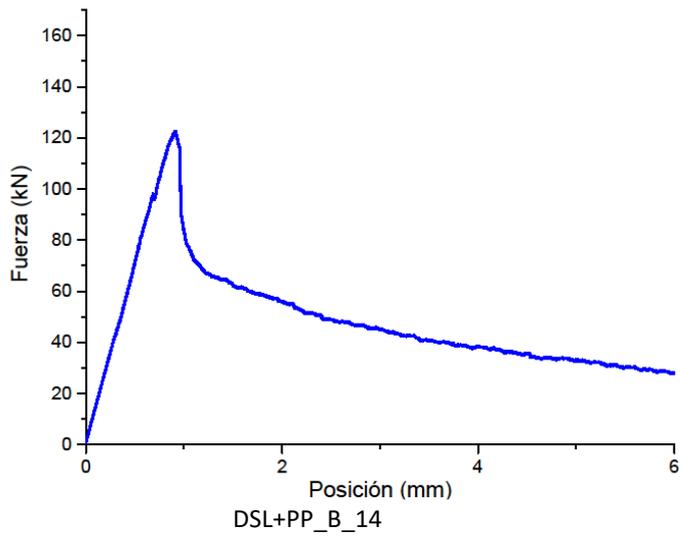
UNE-EN 83515. Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona.

