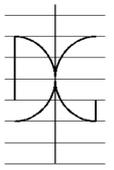




UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería de la Construcción y de
Proyectos de Ingeniería Civil

Coeficiente de orientación en hormigones de ultra alta
resistencia reforzados con fibras y su
relación con los métodos de hormigonado

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería del Hormigón

AUTOR/A: Ahumada Ponce, Maria Elena

Tutor/a: Serna Ros, Pedro

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



DEPARTAMENTO
DE INGENIERÍA DE
LA CONSTRUCCIÓN
Y DE PROYECTOS DE
INGENIERÍA CIVIL

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DEL HORMIGÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER
CURSO ACADÉMICO 2023/2024

COEFICIENTE DE ORIENTACIÓN EN
HORMIGONES DE ULTRA ALTA
RESISTENCIA REFORZADOS CON
FIBRAS Y SU RELACIÓN CON LOS
MÉTODOS DE HORMIGONADO

Autor/a: María Elena Ahumada Ponce

Tutor/a: Pedro Serna Ros

Valencia, julio de 2024

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA
CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



MUIH

Agradecimientos

En primer lugar, a Dios y la Virgen por cuidarme, darme la fuerza para salir adelante en todo momento y motivarme a dar lo mejor de mí desde las pequeñas cosas hasta las más grandes.

A mis padres Nancy y Hugo y hermanos por creer en mí y su cariño. A mi mamá Maya por siempre apoyarme en mis estudios en todo momento, especialmente, en los momentos complicados.

A Pedro Serna por inspirarme la curiosidad de investigar y las ganas de aprender cada día, incluso de los errores. También por su paciencia en atender todas mis consultas y por todas sus atenciones.

A todos los profesores que conocí y me transmitieron su pasión por lo que hacen que contribuyó a mi motivación.

A todas las personas que conocí en el laboratorio y contribuyeron en este trabajo, especialmente, Carlos Raúl.

Finalmente, a todas las hermosas personas que conocí en este país y que me acompañaron en este proceso e hicieron una experiencia muy linda y porque de cada uno me llevo algo. Mención especial a mis amigos Paul, Maricela y Gerardo por convertirse en una familia nueva.

ÍNDICE

RESUMEN	5
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABLAS	11
I. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Introducción.....	13
1.2 Objetivos.....	14
1.3 Estructura del documento.....	15
II. ESTADO DEL ARTE.....	16
2.1 Hormigón de ultra alta resistencia reforzado con fibras (UHPFRC)	16
2.2 Efecto del tipo de fibras en el hormigón UHPFRC.....	18
2.2.1 Propiedades en estado fresco	19
2.2.2 Propiedades en estado endurecido.....	21
2.2.3 Durabilidad.....	30
2.2.4 Otras propiedades	32
2.3 Ventajas y aplicaciones	35
2.4 Influencia de la orientación de las fibras en el hormigón	37
2.4.1. Orientación de las fibras.....	37
2.4.2 Recomendaciones para una adecuada colocación y factor de orientación	51
2.4.3 Factor de orientación de fibras	53
III. PROGRAMA EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA.....	56
3.1 Programa experimental.....	56
3.2 Materiales	63
3.2.1 Cemento	63
3.2.2 Agua.....	63
3.2.3 Agregados.....	63

3.2.4 Superplastificante	64
3.2.5 Humo de sílice.....	64
3.2.5 Fibras	64
3.3 Metodología	65
3.3.1 Dosificación y amasado	65
3.3.2 Hormigonado	66
3.3.3 Ensayos en estado fresco	69
3.3.4 Ensayos en estado endurecido.....	69
IV. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	71
4.1 Ensayos de asentamiento.....	71
4.2 Ensayos de rotura por compresión.....	71
4.3 Ensayo a tracción por flexión	72
4.3.1 Análisis de los gráficos del ensayo a flexo tracción	72
4.3.2 Análisis de las propiedades a tracción	76
4.3.3 Comparativo entre los resultados obtenidos con la norma y la aplicación UHPFRMat	88
4.2.3 Propuesta de coeficiente de orientación	90
V. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	92
5.1 Conclusiones	92
5.2 Líneas futuras	93
VI. REFERENCIAS	94
Referencias.....	94

RESUMEN

El hormigón de ultra alta resistencia reforzado con fibras es un material que presenta diversas propiedades como una muy alta resistencia a la compresión, durabilidad, entre otros. Además, el uso de fibras refuerza y compensan la fragilidad del hormigón, contribuyen frente a la fisuración, incrementa su ductilidad y mejora su comportamiento a tracción.

Si bien se utiliza 3 veces más cantidad de cemento que el hormigón tradicional, como mínimo el volumen total de hormigón se reduce a un tercio para la estructura, por lo que se mantiene o reduce el volumen de cemento consumido y se consigue una reducción más importante de otros materiales. Esto representa un ahorro económico y contribuye en cierta medida a la sostenibilidad.

El diseño de hormigón reforzado con fibras considera que las fibras están distribuidas dentro del material, pero con cierta orientación influenciada por el método de vertido y geometría de la estructura. Esta investigación experimental ha considerado estimar o proponer un punto de partida en el cálculo del coeficiente de orientación en hormigones de ultra alta resistencia reforzados con fibras, en relación con los métodos de hormigonado.

Se han realizado elementos tipo viga hormigonados en horizontal (9 prismas de 10x10x50cm y 9 prismas de 15x15x60 cm) con diferentes condiciones de hormigonado: vertido desde un punto fijo en un extremo, desde un punto fijo en el centro y variando el punto de vertido para que acompañe al avance de hormigón. También se elaboraron elementos tipo viga hormigonados en vertical (9 prismas de 10x10x50cm y 9 primas de 15x15x60 cm) a diferentes niveles de velocidad (baja, media y alta). Por otro lado, para estudiar el efecto de orientación de fibras en dos direcciones se elaboraron 3 losas de 100x100x5 cm para comparar 3 métodos de hormigonado: con punto fijo en la esquina, en el centro y variando el punto de vertido en zigzag. Se cortaron 16 especímenes por losa (8 en dirección longitudinal y 8 en transversal), sumando un total de 48 prismas ensayados a flexión para cada losa.

Los resultados obtenidos muestran una evidente diferencia en las propiedades de los elementos hormigonados en horizontal y vertical. Adicionalmente, se comprobó que los parámetros de la ley constitutiva están fuertemente influenciados con la orientación

de las fibras que, a su vez, está relacionada con el tamaño de los elementos y el método de hormigonado. Este último, principalmente, debido al efecto del flujo del hormigón y el efecto pared. Los elementos tipo viga hormigonados en horizontal mostraron una menor diferencia en sus propiedades entre las tres condiciones de hormigonado. Los elementos tipo losa presentaron una notoria diferencia con las probetas estándar de ensayo a flexión de 10x10x50 cm. Se evidencia que este tipo de elementos son diseñados para trabajar en dos direcciones.

También se comprobó la similitud entre los resultados obtenidos mediante la norma PNE 83519 y la aplicación UHPFRMat desarrollada en la UPV.

Finalmente, el presente trabajo propone coeficientes de orientación referenciales en función del método de hormigonado, tipo y espesor del elemento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rango de cargas versus curvas de deflexión para una matriz sin refuerzo y hormigón reforzado con fibras (ACI, 2009)	16
Figura 2: Diferentes familias de hormigones entorno al UHPFRC (Serna Ros, et al., 2012)	17
Figura 3: Etapas de fisuración en hormigón fibroso híbrido: microfisuración (izquierda) y macrofisuración (derecha) (WALRAVEN, 2007).....	18
Figura 4: Clasificación de las fibras para el hormigón (Rosario, 2021).....	19
Figura 5: Extensión diametral del hormigón según la dosificación de fibras ((Alberti, et al., 2020).....	19
Figura 6: a) Izquierda: Respuesta típica a compresión de UHPFRC en estado de tensión uniaxial en comparación con el hormigón ordinario (C), de alta resistencia (HSC) y de alta resistencia reforzado con fibras (HSFRC). b) Derecha: Comportamiento a compresión de distintos UHPFRC (Spasojevic, 2008).....	21
Figura 7: Esfuerzos en compresión para hormigones con y sin fibras: OC (ordinary concrete), SCC (Self compacting concrete) y HSC (plastic high performance concrete).	23
Figura 8: Respuesta típica a tensión de UHPFRC en estado de tensión uniaxial en comparación con el hormigón ordinario (OC) y de alta resistencia (HSC), el hormigón normal o de alta resistencia reforzado con fibras (FRC, HSFRC) y los compuestos cementosos de ingeniería (ECC) (Spasojevic, 2008).....	24
Figura 9: Distribución de tensiones transversales para las diferentes etapas (López, et al., 2015).....	25
Figura 10: UHPFRC Parámetros constitutivos de tracción: valores predichos con la aplicación UHPFRCMat versus valores experimentales o reales (Mezquida Alcaraz, et al., 2021).....	30
Figura 11: Distribución del tamaño de poro de UHPC, HPC y hormigón de resistencia normal (Schmidt & Fehling, 2005)	31
Figura 12: Valores de difusión de cloruros de UHPC, HPC y hormigón de resistencia normal ((Schmidt & Fehling, 2005).....	31
Figura 13: Proceso de craqueo progresivo para FROC, FRSCC y FRHSC (Boulekbache, et al., 2010).....	34

Figura 14: Distribución de fibra a través de un tramo (a) hormigón ordinario reforzado con fibras FROC, (b) hormigón de alta resistencia reforzado con fibras FRHSC (Boulekbache, et al., 2010).....	38
Figura 15: Fundición media y de capa y dirección de flujo correspondiente (Wille, 2012)	39
Figura 16: Esquema de la losa y de las probetas obtenidas. FR-SCC que incorpora fibras de acero (Zerbino, et al., 2012).	40
Figura 17: Vista e identificación de los prismas aserrados de las losas (Conforti, et al., 2018).	42
Figura 18: Factor de orientación en función del límite elástico (Boulekbache, et al., 2010).	43
Figura 19: Explicación de la orientación de las fibras en (a) flujo de fuente, (b) flujo de canal (Boulekbache, et al., 2010).	45
Figura 20: Inducción del flujo radial en la fabricación de placas UHPCC y muestras de flexión cortadas tomadas para obtener imágenes de la distribución de la orientación de las fibras (Kang & Kim, 2012).....	47
Figura 21: Comparación de la distribución de fibras a diferentes distancias de flujo en flujo radial con UHPCC (Kang & Kim, 2012).....	47
Figura 22: Métodos de colocación diferentes para paneles UHPFRC; (a) colocar hormigón en la esquina, (b) colocar hormigón en el centro (Yoo, et al., 2015).....	48
Figura 23: Imágenes del plano de corte en el anillo de carga (Izquierda: colocación en el centro, Derecha: colocación en la esquina); (a) S13 (aleatorio, 90°), (b) S16.3 (aleatorio, 45°), (c) S19.5 (aleatorio, 45°) (Yoo, et al., 2015).	49
Figura 24: Colocación del hormigón en dirección paralela (PL) transversal a (TL) la dirección longitudinal de la muestra (izquierda y derecha respectivamente). El material se coloca en orden numérico (Kang, et al., 2011).....	49
Figura 25: Tres direcciones de corte (Kang, et al., 2011)	49
Figura 26: Resultados de las pruebas de flexión según la dirección de colocación (Kang, et al., 2011).....	50
Figura 27: Imágenes de fibra mostradas con dirección de colocación y corte de muestra (Kang, et al., 2011).	50
Figura 28: Procedimiento de colocación del UHPFRC.....	51

Figura 29: Comportamiento a la tracción según el coeficiente de orientación de la fibra antes de que se produzca el fisuración en UHPFRCC (Kang & Kim, 2011).	52
Figura 30: Coeficiente de conversión para tener en cuenta el espesor del elemento y el proceso de fabricación	54
Figura 31: Elementos estructurales típicos, su método de hormigonado y las correspondientes direcciones principales (Fehling, et al., 2024).....	55
Figura 32: Esquema del programa experimental.....	57
Figura 33: Condiciones de vertido en elementos horizontales - vigas	59
Figura 34: Condiciones de vertido en elementos verticales.....	59
Figura 35: Condiciones de vertido en elementos horizontales - losas	60
Figura 36: Esquema de cortes realizados por cada losa	60
Figura 37: Esquema teórico del ensayo (Kang, et al., 2011).....	62
Figura 38: Resultado experimental tipo y proceso de obtención de los puntos característicos	62
Figura 39: Granulometría de la arenas fina y media empleadas	64
Figura 40: Materiales empleados para la elaboración de hormigón	65
Figura 41: Amasadora empleada para la fabricación de hormigón	66
Figura 42: Colocación de las fibras en la mezcladora.	66
Figura 43: Secuencia de hormigonado para las vigas de 15x15x60 cm.....	67
Figura 44: Tipos de hormigonado en losas.....	68
Figura 45: Procedimiento de corte de losas.....	68
Figura 46: Medición de la extensión diametral o escurrimiento del hormigón en distintas fechas de hormigonado	69
Figura 47: Ensayos a compresión del hormigón.....	70
Figura 48: Prensa ZwickRoell para ensayo a flexión (izquierda). Probeta con los captadores para el registro de la flecha (derecha).	70
Figura 50: Gráfico tensión vs flecha para las condiciones de hormigonado en vigas: RP (con punto de vertido avanzando a lo largo de la probeta), EP (con punto de vertido fijo en posición lateral), CP (hormigonado con punto de vertido fijo en el centro), HV (alta velocidad), MV (media velocidad) y LV (baja velocidad).	72
Figura 51: Resultados del ensayo de flexo tracción para las diferentes condiciones de hormigonado.	75

Figura 52: Leyes constitutivas a tracción para cada espécimen según la condición de hormigonado y el promedio para probetas de 10x10x50 cm.....	77
Figura 53: Leyes constitutivas a tracción para cada espécimen según la condición de hormigonado y el promedio para probetas de 15x15x60 cm.....	78
Figura 54: Curvas promedio para cada condición de vertido en probetas 15x15x60cm	80
Figura 55: Leyes constitutivas a tracción para especímenes de 10x10x50 cm (izquierda) y 15x15x60cm (derecha).	83
Figura 56: Leyes constitutivas a tracción para cada espécimen según la condición de hormigonado y el promedio para probetas de 15x15x60 cm.....	84
Figura 57: Curvas promedio para cada condición de vertido en losas comparada con las probetas RPS (promedio de resultados de las vigas 10x10x50 cm estándar) y sus rango de resultados individuales RPSi (resultados individuales de las vigas 10x10x50 cm estándar)	85
Figura 58: Gráficos de las leyes constitutivas del hormigón para las diferentes condiciones de vertido (a,b,c) y comparativo de los promedios con el estándar de 10x10x50cm (d).....	87
Figura 49: Diferencias entre las leyes constitutivas calculadas con el programa analítico y la norma	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Determinación de los parámetros constitutivos a tracción	27
Tabla 2: Coeficientes de fluencia para un UHFRPC (Interim Recommendations, 2012)	33
Tabla 3: Comparación relativa de diferentes factores entre el hormigón convencional y el UHPFRC (Serna Ros, et al., 2012)	37
Tabla 4: Resumen de los resultados de la prueba de flexión	41
Tabla 5: Comparación entre los valores promedio de la resistencia residual	42
Tabla 6: Resumen de resultados para UHPFRC recopilados de Kang & Kim (2011) .	44
Tabla 7: Resumen de las principales referencias recopiladas del estudio (Yoo, et al., 2015)	48
Tabla 8: Valores de orientación de fibras de acuerdo con la Figura 31 (Fehling, et al., 2024)	54
Tabla 9: Resumen de elementos a estudiar.....	58
Tabla 10: Detalle de vigas en posición horizontal.....	59
Tabla 11: Detalle de las vigas en posición vertical	59
Tabla 12: Detalle de losas.....	60
Tabla 13: Cantidad de muestras extraídas de las losas según el modo de colocación	61
Tabla 14: Dosificación para 1 m ³	65
Tabla 15: Resultados de la extensión diametral o escurrimiento del hormigón.....	71
Tabla 16: Resultados de resistencia a compresión por amasada	71
Tabla 17: Propiedades del hormigón de acuerdo con las curvas tensión deformación para probetas	73
Tabla 18: Propiedades del hormigón de las losas según el ensayo a 4 puntos	76
Tabla 19: Cálculo de las propiedades a tracción para cada tipo de vertido y tamaño de elemento	81
Tabla 20: Cálculo de las propiedades a tracción para cada tipo de vertido de hormigón en vertical.....	82
Tabla 21: Cálculo de las propiedades a tracción para cada tipo de vertido de hormigón en vertical.....	82

Tabla 22: Comparativo de las propiedades a tracción obtenidas de la losa con el estándar en vigas	86
Tabla 23: Comparativo de resultados entre las propiedades del método de análisis inverso y el método analítico.....	89
Tabla 24: Propuesta tentativa de coeficientes de orientación de fibras en función del método de colocación, elemento y espesor	91

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El Hormigón Reforzado con Fibras de Ultra Alto Rendimiento (UHPRFC) comenzó a desarrollarse en Francia en la década de 1990 y en algunas partes de Dinamarca. Este material de matiz cementosa se caracteriza por tener una resistencia a la compresión característica a 28 días mayor a 120 MPa, alta resistencia a flexión, durabilidad, ductilidad y buena trabajabilidad (Serna Ros, et al., 2012). Además, el uso de fibras tiene como fin aportar tenacidad y ductilidad a la resistencia a tracción y flexión (Kang & Kim, 2011). Un hormigón fisurado continúa soportando mayores cargas sin incrementar notablemente el ancho de la fisura por el efecto de unión de las fibras, lo que causa la aparición de nuevas fisuras en la matriz. En la etapa final, la rotura es muy dúctil pues la mayor parte de la energía es absorbida por las fibras deformadas o deslizando (Boulekbache, et al., 2010).

Normalmente, el diseño de hormigón reforzado con fibras se basa en una hipótesis que estipula que las fibras están distribuidas dentro del material, pero con cierta orientación. Como consecuencia, se puede producir una respuesta anisotrópica en los elementos estructurales que depende del método de vertido y geometría de la estructura (Conforti, et al., 2018). El conocimiento de la orientación de las fibras es un parámetro importante para asegurar un mejor diseño de las estructuras de hormigón (Boulekbache, et al., 2010).

La mayoría de las investigaciones sobre el efecto del refuerzo de fibra se han centrado en los efectos de la forma geométrica, el elemento estructural, el tipo y la fracción de volumen de la fibra y muy pocos consideraron que la distribución real de las fibras se ve afectada por diversos factores como el método de colocación (Kang & Kim, 2011). Debido a la alta fluidez, viscosidad adecuada y propiedades de auto compactación del UHPRFC, muchos estudios han analizado distintos elementos estructurales colocando el hormigón en una posición objetivo y dejándolo fluir. Sin embargo, algunas investigaciones llegaron a la conclusión de que los paneles de hormigón vertido en el centro (región de momento máximo) proporcionaron una mayor resistencia a la flexión biaxial y tenacidad que aquellos con hormigón colocado desde un punto fijo en la esquina. Además, las muestras donde se hormigonó en el centro presentaron una mejor orientación y mayor cantidad de

fibras en las zonas de momento máximo (Yoo, et al., 2015). Otros autores analizaron las propiedades de elementos de hormigón de 100x100x400mm para dos casos de colocación: hormigonado paralelo y transversal a la dirección longitudinal. Se determinó que el primer caso presentó una resistencia inicial al fisuración y una resistencia a flexión un 5,5% y 61% respectivamente mayor que la del último (Kang, et al., 2011).

En ese contexto, esta investigación tiene como objetivo analizar la influencia de las condiciones de ejecución, a través de distintos métodos de vertido, en la orientación de las fibras para el análisis de las propiedades mecánicas según la dirección del elemento de hormigón.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es conocer la relación entre diversas formas de vertido del UHPFRC con la orientación de las fibras y, como consecuencia de ello, estudiar su influencia en las propiedades mecánicas, especialmente, a flexo tracción. Los objetivos específicos fueron:

- Ejecutar una campaña experimental donde se evalúen dos tipos de elementos estructurales de UHPFRC (vigas -1D- y losas -2D) y estudiar la diferencia de las propiedades mecánicas en función de la dirección en la que trabajan.
- Analizar el efecto de las diferentes condiciones de vertido en las vigas con el elemento en posición horizontal y vertical para evaluar su influencia en la orientación de las fibras, donde las variables de hormigonado sean:
 - En horizontal: vertido desde un punto fijo en un extremo, desde un punto fijo en el centro y variando el punto de vertido para que acompañe al avance de hormigón.
 - En vertical: hormigonado controlando tres niveles de velocidad (velocidad alta, media y baja).
- Analizar tres condiciones de vertido en losas: en la esquina, en el centro y variando el punto de vertido que acompañe al avance de hormigón, y
- Obtener elementos prismáticos de las losas por corte para evaluar el efecto de la orientación de las fibras en dirección longitudinal y transversal.

- Caracterizar cada espécimen mediante el ensayo de flexo tracción a 4 puntos (PNE 83519).
- Determinar los parámetros constitutivos de tracción por medio de análisis inverso basado en pruebas de flexión a 4 puntos, con el uso de dos métodos y comparar los resultados entre estos:
 - Según el método simplificado propuesto por la norma PNE83519.
 - Aplicación predictiva desarrollada por la UPV: UHPFRCMat (Cáceres Vergara, et al., 2024).
- Analizar la influencia de los métodos de colocación en la orientación de las fibras según el tipo de elemento de estudio.

Esta investigación está limitada al uso de UHPFRC para una determinada fluidez, por lo que la variación de esta propiedad puede generar otro tipo de resultados en cuanto a la orientación de las fibras.

1.3 Estructura del documento

El presente documento está compuesto por 5 capítulos en los que se desarrolla la investigación y se incluye toda la información obtenida, el programa experimental, los resultados obtenidos y las principales conclusiones.

El capítulo I contiene la introducción, los objetivos generales y específicos y la estructura de esta investigación.

El capítulo II contempla el estado del arte que incluye la definición y propiedades del hormigón de ultra alta resistencia reforzado con fibras, las ventajas y aplicaciones de este, un alcance actual de los estudios sobre la influencia de la orientación de las fibras en el hormigón y una serie de recomendaciones para considerar su efecto.

El capítulo III detalla el programa experimental donde se explica los ensayos y variables estudiadas y la metodología empleada para la ejecución de la investigación.

El capítulo IV presenta los resultados obtenidos y el análisis de estos orientados a la evaluación de la influencia de los distintos métodos de vertido en la orientación de las fibras y las propiedades mecánicas del hormigón.

El capítulo V recopila las principales conclusiones del trabajo y recomendaciones para futuras líneas de investigación producto de las interrogantes que surgen fuera del alcance de la investigación.

II. ESTADO DEL ARTE

2.1 Hormigón de ultra alta resistencia reforzado con fibras (UHPFRC)

El hormigón, que presenta una notable resistencia a la compresión y durabilidad, es uno de los materiales más adoptados para la construcción de puentes, junto con el acero. Sin embargo, sus inherentes bajas resistencias a la tracción y a la flexión lo hacen propenso a agrietarse (Kang, et al., 2010).

Con el aumento de la resistencia a la compresión, el material de hormigón es más quebradizo y relativamente menos dúctil, lo que genera inconvenientes. El comportamiento frágil del hormigón de alta resistencia se puede mejorar al añadir fibras de acero a la mezcla de hormigón (Figura 1). Estas fibras refuerzan y compensan la fragilidad del hormigón al unir la paredes de las micro y macro fisuras y mediante la absorción de las subsiguientes tensiones de tracción que actúan sobre el hormigón. Por lo tanto, el refuerzo con fibras de acero confiere al material endurecido una ductilidad relativamente mejor, debido a que las fibras desarrollan una mejor unión con la densa y compacta matriz de cemento endurecido del hormigón de alta resistencia (Boulekbache, et al., 2010).

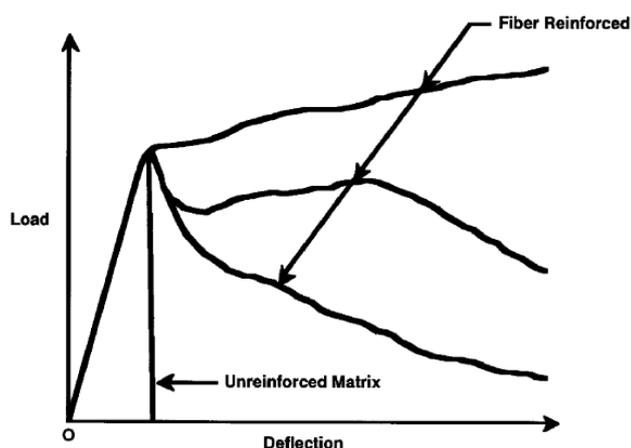


Figura 1: Rango de cargas versus curvas de deflexión para una matriz sin refuerzo y hormigón reforzado con fibras (ACI, 2009)

el UHPFRC es el producto de combinar tres tecnologías: hormigones autocompactantes, con fibras, y los de alta resistencia llevados al extremo

(Camacho Torregrosa & Serna Ros, 2012), tal como se observa en la Figura 2. Por tanto, puede proporcionar un rendimiento superior, especialmente bajo tracción, en comparación con el UHPC sin fibras (Kang & Kim, 2011). Para este material, alcanzar un comportamiento de endurecimiento por deformación en la matriz depende del tipo y contenido de fibra, la resistencia de la matriz, la unión entre la matriz y las fibras, y del tamaño y geometría de la muestra, el sistema de vertido, las condiciones de soporte, la redundancia estructural, etc. (Mezquida Alcaraz, et al., 2021).

El UHPFRC es capaz de alcanzar una resistencia a la compresión muy alta : 120-200 MPa. Normalmente, este tipo de hormigón está reforzado con fibras de acero para conferirle ductilidad y alta resistencia a la tracción : 7-12 MPa. Esta especial capacidad de carga es consecuencia directa de su densa microestructura, que además proporciona una matriz impermeable y sin poros de capilaridad para evitar la penetración de sustancias agresivas (líquidos y gases) que pueden generar corrosión (Mezquida Alcaraz, et al., 2021).