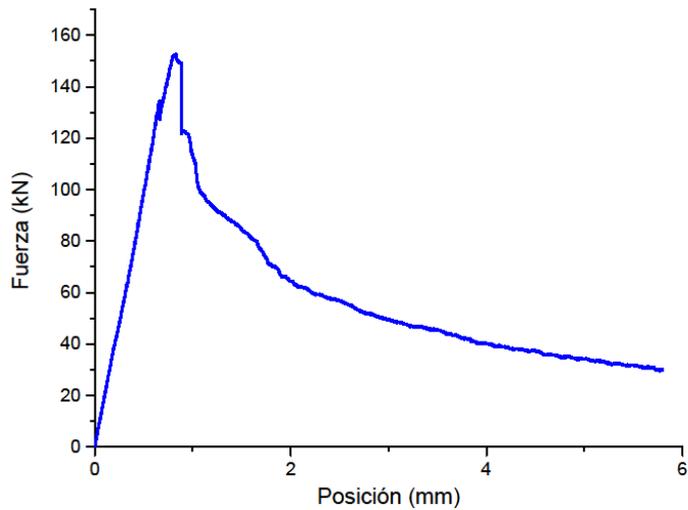
1. CURVAS ENSAYO BARCELONA MODIFICADO

1.1. Curvas P-S a temperatura ambiente

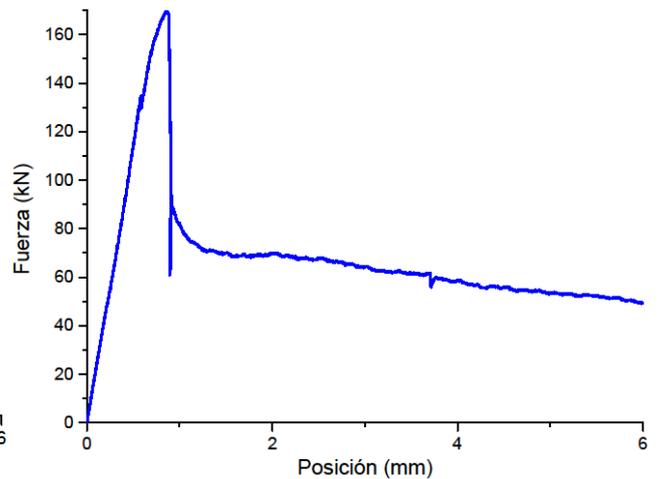




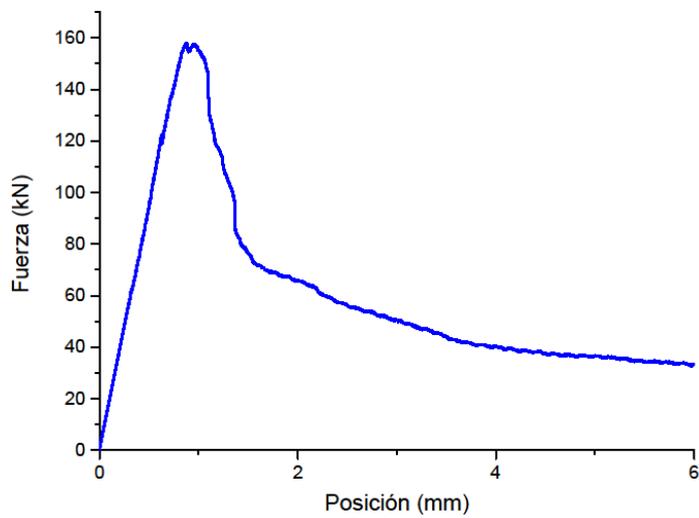




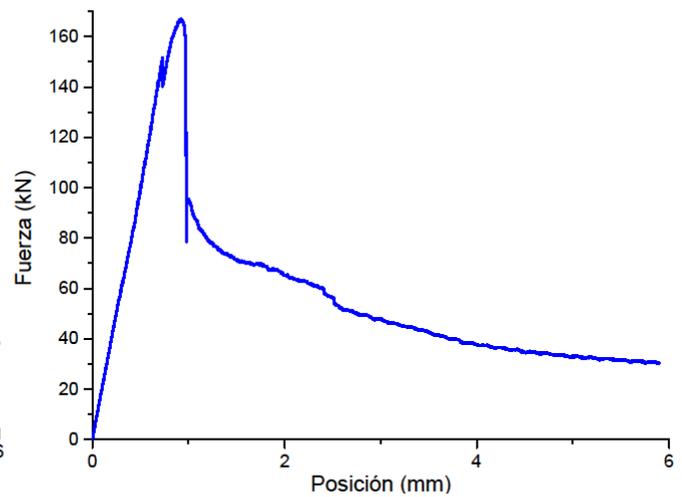
DSL+PP_B_21



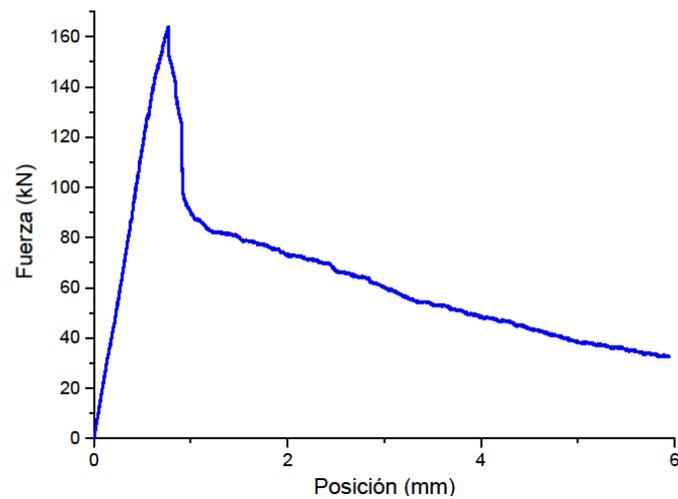
DSL+PP_B_22



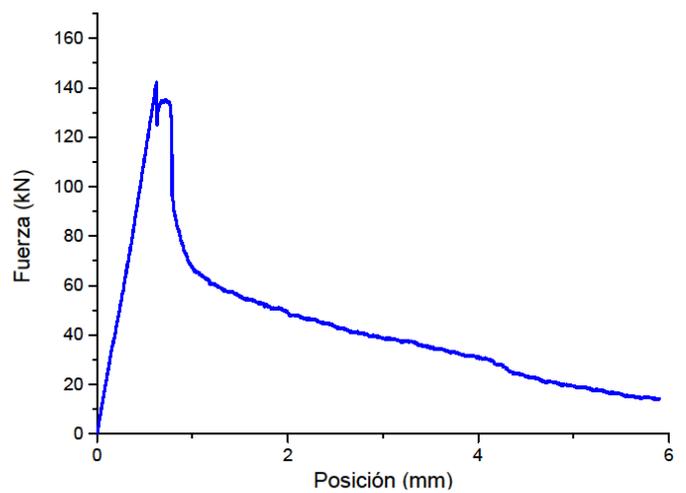
DSL+PP_B_23



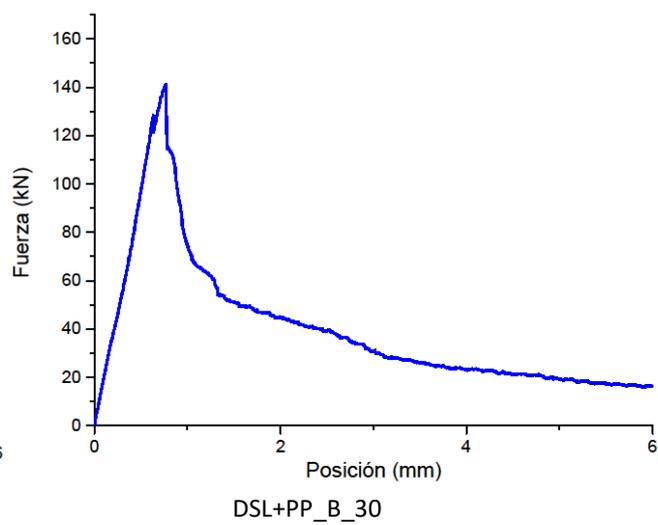
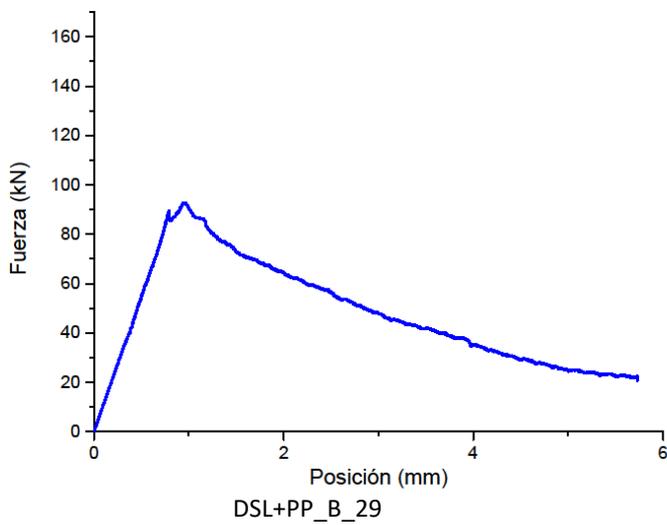
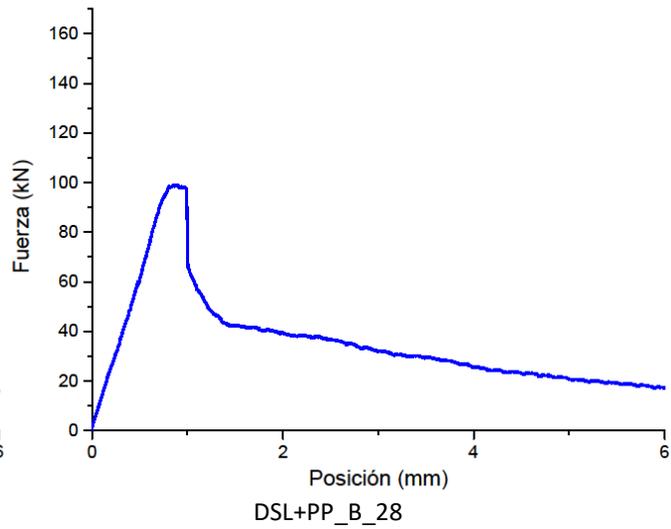
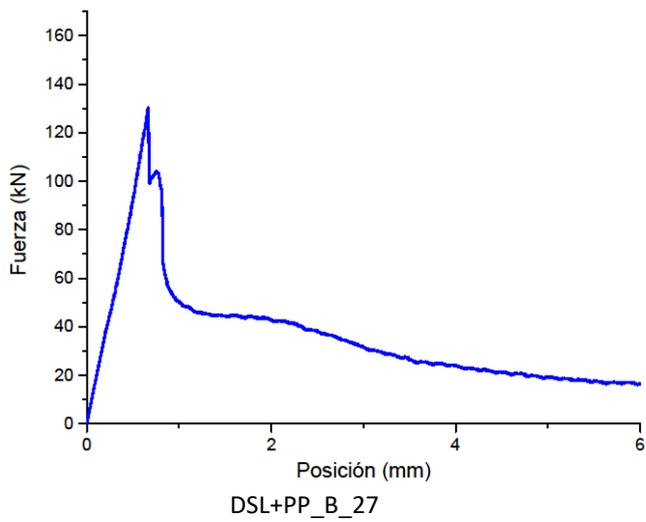
DSL+PP_B_24