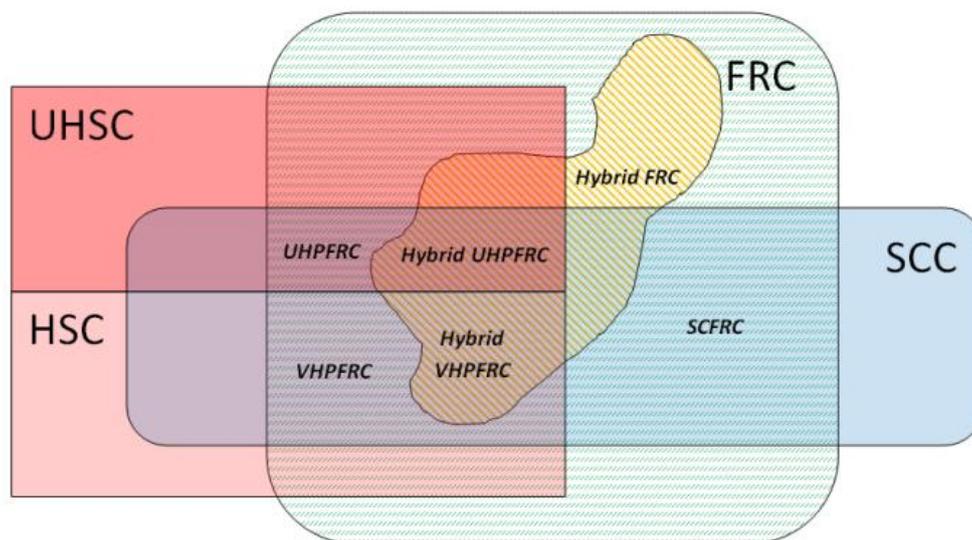


Figura 2: Diferentes familias de hormigones entorno al UHPFRC (Serna Ros, et al., 2012)

Los UHPFRC se diferencian de los hormigones de alto y muy alto rendimiento en que (Toutlemonde & Resplendio, 2011):

- El uso de fibras garantiza que el material no sea quebradizo y puede permitirnos reducir cualquier refuerzo clásico activo o pasivo.
- Su resistencia a la compresión es generalmente superior a 120 MPa.

- Su diseño de mezcla con un alto contenido de aglutinantes conduce a la reducción de porosidad capilar.
- La resistencia a la tracción directa de la matriz es superior a 7 MPa.

Elaborar UHPFRC requiere materias primas exclusivas (fibras de alto límite elástico, aditivos de última generación, áridos selectos de pequeño diámetro máximo), equipos y procesos no convencionales (alta energía de fabricación, curado al vapor, control intenso de humedad) y geometría cuidada para fabricar elementos muy finos (Camacho Torregrosa & Serna Ros, 2012).

2.2 Efecto del tipo de fibras en el hormigón UHPFRC

La exigencia de ductilidad conlleva la capacidad para soportar esfuerzos de tracción, pero sobre todo que ésta se mantenga cuando la matriz fisura. Para el control de la fisuración la utilización de fibras es imprescindible. Pero dependiendo del tipo de respuesta deseado será adecuado uno u otro tipo de fibras (Serna Ros, et al., 2012).

Las fibras más pequeñas ayudan a que no se propaguen las pequeñas fisuras, mientras que las fibras más grandes mantienen unidas las fisuras de mayor tamaño aportando resistencias residuales tras la rotura del elemento (EHE, 2008). Además, las que son cortas y esbeltas controlan la aparición de las primeras fisuras y las fibras largas garantizan la ductilidad para deformaciones altas. Incluso puede ser conveniente la utilización de combinaciones de diferentes tipos y/o dimensiones de fibras (HFC - hybrid Fiber Concrete).

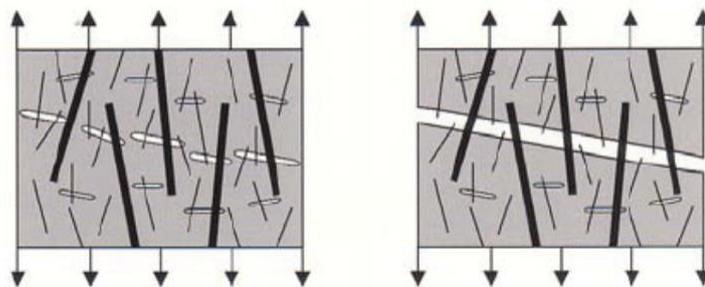


Figura 3: Etapas de fisuración en hormigón fibroso híbrido: microfisuración (izquierda) y macrofisuración (derecha) (WALRAVEN, 2007).

Las fibras se pueden clasificar según su comportamiento, naturaleza y tamaño (Rosario, 2021):

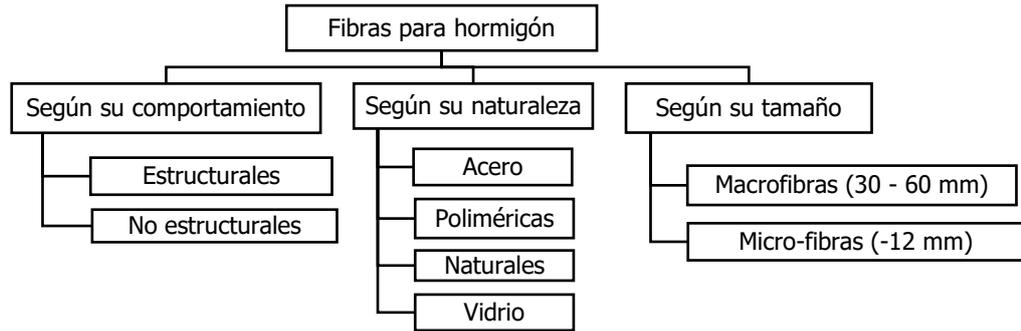


Figura 4: Clasificación de las fibras para el hormigón (Rosario, 2021)

Generalmente, el hormigón reforzado con fibras es dosificado con fibras cortas de longitudes entre 10 a 30 mm dispersas aleatoriamente en todas direcciones para exhibir un comportamiento isotrópico (Kang, et al., 2011).

2.2.1 Propiedades en estado fresco

La predicción de la trabajabilidad del UHPFRC no puede basarse simplemente en pruebas de asentamiento pues solo verifican el nivel de fluidez y no brindan información sobre las propiedades físicas de la mezcla. Por lo tanto, se deben utilizar mediciones reológicas para encontrar el rango de trabajabilidad (Buttignol, et al., 2017).

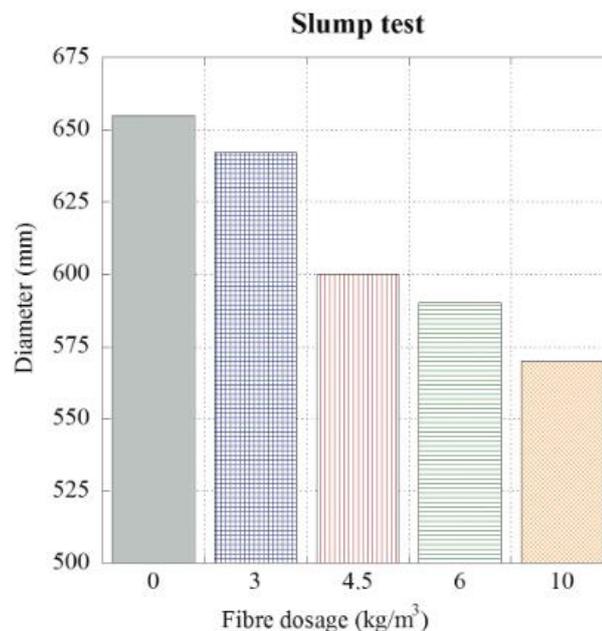


Figura 5: Extensión diametral del hormigón según la dosificación de fibras (Alberti, et al., 2020)

Diversas investigaciones coinciden en que las fibras reducen la trabajabilidad del hormigón (Figura 5) debido a los siguientes motivos (Yu, et al., 2014):

- Dado que este material no emplea agregados gruesos, posee alta viscosidad y fluidez (Kang, et al., 2011).
- La forma de las fibras es mucho más alargada en comparación con los agregados. Además, la superficie para el mismo volumen es mayor, lo que puede aumentar las fuerzas de cohesión entre las fibras y la matriz.
- Las fibras rígidas cambian la estructura del esqueleto granular y separan partículas que son relativamente grandes en comparación con la longitud de la fibra.
- Las fibras de acero a menudo tienen distintas formas (extremos en forma de gancho o tienen forma de onda) para mejorar el anclaje entre la fibra y la matriz circundante. La fricción entre las fibras de acero con extremos en forma de gancho y los agregados es mayor en comparación con las fibras de acero rectas, lo cual influye en la trabajabilidad.
- Debido a las altas fuerzas de cohesión entre las fibras y la matriz del hormigón, la adición de fibras de acero disminuirá la trabajabilidad del UHPFRC.

El UHPFRC requiere una alta fluidez o asentamiento para garantizar la dispersión o distribución uniforme y orientación de las fibras durante la colocación. La trabajabilidad está influenciada por la relación a/c (agua/cemento) y para este tipo de hormigón tiene un valor alrededor de 0.2. Aumentar el contenido de agua puede generar una pronunciada disminución de la resistencia, por lo que es un factor de control crítico. Por tanto, se deben incorporar altos niveles de súper e hiper plastificantes a la mezcla (Buttignol, et al., 2017) para garantizar la trabajabilidad de la mezcla.

La segregación puede estar relacionada con una alta relación volumen/superficie específica. Este tipo de hormigón es menos susceptible en comparación a otros debido a su alto contenido de finos y la mayor compacidad y densidad de la pasta (Morrobel, 2015).

Además, la adición de fibras de acero puede aumentar el contenido de aire en estado fresco y la porosidad en estado endurecido. Sin embargo, un empaquetamiento adecuado de partículas y un alto contenido de cemento deben

considerarse como métodos eficaces para reducir la influencia negativa de las fibras de acero adicionales (Buttignol, et al., 2017).

Las dosificaciones recomendadas para fibras de acero según los manuales de diseño se encuentran en el rango del 2% al 3% del volumen (Toutlemonde & Resplendio, 2011).

2.2.2 Propiedades en estado endurecido

2.2.2.1. Resistencia a compresión

El hormigón reforzado con fibras de ultra alto rendimiento (UHPFRC) es un material cementoso reforzado avanzado. "Rendimiento ultra alto" se refiere principalmente a resistencias mecánicas mejoradas, tenacidad a la fractura y durabilidad. El comportamiento típico del UHPFRC en un estado de tensión uniaxial en comparación con otros hormigones se muestra esquemáticamente en la Figura 6 (Spasojevic, 2008).

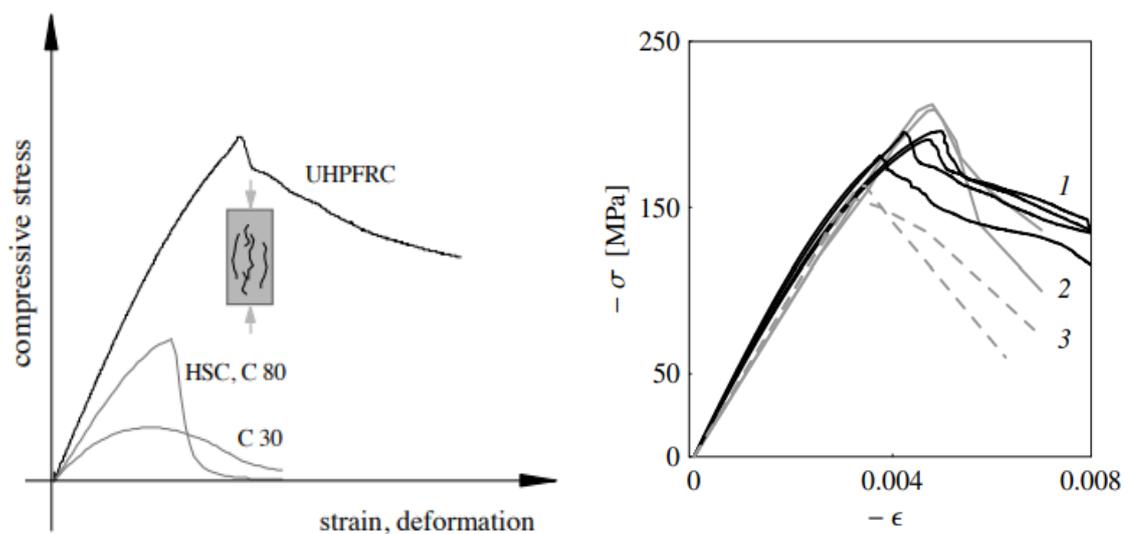


Figura 6: a) Izquierda: Respuesta típica a compresión de UHPFRC en estado de tensión uniaxial en comparación con el hormigón ordinario (C), de alta resistencia (HSC) y de alta resistencia reforzado con fibras (HSFRC). b) Derecha: Comportamiento a compresión de distintos UHPFRC (Spasojevic, 2008)

El hormigón con fibras tiene un efecto similar al que producen los áridos en el hormigón ordinario desde el punto de vista mecánico. La Figura 6 b), muestra los resultados de las pruebas de compresión uniaxial estática en elementos de diferentes UHPFRC y se caracteriza por los siguientes regímenes: parte elástica lineal guiada por el comportamiento de la matriz cementosa, módulo de elasticidad (E_c) en el rango de 50 - 70 GPa, pieza no lineal antes de la carga de falla, comportamiento de ablandamiento post-pico (Spasojevic, 2008).

Las leyes de comportamiento del UHPFRC en compresión son casi rectas y no tienen un rango plástico real. Las dispersiones obtenidas sobre las resistencias a la compresión son generalmente bajas debido a la calidad y homogeneidad de la premezcla. En compresión, se considera que el UHPFRC permanece lineal-elástico hasta entre un 70% y un 80% de la carga máxima (Spasojevic, 2008).