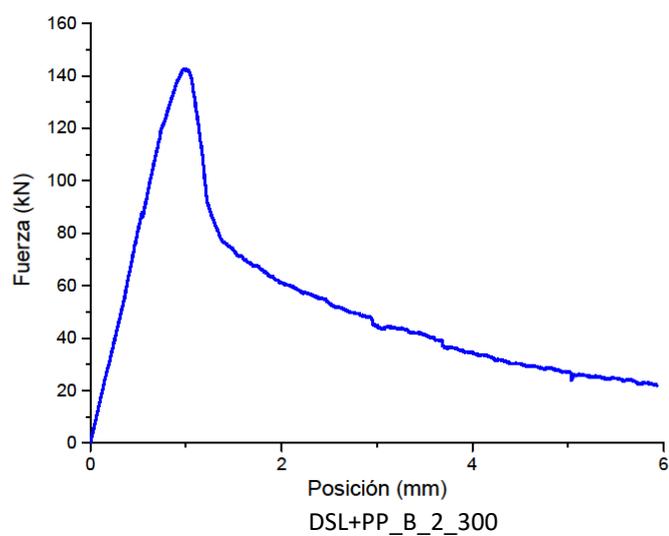
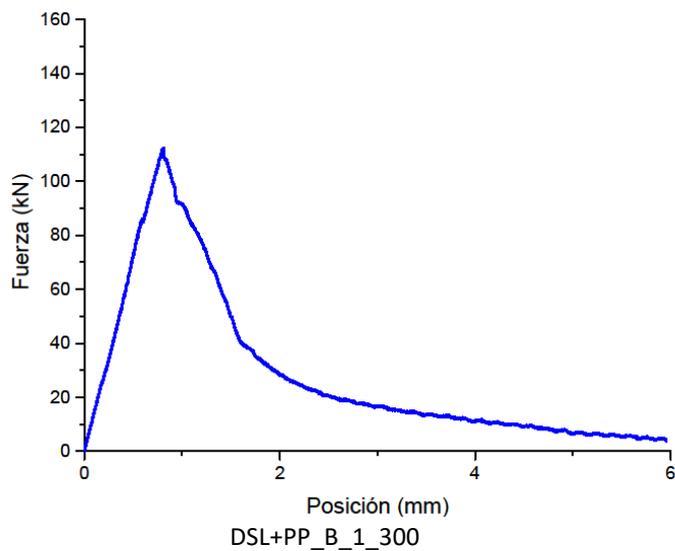
DSL+PP_B_25

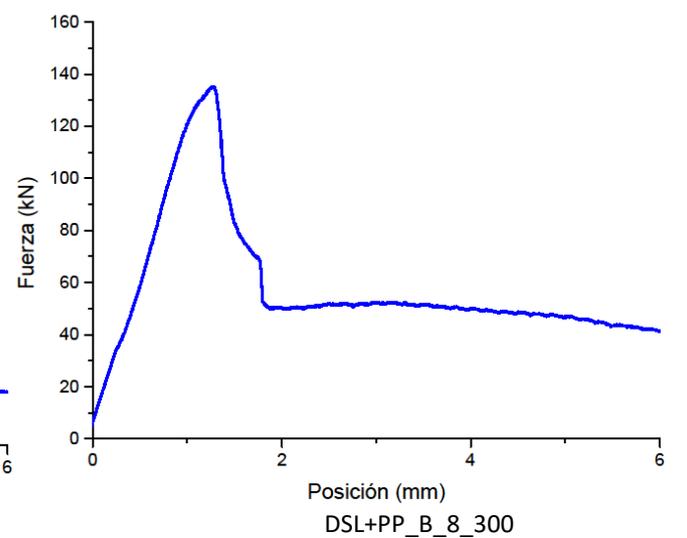
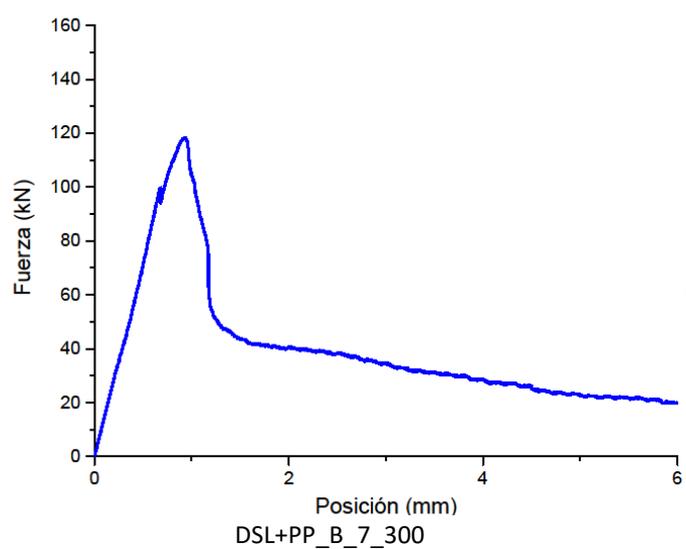
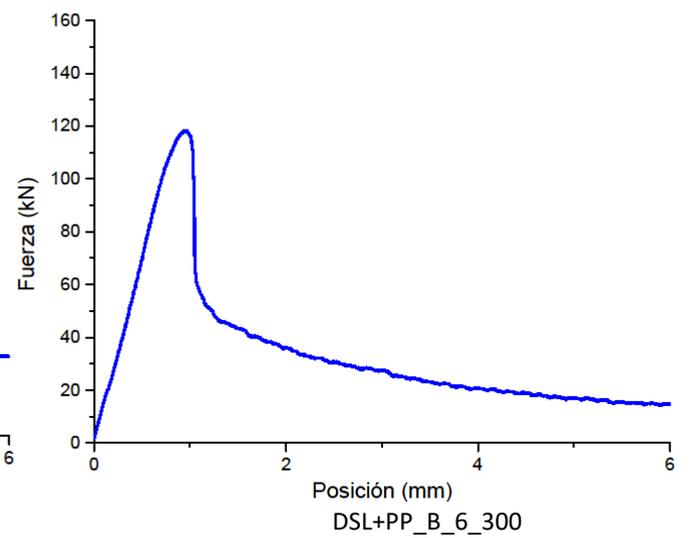
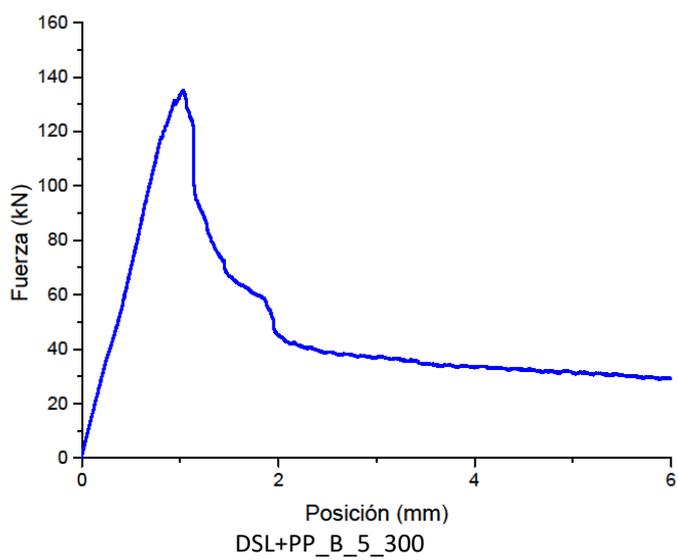
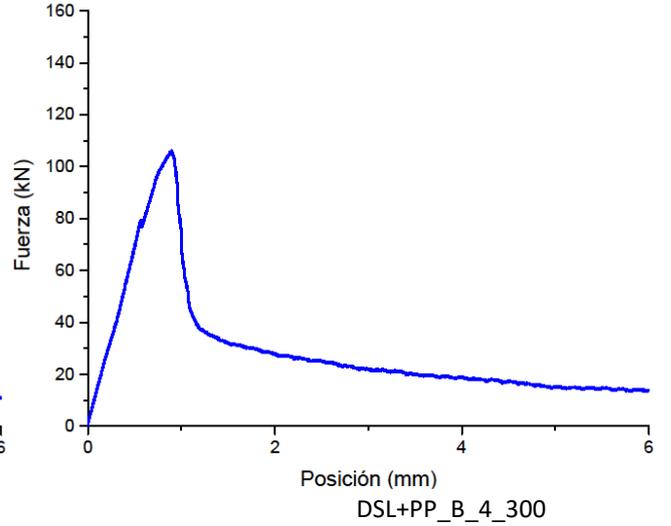
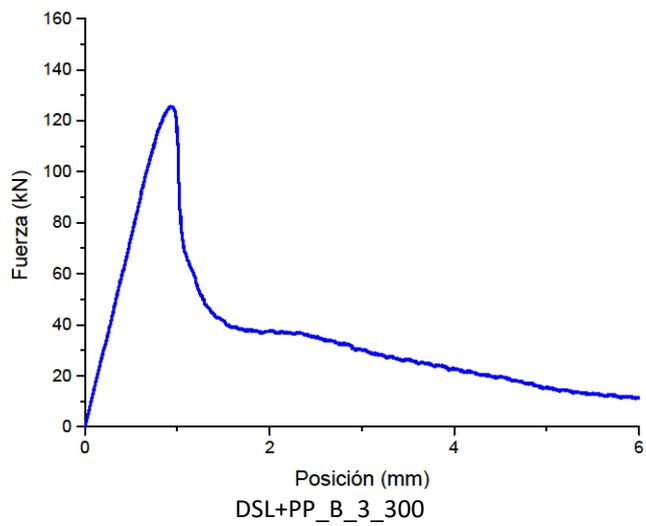