El comportamiento compresivo del UHPFRC puede considerarse lineal-elástico hasta niveles de deformación de entre 2 y 3 ‰ (Graybeal, 2006). Las resistencias a compresión muy elevadas (superior a 120 MPa) obligan a reducir el tamaño de las probetas respecto a los hormigones ordinarios pues se requieren prensas de capacidad y especial cuidado en su realización. Se suelen realizar las pruebas con cubos por ser más fáciles de hacer (Toutlemonde & Resplendio, 2011).

Los efectos sobre la resistencia deben determinarse conforme a la norma EN 14845-2 utilizando un hormigón de referencia según el proyecto de Norma prEN 14845-1.

La EHE-08 y el Código Estructural indican que el diagrama tensión-deformación del hormigón con fibras no se modifica respecto al del articulado, ya que se puede considerar que la adición de las fibras no varía de forma significativa el comportamiento del hormigón en compresión. El Comité 544 de la ACI indica que la adición de fibras de acero en el hormigón suele producir incrementos o descensos poco significativos de la resistencia a compresión del material (ACI, 2009).

Algunas investigaciones indican que la presencia de fibras reduce ligeramente la resistencia a la compresión, o al menos no la afecta. En algunos casos, la presencia de fibras en el hormigón ha reducido la resistencia a la compresión en aproximadamente un 7% para el hormigón reforzado con fibras ordinario, un 6% para el hormigón autocompactante reforzado con fibras y un 10% para el hormigón reforzado con fibras de alta resistencia, como se muestra en la Figura 7 (Boulekbache, et al., 2010).

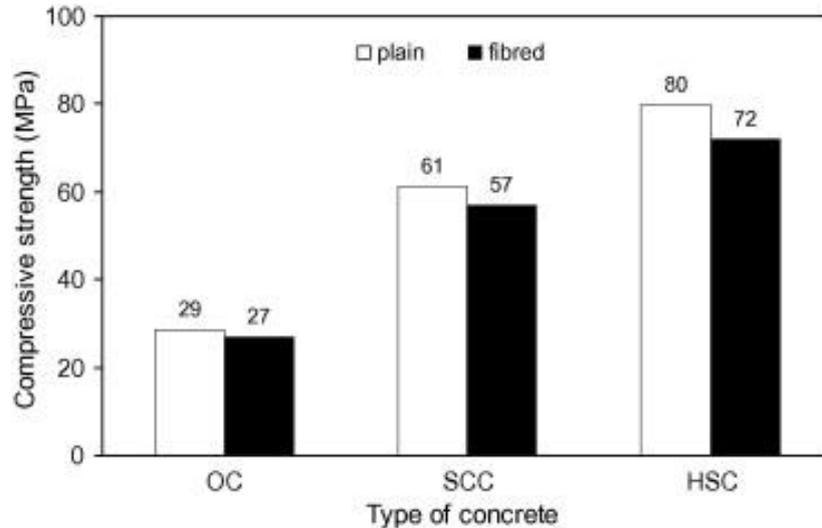


Figura 7: Esfuerzos en compresión para hormigones con y sin fibras: OC (ordinary concrete), SCC (Self compacting concrete) y HSC (plastic high performance concrete).

El rol de las fibras en el ensayo a compresión se reduce y podría incluso ser negativo debido a la concentración de tensiones locales que inician previamente la rotura en la pasta de cemento endurecida. También pueden causar defectos adicionales en la matriz del cemento debido a una compacidad insuficiente. Su función mecánica y uso beneficioso se activa después de la aparición de la fisuración, especialmente en la fase posterior al pico. En flexión, las fibras son eficientes cuando están orientadas en la dirección de los esfuerzos de tracción, aún más para el hormigón de alta resistencia, pues la unión entre las fibras y la matriz de la pasta es de mejor calidad (Boulekbatche, et al., 2010).

2.2.2.2. Comportamiento a la tracción

Como se indicó anteriormente, este material tiene una resistencia a tracción entre 7-12 MPa. Spasojevic recopila de diversas fuentes que el UHPFRC se distingue por exhibir endurecimiento por deformación en tracción (Figura 8), mientras que otros hormigones pueden exhibir un comportamiento de endurecimiento al flectarse, pero se caracterizan por un ablandamiento por deformación en tracción (Spasojevic, 2008).

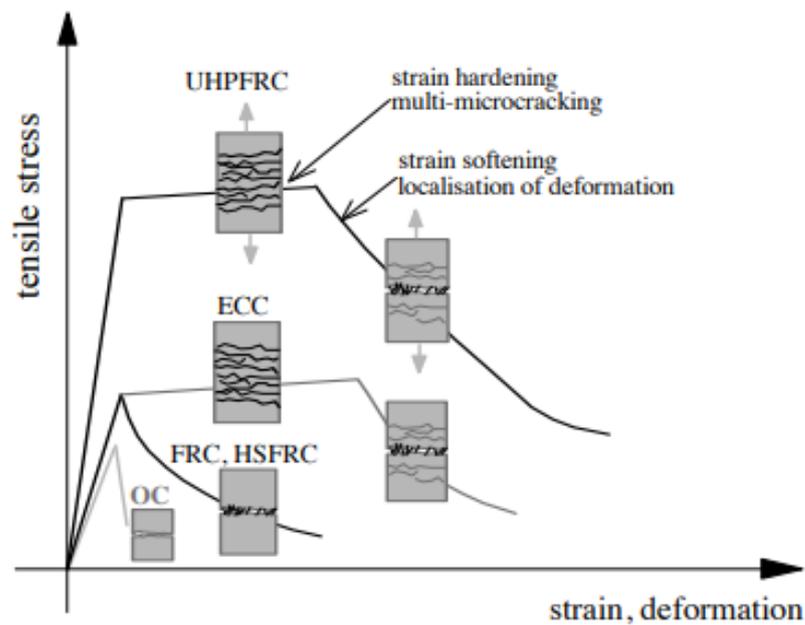


Figura 8: Respuesta típica a tensión de UHPFRC en estado de tensión uniaxial en comparación con el hormigón ordinario (OC) y de alta resistencia (HSC), el hormigón normal o de alta resistencia reforzado con fibras (FRC, HSFRC) y los compuestos cementosos de ingeniería (ECC) (Spasojevic, 2008)

La fibra en el UHPFRC está involucrada en la resistencia del material antes y después de la fisuración. En el primer caso, si el control se realiza correctamente (formulación, tiempo de mezcla, fraguado), se obtiene una baja dispersión de la resistencia a la tracción de la matriz de cemento que gobierna la resistencia antes de la fisuración. La cuestión fundamental es conseguir controlar y asegurar la resistencia tras la fisuración en cualquier estructura sabiendo que está relacionada con la orientación de las fibras, que depende de las condiciones de ejecución (Toutlemonde & Resplendio, 2011). Es importante realizar pruebas representativas de lo que se realizará y determinar la ley de comportamiento de tracción real para corregir el resultado con un coeficiente de orientación.

Para estructuras de espesor sustancial para las cuales la influencia del encofrado es limitada (efecto pared), el tamaño de las muestras para el ensayo de flexión por tracción debe ser relativamente grande en comparación con el tamaño de la fibra. Si el tamaño del prisma es muy pequeño, este efecto pared tiende a orientar las fibras en la dirección del prisma (son paralelos a los bordes) y sobreestima la resistencia real del material de laboratorio. Si las dimensiones de las muestras son demasiado pequeñas, se obtiene una dispersión muy

importante sobre las muestras aserradas que tiende a subestimar la resistencia real de la estructura, o incluso imposibilitar el análisis estático de estas muestras (Toutlemonde & Resplendio, 2011).

Por tanto, para elementos delgados en los que el efecto pared es fundamental. Si el espesor del elemento es menos de tres veces la longitud de la fibra, tiende a favorecer la orientación 2D de las fibras, y se suele ensayar directamente elementos del mismo espesor como la estructura real tanto para las pruebas laboratorio como las de idoneidad (Toutlemonde & Resplendio, 2011). El ensayo a flexión puede realizarse a 3 o 4 puntos.

La Figura 9 muestra la ley constitutiva tensión-deformación ($\sigma - \epsilon$) y la notación de los parámetros utilizados para modelar el comportamiento de UHPFRC a 4 puntos: módulo elástico E (se considera el mismo tanto en compresión como en tracción), primera tensión de tracción de fisuración f_t , resistencia última a la tracción $f_{t,u}$ y su deformación asociada $\epsilon_{t,u}$, la deformación máxima $\epsilon_{t,max}$ y la deformación al final de la etapa lineal $\epsilon_{t,el}$ (relación entre f_t y E). Además, se pueden distinguir cuatro etapas diferentes de acuerdo con la deformación en la fibra de mayor tensión (López, et al., 2015):

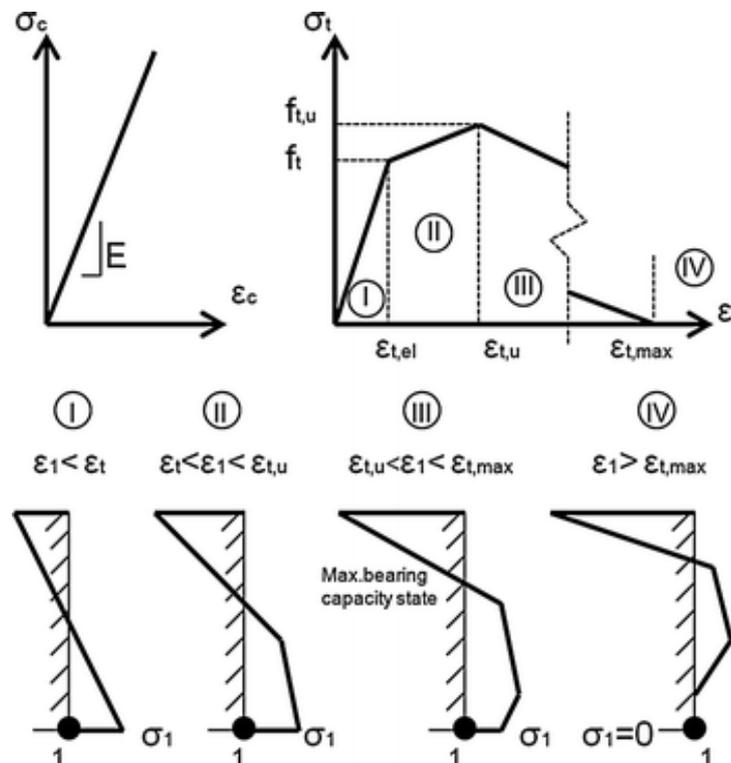


Figura 9: Distribución de tensiones transversales para las diferentes etapas (López, et al., 2015).

- Etapa I: elástica lineal hasta la deformación por fisuración de la matriz $\epsilon_{t,el}$
 - Etapa II: comportamiento de endurecimiento por pseudodeformación caracterizado por múltiples micro fisuras hasta la localización de la fisura $\epsilon_{t,u}$
 - Etapa III: comportamiento de ablandamiento caracterizado por el desarrollo de la macro fisura hasta que se inicia el deslizamiento de las fibras $\epsilon_{t,max}$
 - Etapa IV: Se localiza una fisura principal que se propaga y las fibras deslizan
- Nota: Si el valor $f_{t,u}$ se define como inferior a f_t , tanto las etapas II como III corresponden a un comportamiento de ablandamiento.

Para determinar los parámetros constitutivos de tracción, esta investigación usó dos métodos:

- Análisis inverso simplificado basado en pruebas de flexión a 4 puntos
 Los ensayos se realizaron de acuerdo con la norma PNE 83519. Mediante este ensayo, se pueden extraer los resultados de la flecha que genera una fuerza determinada. Con la fuerza, se calcula la tensión equivalente empleando la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{FL}{bh^2} \quad (1)$$

Con este parámetro, se puede graficar las curvas tensión equivalente vs flecha. La normativa también establece algunas expresiones para determinar los parámetros constitutivos a tracción.

El método de análisis inverso simplificado de cuatro puntos (4P-IA) es una metodología basada en el modelo de rótula plástica de forma cerrada. Implica tener que seleccionar cuatro puntos clave específicos extraídos del esfuerzo de flexión-desplazamiento equivalente experimental 4PBT en la curva de mitad del tramo. Con estos puntos, los parámetros que definen la supuesta ley cuatrilínea tensión-deformación dentro de la rótula se pueden determinar mediante un cálculo aproximado. Esta ley se utiliza para determinar el comportamiento de tracción constitutivo de deformación por endurecimiento (SH) UHPFRC (Mezquida Alcaraz, et al., 2021).