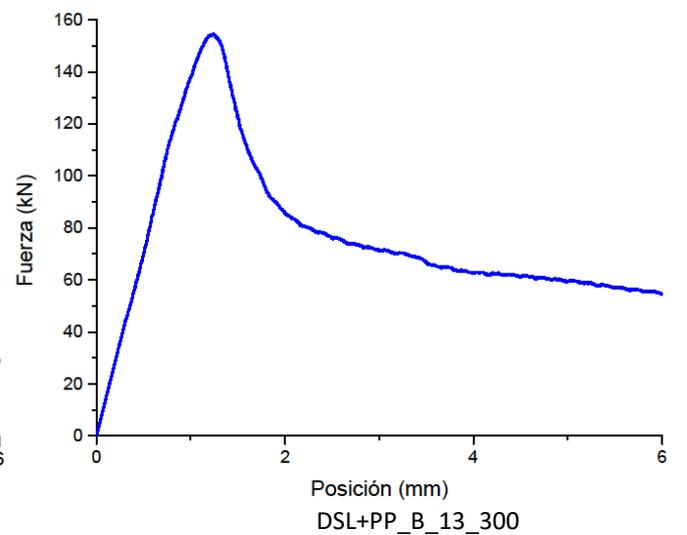
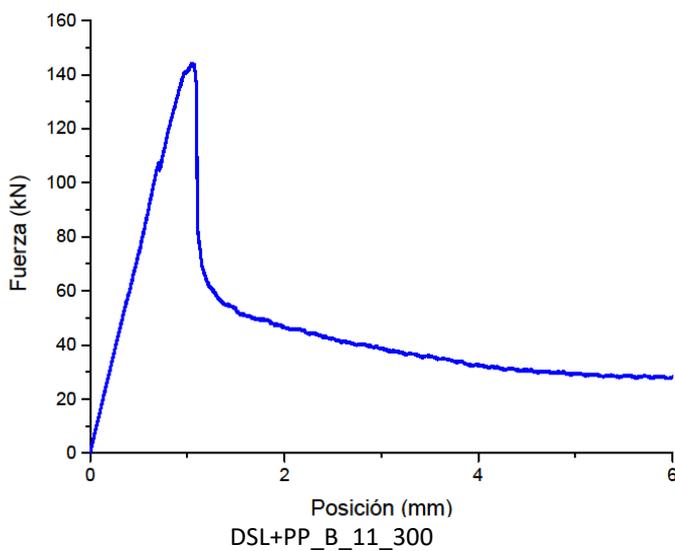
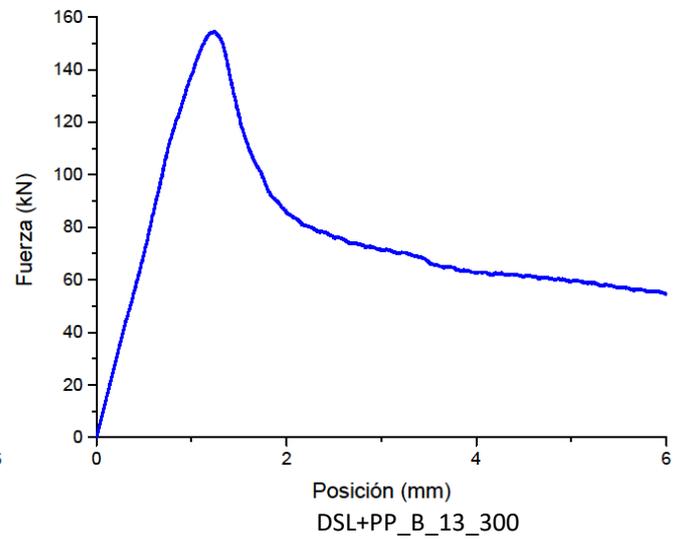
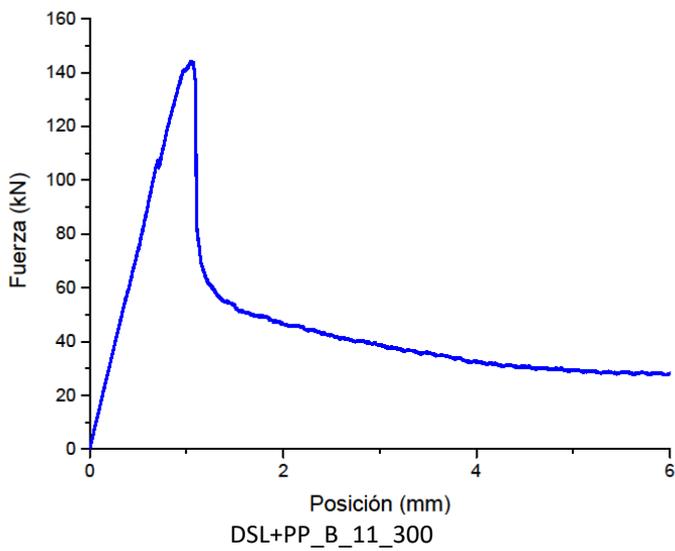
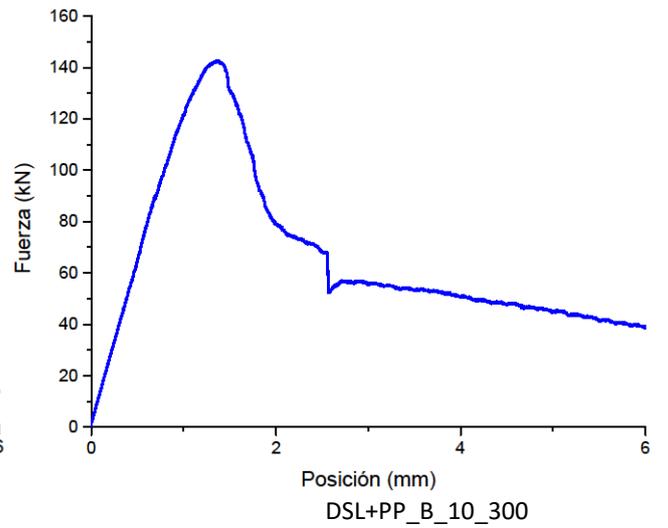
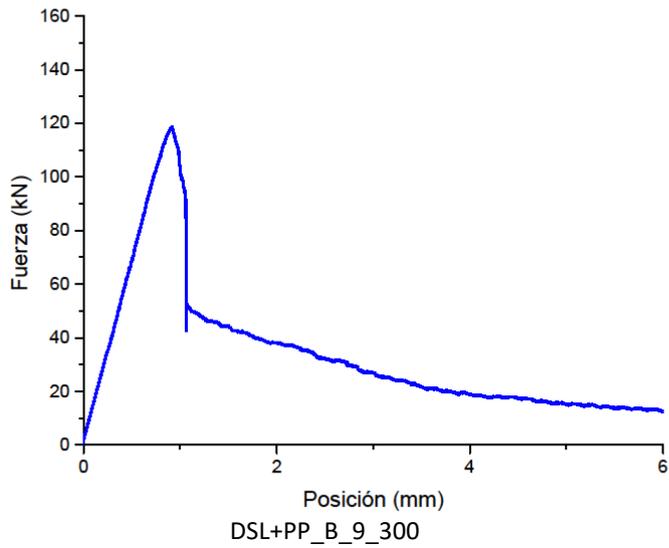
DSL+PP_B_26