Tabla 1: Determinación de los parámetros constitutivos a tracción

E	$4.79 h m$	$m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\delta}$
f_t	$\frac{\sigma_1}{1.59} \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)^{0.21}$	Parámetros normalizados
$\varepsilon_{t,u}$	$\frac{f_t}{E} \left(6.65 \frac{\delta_3}{\delta_1} - 9.40\right)$	$\varepsilon_{t,el} = f_t / E$
$f_{t,u}$	$\alpha^{-0.17} \left(2.24 \frac{\sigma_3}{\sigma_1} - 1.55\right) f_t$	$\alpha = \varepsilon_{t,u} / \varepsilon_{t,el}$
δ_4^*	$\delta_4 \cdot k1$	$k1 = 1 + \frac{0,6}{l} d$
$\varepsilon_{t,0}$	$\gamma^{-0.38} \alpha^{0.89} \left(2.82 \frac{\delta_4^*}{\delta_3} - 1.68\right) \frac{f_t}{E}$	$\gamma = f_{t,u} / f_t$
w_0	$\left(\varepsilon_{t,0} - \varepsilon_{t,u} + \frac{10f_{t,u}}{3E}\right) \frac{3h}{2}$	

Donde:

- δ flecha según medida en centro de vano
- σ tensión equivalente
- F fuerza total aplicada en los rodillos de carga
- S_0 recta tangente al inicio de la curva tensión equivalente-flecha
- S_{75} recta con una pendiente del 75% de la pendiente de S_0
- S_{40} recta con una pendiente del 40% de la pendiente de S_0
- $f_{r,j}$ resistencia residual a la tracción por flexión, $j=1,2,3,4$
- b ancho de la probeta
- h canto de la probeta
- d distancia desde la parte superior de la fisura a centro de vano
- L longitud total de la probeta
- l luz de ensayo

f_t	resistencia a tracción de la matriz
$f_{t,u}$	resistencia última a tracción
ε_t	deformación para la tensión f_t
$\varepsilon_{t,u}$	deformación para la tensión f_{tu}
$\varepsilon_{t,0}$	parámetro de deformación auxiliar
w_o	abertura de fisura
α	parámetro adimensional
γ	parámetro adimensional
L_f	longitud de la fibra más larga utilizada para la elaboración del hormigón
m	pendiente inicial de la curva tensión equivalente-flecha
$\Delta\delta$	variación de flecha entre dos puntos en el tramo lineal de la curva tensión equivalente-flecha
$\Delta\sigma$	variación de tensión entre dos puntos en el tramo lineal de la curva tensión equivalente-flecha
δ_c	intersección de la prolongación de la pendiente inicial de la curva tensión equivalente-flecha con el eje de las X
δ_{corr}	flecha según 3.1 corregida al origen según el apartado 9.2

En aquellos casos en los que el resultado de aplicar la formulación de la tabla A1 se obtenga un valor $\gamma < 1$, el resultado de $f_{t,u}$ queda infravalorado, por lo que se debe hacer una corrección según la siguiente expresión:

$$f_{t,uc} = \left(1 + \frac{var}{100}\right) \cdot f_{t,u}$$

siendo:	$var = 0$	si $\gamma \geq 1$	(SH)
	$var = -27.97 \cdot \gamma + 28.90$	si $0.75 < \gamma < 1$	(SS)
	$var = -125.08 \cdot \gamma + 101.62$	si $\gamma \leq 0.75$	(SS)

- Aplicación predictiva "UHPFRCMat" desarrollada en la UPV

La Universidad Politécnica de Valencia desarrolló la aplicación "UHPFRCMat" (Cáceres Vergara, et al., 2024) para determinar los parámetros constitutivos del hormigón. Para ello, con una base de datos experimental se programó una aplicación capaz de predecir el comportamiento a tracción utilizando la curva experimental 4PBT como entrada. La mayoría de los procesos han sido concebidos para caracterizar endurecimiento por deformación (SH) UHPFRC; sin embargo, este método justificó su uso en casos de ablandamiento por deformación (SS) UHPFRC. Como resultado, se estableció un proceso simple para obtener el comportamiento a tracción (Mezquida Alcaraz, et al., 2021).

Esta aplicación determina directamente los parámetros constitutivos de tracción al introducir la curva experimental σ - δ de 4PBT. También permite evitar la variabilidad debida a la interpretación y aplicación del 4P-IA debido a que toda la base de datos se produjo de la misma forma. La variabilidad en el resultado final puede restringirse a otros efectos más relacionados con el proceso de hormigonado, sistema de vertido, conservación de las probetas y la idoneidad del método de ensayo utilizado para caracterizar el comportamiento a tracción del UHPFRC (en este caso, el 4PBT).

La aplicación utiliza una adaptación del predictor kriging del paquete de software DACE (Diseño y análisis de experimentos informáticos). Este es una caja de herramientas de Matlab para trabajar con aproximaciones de kriging con modelos informáticos, en este caso, deterministas (Mezquida Alcaraz, et al., 2021).

La Figura 10 muestra que los valores predichos de f_t y f_{tuc} fueron muy precisos. Los valores de ε_{tu} y w_o fueron confiables y, aunque los valores de E parecieron mostrar algún punto con una ligera desviación, en general podrían considerarse una buena predicción (Mezquida Alcaraz, et al., 2021).

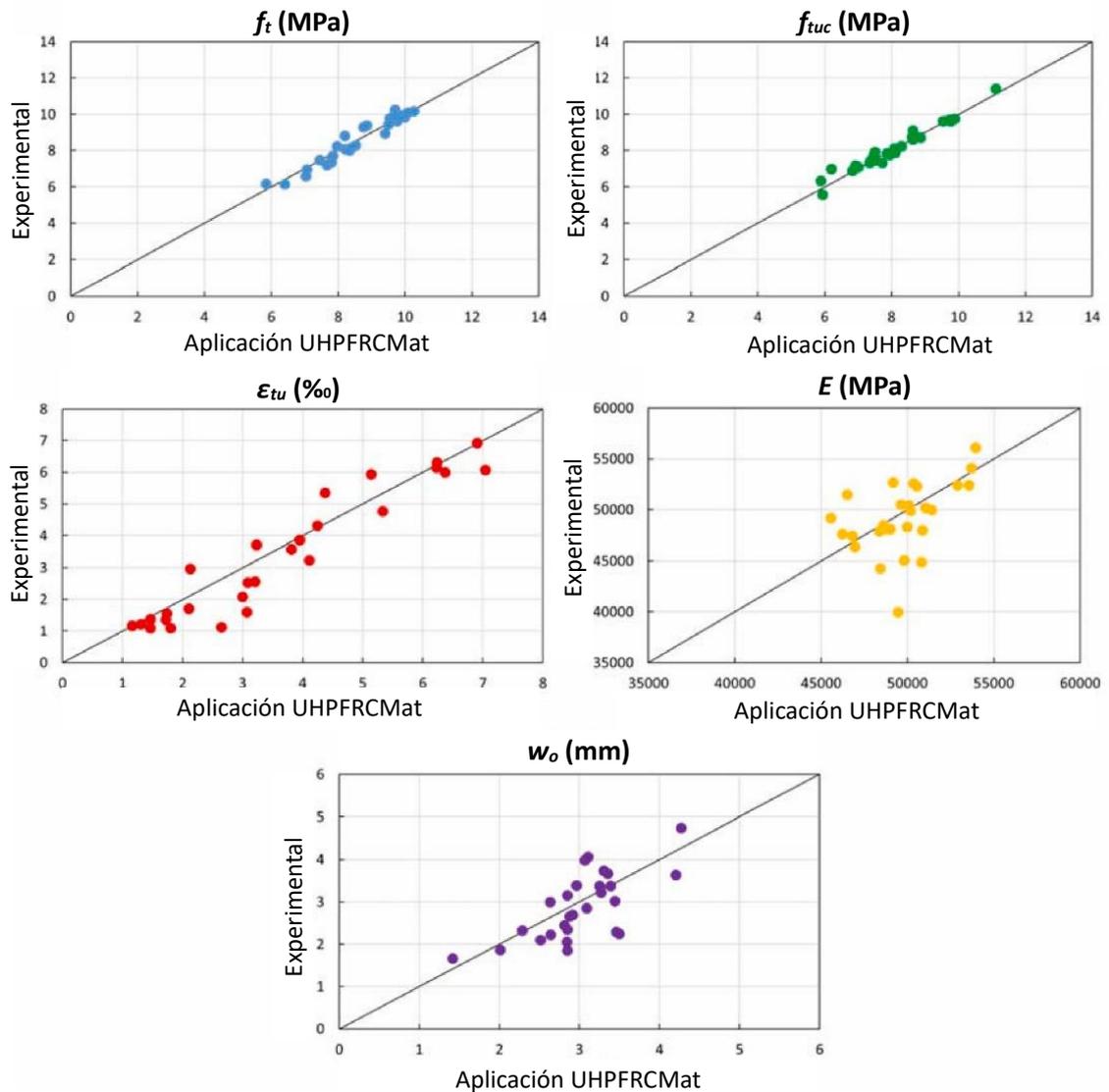


Figura 10: UHPFRC Parámetros constitutivos de tracción: valores predichos con la aplicación UHPFRCMat versus valores experimentales o reales (Mezquida Alcaraz, et al., 2021).

2.2.3 Durabilidad

El hormigón de ultra alta resistencia reforzado con fibras suele ser extremadamente cerrado y compacto. Diversos autores coinciden en que tiene una estructura especial caracterizada por una ausencia de porosidad capilar o porosidad en escala muy pequeña no interconectada. La Figura 11 compara la estructura de diferentes hormigones. Como referencia, el UHPC muestra la ausencia de poros capilares en las pruebas realizadas con intrusión de mercurio (Schmidt & Fehling, 2005).

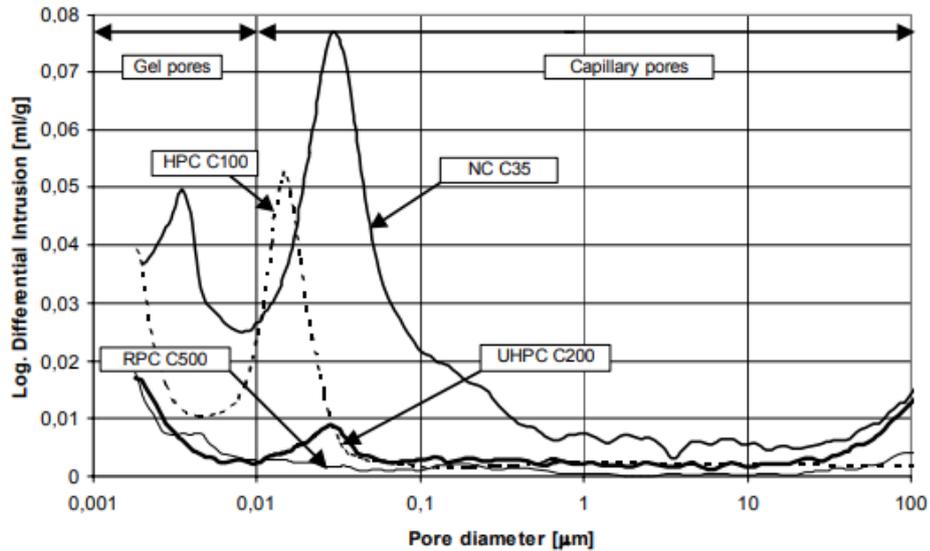


Figura 11: Distribución del tamaño de poro de UHPC, HPC y hormigón de resistencia normal (Schmidt & Fehling, 2005)

Esto le confiere un rendimiento muy excepcional en términos de durabilidad: la porosidad del agua, la permeabilidad al aire y los factores de difusión de iones cloruro se reducen considerablemente en comparación con otros hormigones (Figura 12). Por tanto, es adecuado para estructuras sometidas a ambientes externos agresivos (Toutlemonde & Resplendio, 2011).

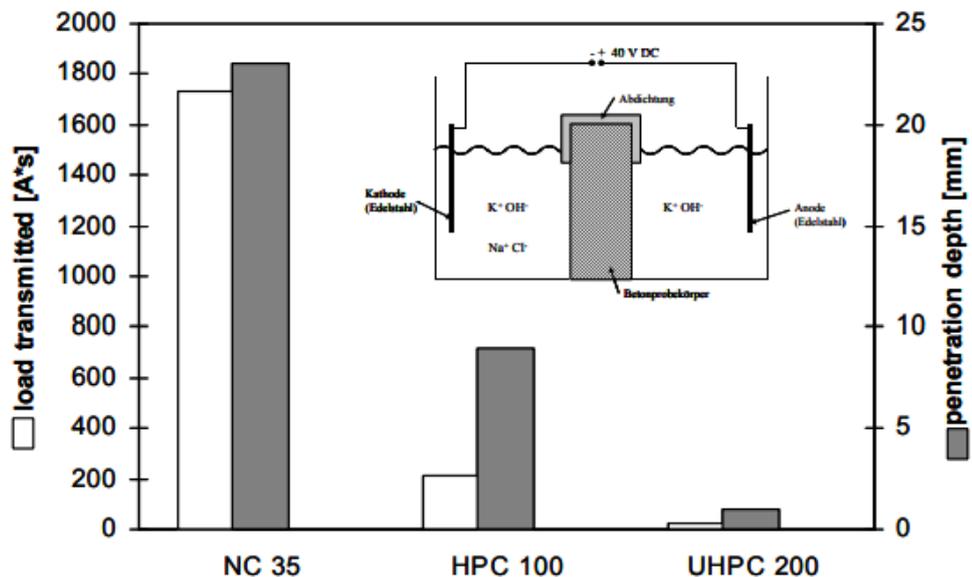


Figura 12: Valores de difusión de cloruros de UHPC, HPC y hormigón de resistencia normal (Schmidt & Fehling, 2005)

Aunque el proceso de fisuración es algo inevitable en un elemento pétreo como es el hormigón, las fibras contribuyen a que el proceso de fisuración sea un proceso distribuido en una región amplia del elemento. A diferencia del hormigón tradicional en el que aparecen un número máximo de fisuras visibles y medibles, en este material se produce lo que se conoce con el nombre de "multi fisuración";

es decir, el desarrollo de multitud de fisuras con un espaciamiento muy pequeño y una abertura mínima lo que implica un incremento notable de la durabilidad de la estructura (López Martínez, 2012).