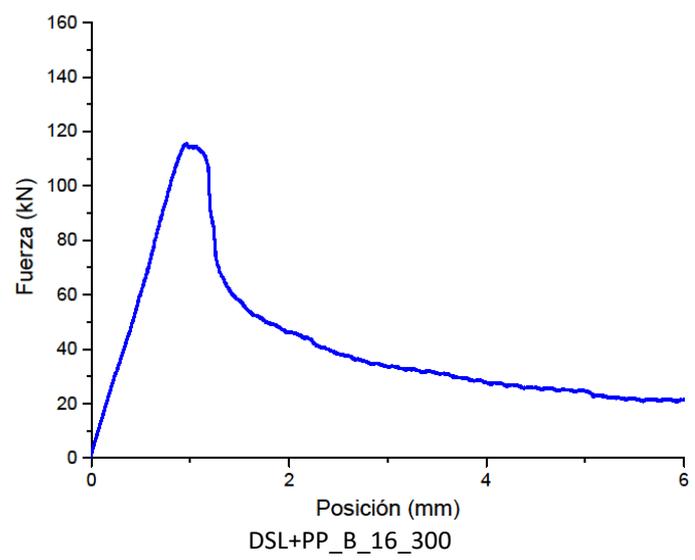
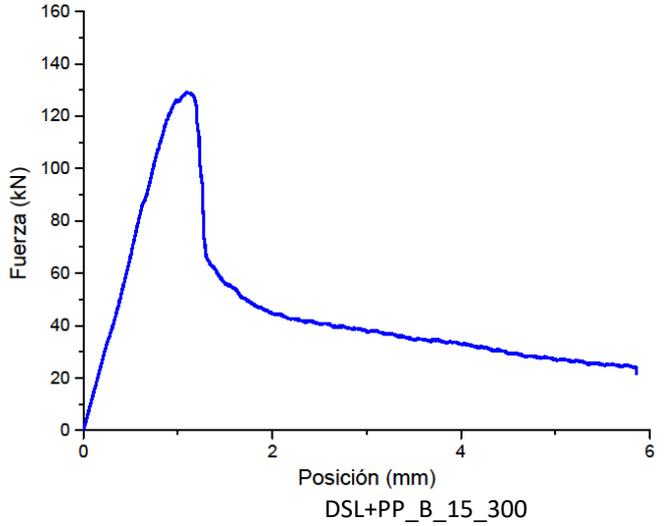
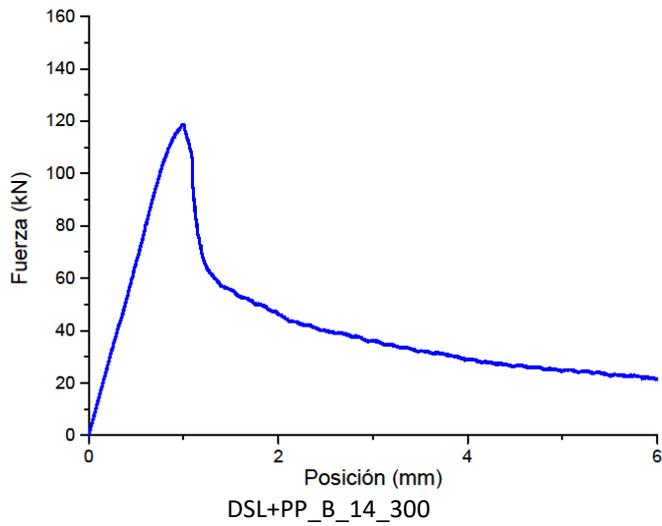


1.2. Curvas P-S a 300°C



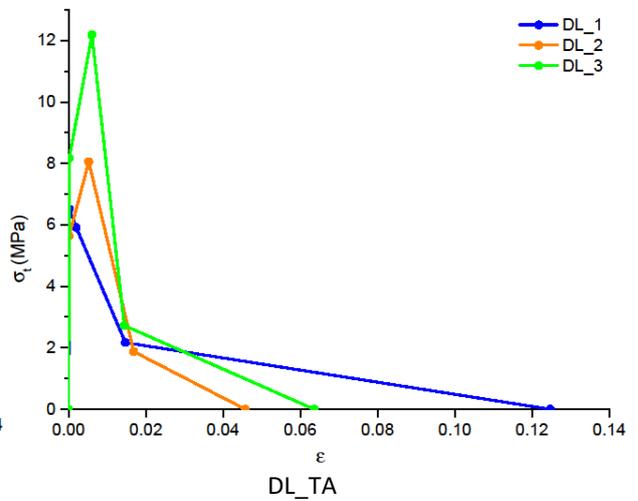
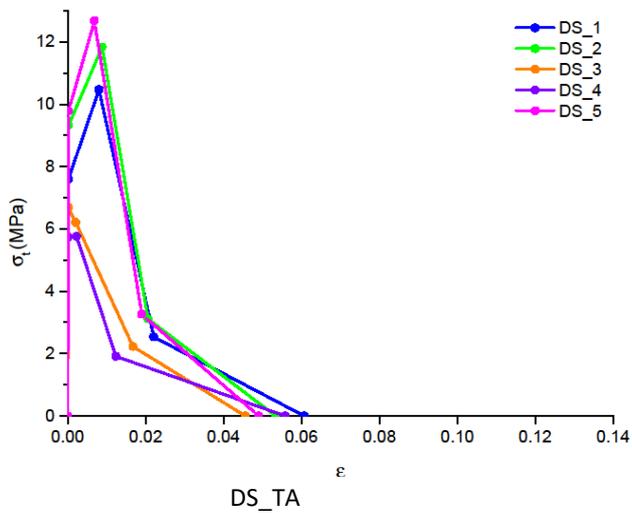


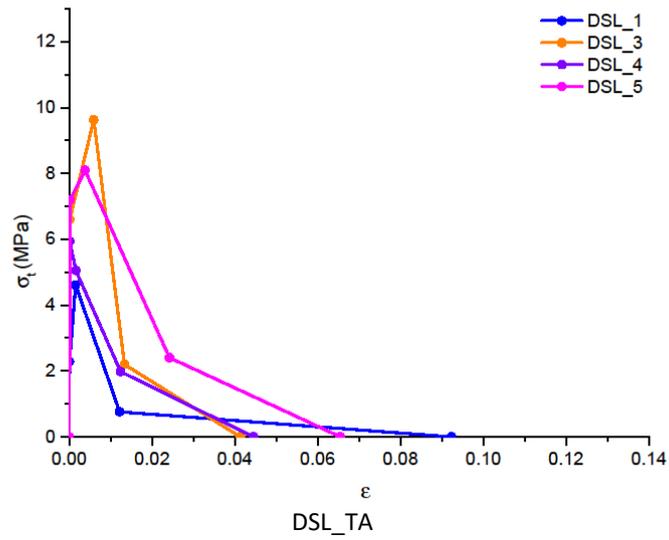




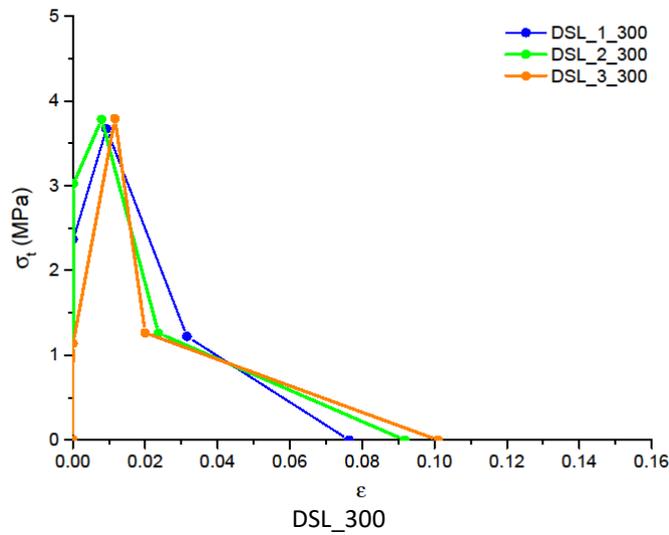
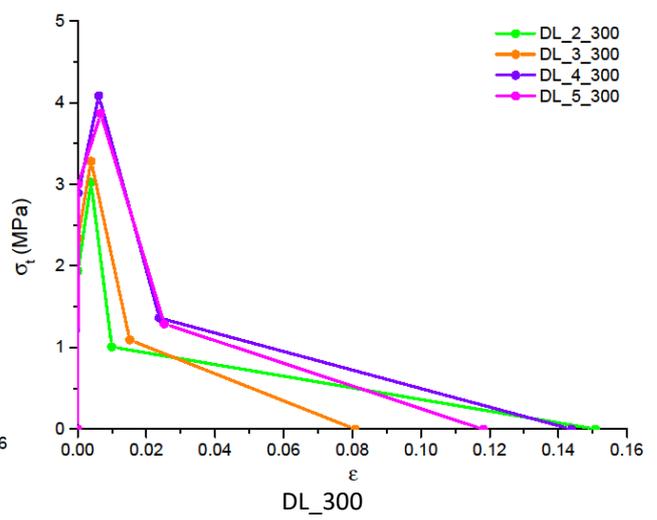
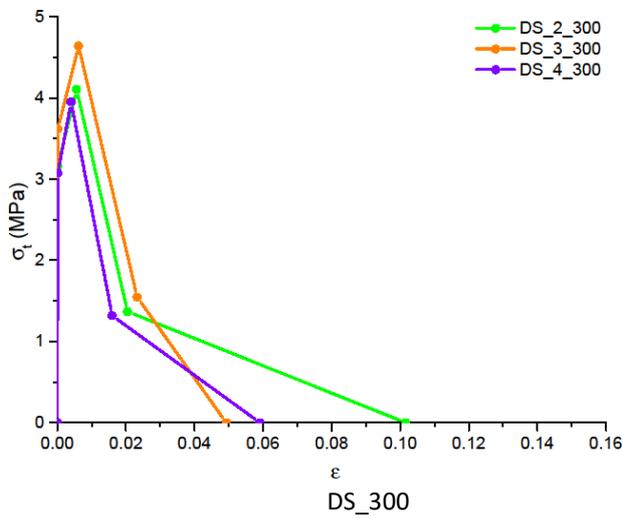
2. ENSAYO DE FLEXIÓN EN 4 PUNTOS