Además, la baja relación a/c y el hecho de que un porcentaje considerable de la pasta de cemento permanece sin hidratar pueden producir una mayor hidratación en las micro fisuras en presencia de humedad, lo que origina un auto curado. Algunas investigaciones establecen que existe tanto la recuperación de la rigidez global como una mejora en la resistencia de probetas inicialmente fisuradas, en función del tiempo de curado. La recuperación de la rigidez se debe a la formación de nuevos cristales cercana a la de los cristales C-S-H que se formaron inicialmente (Spasojevic, 2008).

2.2.4 Otras propiedades

Retracción

El UHPFRC tiene una relación a/c muy baja, lo que provoca una contracción autógena muy alta de alrededor de 550 $\mu\text{m}/\text{m}$ y una contracción por secado muy pequeña de aproximadamente 150 $\mu\text{m}/\text{m}$ para UHPFRC sin tratamiento térmico y hasta ninguna contracción después de un tratamiento térmico (Toutlemonde & Resplendio, 2011). Además, según la normativa francesa (Interim Recommendations, 2012), la retracción es principalmente autógena y se consigue eliminar casi por completo con un tratamiento térmico.

Tratamiento térmico

Algunos UHPFRC están sujetos a un tratamiento especial que se aplica varias horas después de que fragua el hormigón. Consiste en calentar el elemento a una temperatura muy alta (alrededor de 90°C) y una humedad relativa cercana a la saturación durante aproximadamente 48 horas. Esto puede aumentar significativamente la durabilidad y reducir los efectos retardados: sin contracción por secado y con una reducción muy sustancial de la fluencia. Los métodos más tradicionales, como el vapor aplicado en las primeras horas, posiblemente puedan anticipar el inicio del fraguado y acelerar el fraguado inicial. Estos se realizan a una temperatura moderada (entre 40 y 50°C) y tienen una influencia mucho menor sobre los efectos retardados.

Muchos UHPFRC se implementan sin ningún tratamiento térmico, lo que no les impide formar resistencias que desarrollan muy rápidamente (más de 70 MPa después de unas horas). Estas mezclas suelen tener una fase latente antes de la fase de fraguado, que es más larga que el hormigón convencional. Cuando comienza el fraguado, el aumento de la resistencia es muy rápido (Toutlemonde & Resplendio, 2011).

Fluencia

La mayor retracción autógena de los hormigones UHPC contribuye a un aumento de la fluencia a edad temprana a comparación con otros hormigones. La gran cantidad de pasta hace que exista más deformación de silicato cálcico hidratado ante la carga (HRT-06-103, 2006).

El empleo de fibras metálicas reduce la fluencia en compresión en el UHPFRC, por lo que presentan menos fluencia a corto plazo. Sin embargo, algunos autores indican que el empleo de un alto porcentaje de fibras puede generar el efecto contrario, aumento de fluencia. Un mayor contenido de fibra de acero reduce la fluidez del hormigón fresco cuando la relación a/c es muy baja, lo que resulta en una zona de transición interfacial relativamente débil entre la fibra de acero y la matriz y provoca más defectos internos en el hormigón (Xu, et al., 2018).

El Anexo 4 de la Recomendación Francesa (Interim Recommendations, 2012) establece algunos coeficientes de fluencia en función de la edad de aplicación de la carga y, en casos de falta de datos, sugiere el uso de 0.8 cuando no se aplique tratamiento térmico y 0.2 en caso de que sí (Cordero Morrobel, 2015).

Tabla 2: Coeficientes de fluencia para un UHFRPC (Interim Recommendations, 2012)

Edad de aplicación de la carga (días)	Coefficiente de fluencia
28	1.08
7	1.57
4	1.8
1	2.27

Capacidad de disipación de energía, resistencia al impacto

Este material tiene una alta capacidad de disipación de energía, lo que garantiza la estabilidad frente a la fisuración incluso en caso de impacto relativamente fuerte.

Su resistencia a la abrasión y a los efectos dinámicos lo hacen relevante en aplicaciones de protección de estructuras hidráulicas sometidas a golpes o explosiones. Por ejemplo, en los choques, la presencia de fibras limita que las virutas se desprendan violentamente, lo que puede suponer un riesgo para la seguridad de las personas (Toutlemonde & Resplendio, 2011).

Investigaciones recopilan que, para tasas típicas de carga de impacto en estructuras, se ha demostrado que la resistencia a la tracción aumenta hasta dos veces y la resistencia a la compresión hasta 1.5 veces (Spasojevic, 2008).

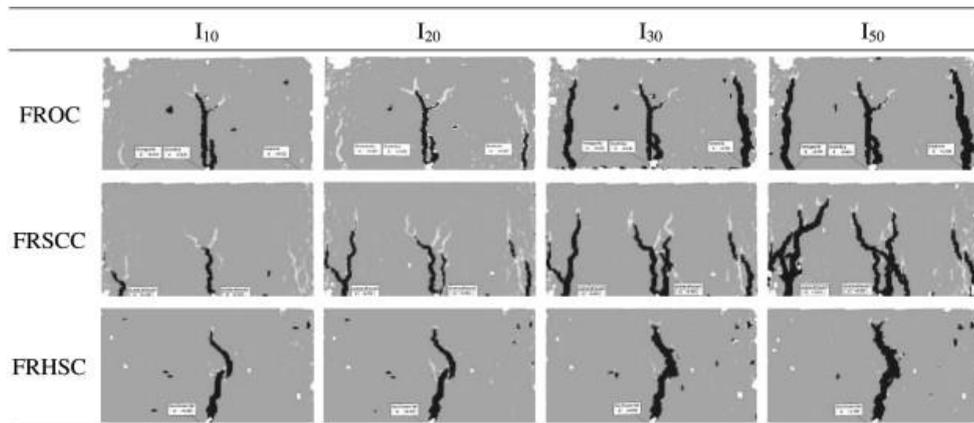


Figura 13: Proceso de craqueo progresivo para FROC, FRSCC y FRHSC (Boulekbache, et al., 2010)

Otro estudio indica que la ductilidad es mayor para el hormigón con buena trabajabilidad como el hormigón autocompactante y el ordinario reforzado con fibras (FRSCC y FROC respectivamente). Con resistencias altas de la matriz (hormigón autocompactante reforzado con fibras FRHSC), generalmente hay una caída más pronunciada y repentina en la capacidad de carga después de la carga máxima. Sin embargo, en un hormigón reforzado con fibras eficiente (FROC y FRSCC), la liberación de energía se verá compensada por un puente efectivo de fibras. Durante la etapa inelástica entre la primera fisura y la carga máxima, se desarrollan múltiples fisuras (Figura 13). Este tipo de comportamiento alcanza un rendimiento óptimo para el hormigón fibroso compuesto con fibras más eficientes y un adecuado diseño de mezcla (FROC y FRSCC). También se puede observar que para FROC y FRSCC la fisura no se propaga en una sola línea, sino una zona

en la que aparecen las fisuras. Para un FRHSC, todas las deformaciones parecen localizadas en una sola fisura (Boulekbache, et al., 2010).

Resistencia al fuego

El UHPFRC reforzado con fibras de acero sólo muestra un comportamiento relativamente desfavorable. Debido al bajo contenido de poros conectados y a la mayor porosidad cerrada, el vapor no puede escapar, lo que resulta en un aumento de las tensiones internas en presencia de altas temperaturas.

2.3 Ventajas y aplicaciones

En base a las diferentes investigaciones, siempre que se tengan en cuenta los factores necesarios para distribuir homogéneamente las fibras, se han recopilado las siguientes ventajas del uso de este tipo de hormigón:

- La ventaja más importante es el aumento de la resistencia a la tracción y la mejora de la tenacidad. Las fibras contribuyen en resistir contra la propagación de fisuras con la ayuda de la transferencia de tensión desde la matriz a las fibras. Este material exhibe un comportamiento de endurecimiento por deformación después de la primera fisuración, así como una mejora en la capacidad de absorción de energía y tenacidad (Kang & Kim, 2011).

Además, esa capacidad de absorción de energía y el comportamiento único de endurecimiento por deformación con múltiples micro fisuras, contribuye a la resistencia a impactos o explosiones. Las propiedades mecánicas del hormigón están influenciadas por la tasa de deformación y la sensibilidad de esta depende de las condiciones de carga y la resistencia. Por lo tanto, es necesario revisar de manera integral los estudios que involucran el efecto de la tasa de deformación del UHPFRC (Yoo & Banthia, 2016).

- El refuerzo de fibra también mejora la resistencia a la fatiga, flexión y cortante y la ductilidad de los materiales cementosos (Boulekbache, et al., 2010).
- Se puede realizar la disminución de las secciones de hormigón, lo que significa una reducción del volumen total de entre el 60-75%. Si bien se utiliza 3 veces más cantidad de cemento que el hormigón tradicional, como mínimo el volumen total se reduce a un tercio por lo que se mantiene o reduce el volumen de cemento consumido. Esto junto con el empleo de subproductos industriales como

la ceniza volante o el humo de sílice, contribuyen en cierta medida a la sostenibilidad. Además, la reducción global de las necesidades de áridos es otro factor para tener en cuenta (López Martínez, 2012).

- La alta resistencia a la compresión del UHPFRC conduce a una reducción significativa del peso de las estructuras fabricadas con este material. En general, se puede alcanzar entre un tercio o la mitad del peso de las estructuras convencionales bajo la misma carga (Yoo & Banthia, 2016)
- La incorporación de fibras produce importantes beneficios como la capacidad portante residual. Estas mejoras dependen del tipo, contenido y orientación de las fibras, existiendo una fuerte relación entre el número de fibras en las superficies de fractura y los parámetros post pico (Zerbino, et al., 2012).
- Las fibras reducen la fisuración y la permeabilidad del hormigón (Boulekbache, et al., 2010).

Debido a sus numerosas ventajas, en la literatura se encuentran diversas aplicaciones como:

- Sustitución de estribos verticales por fibras de acero para proporcionar un refuerzo eficaz contra el fallo por cortante. Casanova ha demostrado que una cantidad del 1,25% de fibras de acero en volumen equivale mecánicamente al 1,1% de refuerzo de acero convencional (Boulekbache, et al., 2010).
- Uso en estructuras de placas delgadas, como plataformas de puentes, techos y paredes delgadas. Estas estructuras de placas delgadas están sujetas a estados de tensión multiaxiales, debido a su geometría y forma de carga compleja y exhiben características de campo de flujo diferentes a las de estructuras uniaxiales como vigas (Yoo, et al., 2015).

Las ventajas de este material dependen de sus propiedades mecánicas, las cuales están relacionadas a la orientación de las fibras. Se hace necesario profundizar en la influencia de la orientación debido a la oportunidad que representa el uso de este material.

Las ventajas del UHPFRC sólo serán viables si permiten minimizar el volumen de material utilizado. Las estructuras deberán ser muy esbeltas, próximas a las que se plantean con acero. Los costes de transporte y colocación se reducirán

notablemente y la vida útil se incrementará por su gran durabilidad. La Tabla 3 muestra una comparación relativa aproximada para valorar algunos de estos factores (Serna Ros, et al., 2012).

Tabla 3: Comparación relativa de diferentes factores entre el hormigón convencional y el UHPFRC (Serna Ros, et al., 2012)

Solución	Coste m³	Vol. usado	Tiempo de montaje	Coste transporte	Vida útil
H. Convencional	1	1	1	1	1
UHPFRC	8-10	0.2-0.5	0.2-0.5	0.3	4

2.4 Influencia de la orientación de las fibras en el hormigón

La distribución de las fibras, incluida la orientación de las fibras y la dispersión de las fibras, implica el grado en que las fibras están dispersas homogéneamente en el compuesto. Además, depende de la dirección del flujo, debido a la secuencia de hormigonado o la forma de la estructura (Kang, et al., 2011).

Aunque las fibras podrían distribuirse homogéneamente después del mezclado, los procesos de colocación y compactación pueden afectar significativamente su distribución y orientación y, en consecuencia, el rendimiento mecánico del material (Zerbino, et al., 2012). Según el proceso de hormigonado, las propiedades también son más sensibles a la forma y el tamaño del elemento construido que los del hormigón ordinario (Yoo & Banthia, 2016).

2.4.1. Orientación de las fibras

Existen diversas investigaciones sobre el efecto de la orientación de las fibras en las propiedades del hormigón, donde se incluyen aspectos como la colocación, la viscosidad del hormigón, la dirección del flujo, entre otros. A continuación se detallan una serie de investigaciones que analiza los factores que influyen en la orientación de las fibras para distintos tipos de hormigones.

2.4.1.1 Condiciones de entorno y flujo de hormigonado

Toutlemonde & Resplendio mencionan que los factores que influyen en la orientación de las fibras son los siguientes (Toutlemonde & Resplendio, 2011):

- Cualquier flujo potencial durante el hormigonado tiende a orientar las fibras en la dirección del flujo.
- La fibra próxima a la superficie tiende a orientarse paralela al encofrado o superficie libre (efecto pared). Este fenómeno sólo ocurre para distancias a la

superficie o pared menores o iguales a la longitud de la fibra. Tanto más influye en la resistencia a la tracción cuanto que el espesor de la estructura se aproxima al tamaño de la fibra.