2.1. Ley tensión-deformación a temperatura ambiente.

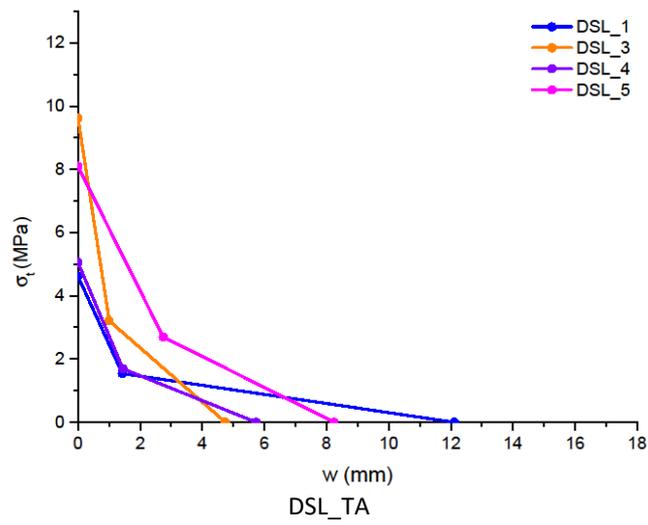
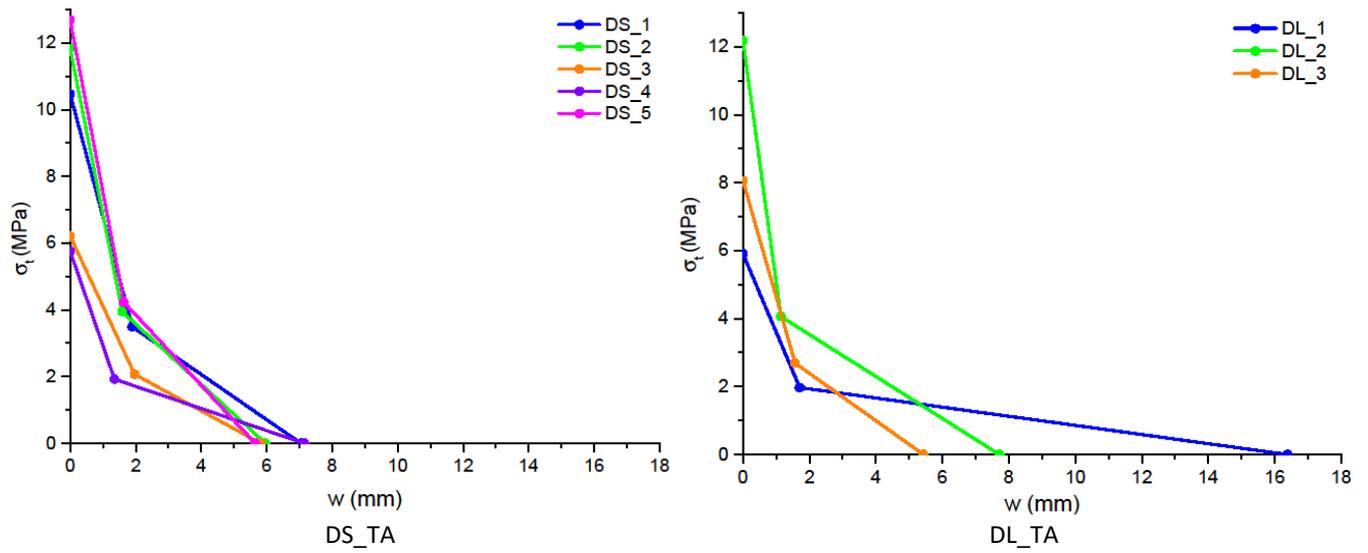




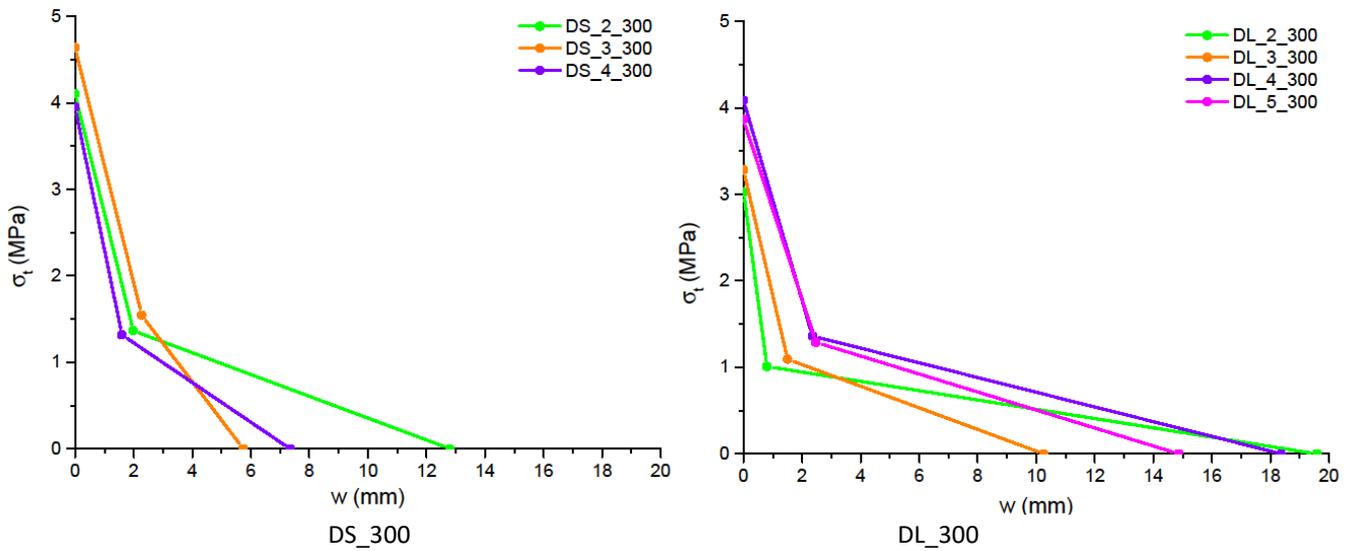
2.2. Ley tensión-deformación a 300°C.

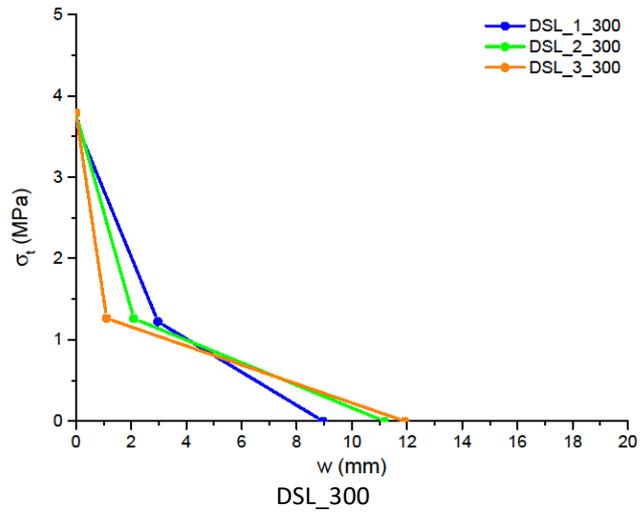


2.3. Ley cohesiva tensión-apertura de fisura a temperatura ambiente.



2.4. Ley cohesiva tensión-apertura de fisura a 300°C.





3. REPORTAJE FOTOGRÁFICO CAMPAÑA EXPERIMENTAL

3.1. Ensayo de compresión simple

Cubo 1



Cubo 2



Cubo 3



3.2. Ensayo Barcelona modificado

Cubo 1



Cubo 2



Cubo 3



Cubo 4



Cubo 5



Cubo 6



Cubo 7



Cubo 8