Respecto al proceso de vertido, la elevada trabajabilidad del UHPFRC permite orientar las fibras en la dirección de avance del flujo. Así, una estrategia de vertido apropiada es aquella que incremente el factor de orientación de fibras y por tanto la resistencia a tracción (López Martínez, 2012).

2.4.1.2 Reología del hormigón

Los parámetros reológicos del material que fluye, particularmente la tensión de corte y el efecto de pared generado por la geometría del encofrado, son las mayores influencias en la orientación de las fibras dentro del hormigón fresco. Una investigación estudió el efecto de la reología o fluidez sobre la orientación de las fibras en tres mezclas: hormigón fluido ordinario (OC), hormigón autocompactante (SCC) y hormigón plástico de alto rendimiento (HSC). En la Figura 14, se puede observar este efecto significativo. En los hormigones ordinarios y autocompactantes con una tensión de corte baja, la distribución de las fibras es más homogénea (uniforme) y orientada en la dirección de las tensiones de tracción creadas por la flexión. Por el contrario, en hormigones de alta resistencia con una alta tensión de corte, la orientación es aleatoria o preferencial en función de las condiciones de entorno. Cuanto mejor fluye el hormigón, más se alinean las fibras (Boulekbache, et al., 2010).

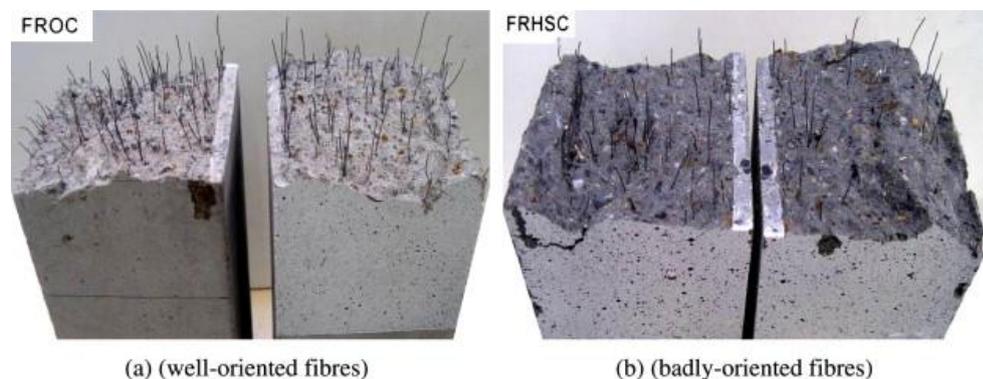


Figura 14: Distribución de fibra a través de un tramo (a) hormigón ordinario reforzado con fibras FROC, (b) hormigón de alta resistencia reforzado con fibras FRHSC (Boulekbache, et al., 2010).

Dicha investigación afirma que la resistencia a la flexión mejora significativamente cuando las fibras se orientan en la dirección de las tensiones

de tracción en estado fresco (hormigón con buena trabajabilidad). En el caso de hormigones con mala trabajabilidad, se produjo una menor orientación de las fibras que generó una pobre contribución al comportamiento de flexión de las probetas ensayadas, a pesar de la resistencia a la compresión relativamente mayor del material de hormigón ensayado (Boulekbache, et al., 2010).

2.4.1.3 Método de colocación y velocidad

Una investigación estudió los efectos del método de colocación (en capas acompañando el flujo de hormigonado o en posición fija en el centro) y la velocidad de hormigonado sobre el comportamiento a flexión de prismas uniaxiales con UHPFRC en posición horizontal. Al aumentar la velocidad, se reducía un patrón de flujo en forma de serpiente y se obtuvo una capa más delgada con una alineación preferida de las fibras en el eje del haz. Esto condujo a un mejor rendimiento a la flexión. Las vigas hormigonadas en el centro presentaron una resistencia a la flexión intermedia entre las vigas hormigonadas en capas usando una velocidad alta y baja al hormigonar (Wille, 2012).

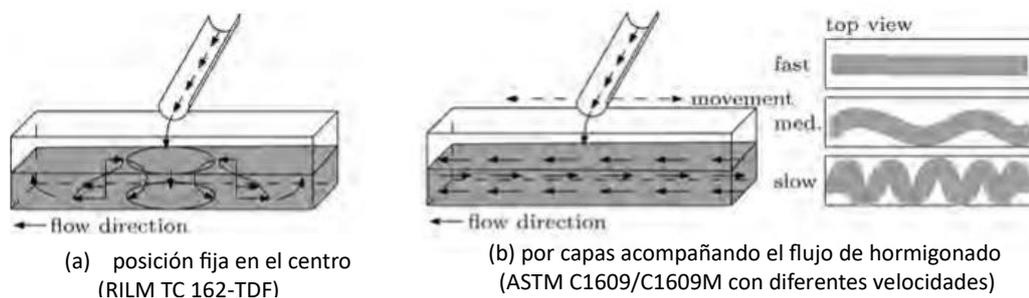


Figura 15: Fundición media y de capa y dirección de flujo correspondiente (Wille, 2012)

También concluyeron que se necesita una recomendación más específica sobre el método de colocación al utilizar FRC muy trabajables o autocompactantes, dada la variabilidad en los resultados entre vigas hormigonadas por capas a diferentes velocidades de vertido, así como entre vigas hormigonadas en capas versus las que fueron vertidas desde una posición fija en el centro (Wille, 2012).

2.4.1.4 El efecto de la orientación en las propiedades del hormigón para placas

Por un lado, una investigación analizó la orientación de las fibras en elementos estructurales delgados moldeados con hormigón autocompactante reforzado con

fibras (FR-SCC con 0.45% fibras del volumen) y sus efectos sobre las propiedades mecánicas residuales. Como parte del procedimiento, se elaboraron losas y muros divididas en sectores según las condiciones de flujo y borde y se recortó en especímenes en dirección longitudinal y transversal.

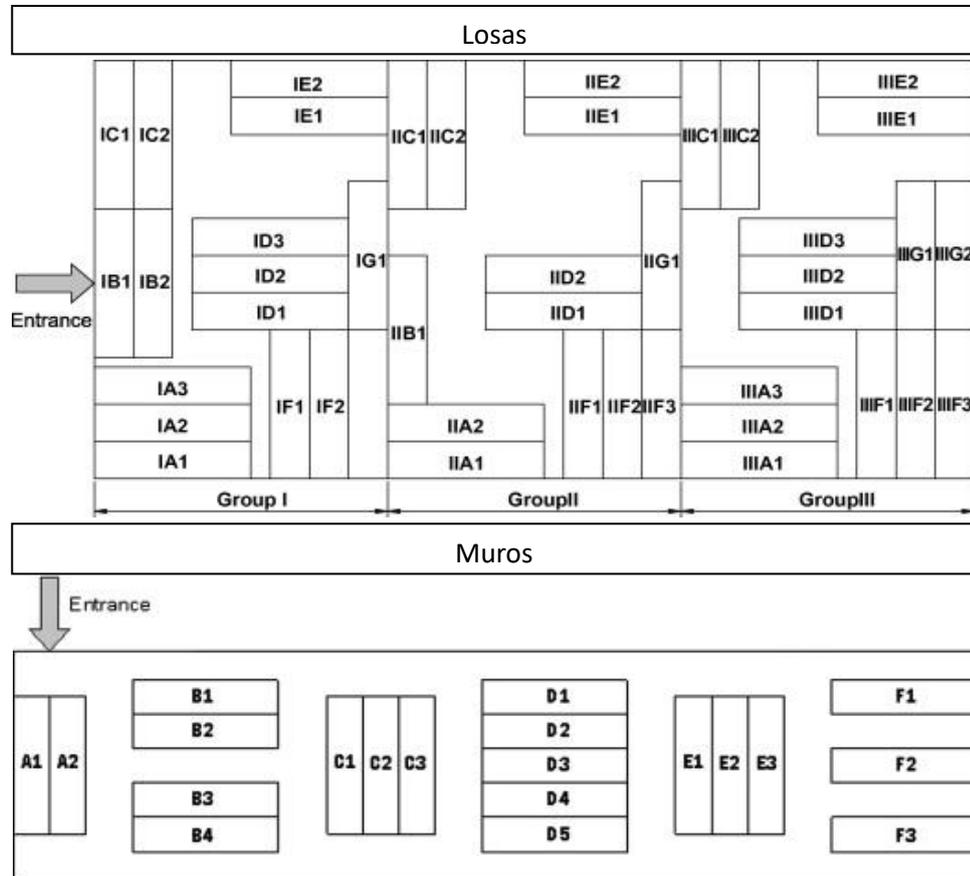


Figura 16: Esquema de la losa y de las probetas obtenidas. FR-SCC que incorpora fibras de acero (Zerbino, et al., 2012).

La orientación de las fibras varió con el caudal y con el efecto pared y se observó que el espesor de los elementos o la proximidad al fondo son variables importantes (Tabla 4). Se encontró una fuerte relación entre el número de fibras en las superficies de fractura y los parámetros post pico obtenidos en ensayos de flexión o de tensión uniaxial. Además, las conclusiones para el diseño con fibras de acero fueron (Zerbino, et al., 2012):

- En general, las vigas cortadas paralelas a la dirección del flujo del hormigón tenían una mejor capacidad de carga post fisuración a diferencia de las perpendiculares que mostraron los parámetros residuales más bajos.
- En losas, el Sector II tiene las mayores diferencias entre vigas paralelas y perpendiculares, así como el efecto pared. En el Sector III, el final del encofrado y las consiguientes reducciones del caudal favorecieron una menor

orientación de la armadura dando lugar a una respuesta mecánica más homogénea.

- En muros, el mejor comportamiento post fisuración se encontró en las vigas B y algunas D (D4, D5), todas ellas paralelas al flujo de hormigón. Las vigas C muestran un comportamiento post fisuración similar al del hormigón simple, con una capacidad despreciable para controlar la propagación de fisuras.
- El caudal y el efecto pared producen una marcada anisotropía y heterogeneidad en la distribución y orientación de las fibras que da lugar a cambios importantes en los parámetros post pico. Esta variación puede alcanzar un orden de magnitud, pasando incluso de un comportamiento de endurecimiento post fisuración a una respuesta con pobre capacidad residual. En elementos delgados de FR-SCC puede haber una fuerte variación en las propiedades residuales del material cuando se consideran diferentes zonas y direcciones.
- Las variaciones entre diferentes zonas y direcciones de un elemento estructural delgado pueden ser incluso mayores que las que aparecen entre hormigones elaborados con diferentes tipos y contenidos de fibra.

Tabla 4: Resumen de los resultados de la prueba de flexión

Element	Sector	Direction	Empty Cell	f_l (MPa)	f_m (MPa)	f_{r1} (MPa)	f_{r2} (MPa)	f_{r3} (MPa)	f_{r4} (MPa)	Density (fibres/cm ²)
S L A B	I	parallel to flow direction	Mean	5.6	7.7	4.7	6.9	7.5	7.2	1.2
			SD	0.3	1.7	1	1.6	2.1	1.9	0.23
	I	Perpendicular	Mean	5.2	5.9	2.8	3.2	3.2	3.3	0.74
			SD	0.5	1.6	1.8	3.1	2.9	3.1	0.53
	II	parallel to flow direction	Mean	5.6	8.4	5.2	7.8	8.3	8.1	1.59
			SD	1	1.6	0.9	1.5	1.6	1.3	0.37
	II	Perpendicular	Mean	5.1	5.1	1.7	1.7	1.8	1.8	0.53
			SD	0.5	0.5	0.7	0.9	1	1	0.21
	III	parallel to flow direction	Mean	5.3	6.4	3.6	5.4	5.9	5.6	1.03
			SD	0.3	1.2	0.8	1.6	1.6	1.5	0.22
	III	Perpendicular	Mean	5.6	6.3	3	4.4	5.1	5.3	1.08
			SD	0.9	1.6	1.2	2.1	2.4	2.5	0.35
W A L L	Horizontal	parallel to flow direction	Mean	5.6	7.7	4.7	6.9	7.5	7.2	1.2
			SD	0.3	1.7	1	1.6	2.1	1.9	0.23
	Vertical	-	Mean	5.2	5.9	2.8	3.2	3.2	3.3	0.74
			SD	0.5	1.6	1.8	3.1	2.9	3.1	0.53

Por otro lado, un estudio sobre hormigón autocompactante reforzado con fibras (0.5% en volumen) en losas y distintos tamaños de fibras (A1: L= 50 mm/ ϕ = 0.8 mm y A2: L= 33 mm/ ϕ = 0.6mm) también coincidió que los factores que afectan a la orientación de las fibras se destacan el efecto pared y la velocidad de flujo. También realizaron cortes paralelos y ortogonales al flujo en el elemento elaborado (Figura 17):

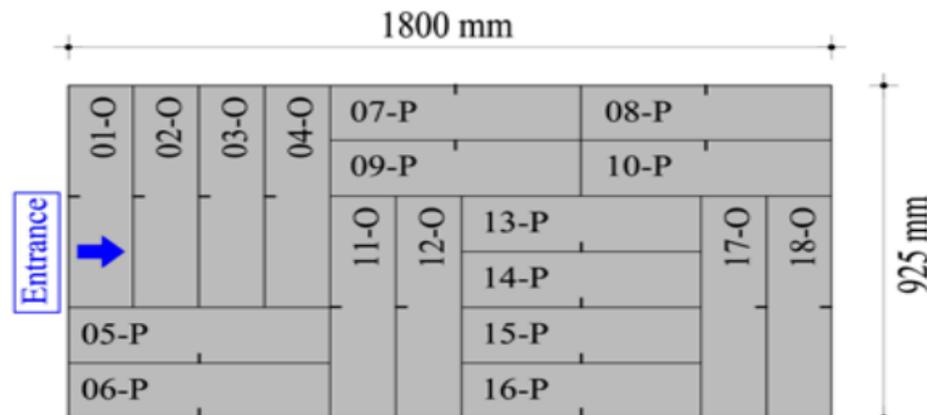


Figura 17: Vista e identificación de los prismas aserrados de las losas (Conforti, et al., 2018).

Las principales conclusiones obtenidas fueron (Conforti, et al., 2018):

Tabla 5: Comparación entre los valores promedio de la resistencia residual $f_{R,3}$ de las muestras (Conforti, et al., 2018)

PRISMAS	$f_{R,3}$ (MPa)	
	A1	A2
R - Referencia	6.03	4.13
	(0.2)	(0.15)
O - Ortogonal	2.81	2.76
	(0.47)	(0.36)
P - Paralelo	6.08	4.94
	(0.16)	(0.16)
Promedio (O,P)	4.62	3.97
	(0.43)	(0.35)
Valores relativos		
O/RS	0.47	0.67
P/RS	1.01	1.20
Promedio / RS	0.77	0.96

- Al igual que la otra investigación, las propiedades residuales son en promedio similares o ligeramente mayores en el caso de las probetas aserradas en dirección del flujo, pero mucho menores en la dirección ortogonal a este.

- Los prismas aserrados en dirección ortogonal tienen las mayores dispersiones y las tensiones residuales pueden disminuir casi al 50 % de las obtenidas en ensayos normalizados.
- Los cambios en las propiedades residuales se atribuyen directamente a las diferencias en la cantidad de fibras en el plano de fractura mediante el recuento de los filamentos en ambas caras de las superficies de fractura al finalizar los ensayos de flexión. Además, se destaca la variabilidad en densidad de fibras que existe entre los prismas a pesar de que fueron obtenidos de un mismo elemento estructural.
- Si bien en algunos casos la resistencia residual crece en comparación a la medida sobre prismas de referencia, en especial en dirección paralela al flujo, la capacidad residual en direcciones o sectores desfavorables puede reducirse en más del 50 %. Esto no puede ser ignorado si las condiciones de llenado presuponen efectos de orientación. Planificar en forma adecuada el método de colocación permite regular la magnitud de los efectos de flujo y pared sobre la orientación de las fibras que se dan especialmente en elementos delgados, por lo cual las diferencias en la capacidad residual pueden ser minimizadas o potenciadas en función de la aplicación a la cual estén destinados los elementos estructurales.

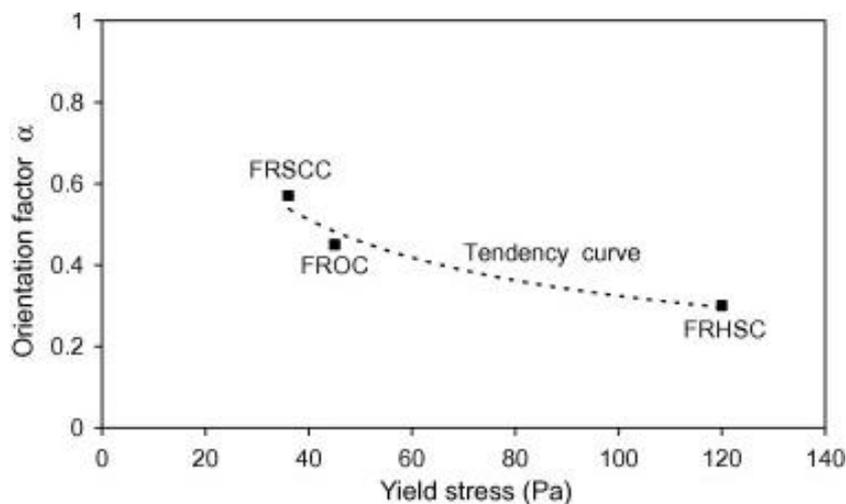


Figura 18: Factor de orientación en función del límite elástico (Boulekbache, et al., 2010).

Otro estudio analizó la orientación de las fibras en función de la reología del hormigón fluido ordinario y autocompactante (OC y SCC con tensión de corte de 45 y 36 Pa, respectivamente), mediante el coeficiente de orientación α en función

de la tensión de corte del hormigón. Las fibras tienen una orientación preferente con valores de 0.45 y 0.57 respectivamente para el coeficiente de orientación α y las fibras están uniformemente distribuidas, lo que permite un mayor nivel de fricción entre matriz y fibra. El hormigón de alta resistencia (alta tensión de corte = 120 Pa) tiene un coeficiente de orientación $\alpha = 0.30$, lo que significa que las fibras están agrupadas y dispersas en la estructura interna del hormigón y apenas se puede observar alguna orientación de las fibras (Boulekbache, et al., 2010).

Una investigación realizada con UHFRC (2% volumen), también analizó el efecto de la orientación de las fibras en elementos. La colocación fue en orientación paralela (PL) y transversal (TL) a la dirección de tracción. Los resultados mostraron una diferencia notable en el comportamiento a tracción:

Tabla 6: Resumen de resultados para UHPFRC recopilados de Kang & Kim (2011)

Evaluación	Resultado
Rendimiento	PL > TL
Tensión de tracción máxima	PL > 1.4(TL)
Primera tensión de fisuración	PL > 1.1(TL)
Coeficiente de orientación de la fibra (η_{θ})	PL > TL

Nota: η_{θ} está relacionado con el comportamiento previo a la fisuración y la resistencia al primer fisuración (Kang & Kim, 2011).

2.4.1.5 Fluides y flujo del FRC

El hormigón reforzado con fibras típico contiene agregados gruesos, que restringen hasta cierto punto el libre movimiento de rotación de las fibras en estado fresco. La baja fluidez también perturba el movimiento de rotación. Por lo tanto, la variación de la distribución de la orientación de las fibras está un poco limitada a lo largo del flujo de hormigón fresco.

Sin embargo, los compuestos cementosos reforzados con fibras de ultra alto rendimiento (UHPFRC), que no tienen agregados gruesos y están compuestos por partículas muy finas (menos de 0.5 mm de diámetro) con un 2% en volumen de fibras de acero (longitud 13 mm y diámetro 0.2 mm), exhibe homogeneidad y alta fluidez. Dadas estas propiedades, se debe considerar profundamente el movimiento rotacional de las fibras y la variación de la distribución de la

orientación de las fibras según el flujo de los compuestos frescos. La distribución de la orientación de las fibras inevitablemente tiene una influencia significativa en el comportamiento a tracción de los compuestos (Kwon, et al., 2012).

Boulekbache, Hamrat, Chemrouk, & Amziane analizaron la distribución y orientación de las fibras usando un modelo de fluido translúcido con tensión de corte (Carbopol 940) y confirmaron la capacidad de este método para flujo radial y de canal. Como parte de sus resultados, se demostró que la orientación y distribución dependen de la tensión de corte del material fluido. También realizaron la correlación de los datos recopilados sobre la reología y los resultados de las propiedades mecánicas de muestras de hormigón fluido ordinario, autocompactante y de alto rendimiento (0.5% de fibras de acero en forma de gancho de 35 mm de largo). El análisis reveló que la reología del hormigón tiene influencia importante en la orientación de las fibras.

El hormigón es una suspensión concentrada de partículas sólidas (agregados) en un líquido viscoso (pasta de cemento). Los materiales cementosos frescos, como muchos materiales, se comportan como un fluido con una tensión de corte, que es el esfuerzo mínimo necesario para iniciar el flujo. Si bien la viscosidad plástica puede estar asociada a la velocidad a la que fluirá un hormigón determinado una vez que el material comience a fluir, sólo influirá en el tiempo necesario para obtener una superficie horizontal. Sin embargo, la tensión de corte puede ser el valor más interesante en lo que respecta a la capacidad de llenado o paso y, por tanto, es el parámetro más importante para el relleno del encofrado. Esas propiedades afectan el hormigonado, que incluye transporte, bombeo, colocación y vibrado (Boulekbache, et al., 2010).

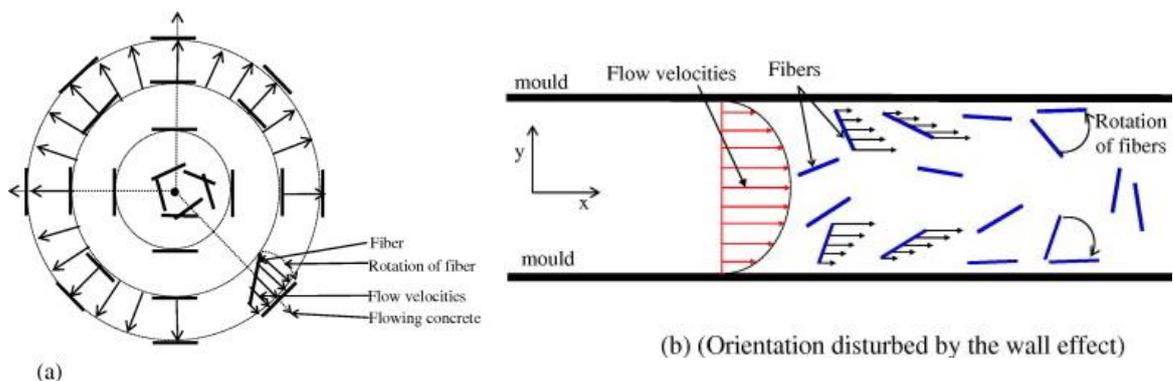


Figura 19: Explicación de la orientación de las fibras en (a) flujo de fuente, (b) flujo de canal (Boulekbache, et al., 2010).

Las fibras se alinean debido al perfil de velocidad del flujo, cuando el hormigón fluye a través de un molde, se desarrolla un perfil de flujo a partir de la restricción por fricción de las paredes. En el caso de un canal, la velocidad del flujo varía desde cero en las paredes hasta un máximo a lo largo de la línea central del canal (Figura 19). Diferentes velocidades afectan las fibras y pueden hacer que giren de tal manera que se reorienten perpendicularmente a la dirección del flujo. El fluido ejerce fuerzas hidrodinámicas sobre las fibras. En presencia de velocidades relativas de traslación y rotación, el fluido ejerce fuerzas y momentos sobre las fibras. El efecto es más fuerte a mayor velocidad de flujo o cuando la velocidad puede afectar a la fibra durante más tiempo (es decir, menor viscosidad o mayor duración del flujo) (Boulekbache, et al., 2010).

Otro estudio, realizado con UHPFRC, complementa lo anterior en referencia al flujo. Si la matriz de cemento tiene suficiente viscosidad para evitar el hundimiento de las fibras, la orientación está influenciada principalmente por las características del campo de flujo y las condiciones límite, como el efecto de pared. En el caso del flujo radial, la orientación de las fibras es perpendicular a la dirección del flujo y, en consecuencia, se obtiene una orientación radial de las fibras. Esta orientación específica de las fibras es causada por la variación en las velocidades del flujo; la velocidad disminuye con la distancia y, por lo tanto, las fibras inclinadas en la dirección radial giran mediante una fuerza de arrastre (Yoo, et al., 2015).

En un hormigón fluido, con tensión de corte menor, las fibras tienen una gran movilidad dentro de la matriz de cemento y pueden moverse y orientarse fácilmente bajo el efecto de una ligera vibración externa. En un hormigón rígido, con tensión de corte mayor, existe el riesgo de formación de bolas de fibras; esto limita el movimiento de las fibras e incluso puede bloquearlas. En este caso resulta imposible conseguir una distribución homogénea de las fibras. La consecuencia directa de esta anisotropía es la reducción del número de fibras que cruzan una sección determinada (Boulekbache, et al., 2010).

Kang & Kim plantean que describir la orientación de las fibras individuales es ineficaz porque el material contiene numerosas, por lo que el principal objetivo

es describir la distribución de la orientación de todas. Fue necesario introducir el concepto de función de distribución de orientación probabilística para describir completamente la distribución de la orientación de las fibras.

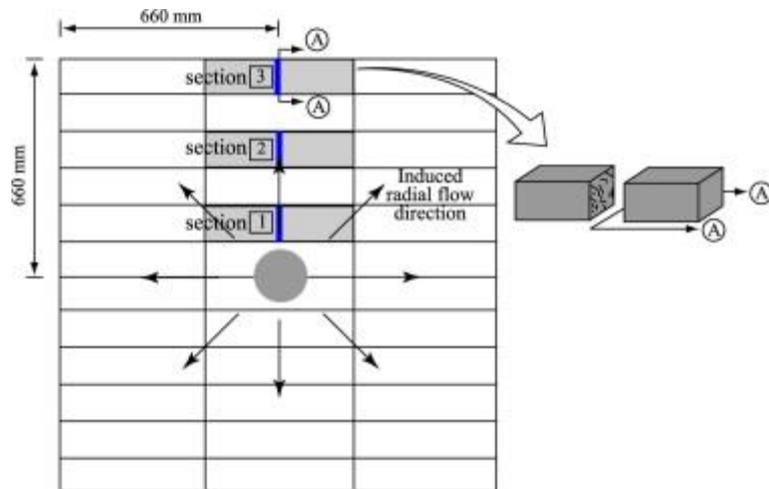


Figura 20: Inducción del flujo radial en la fabricación de placas UHPCC y muestras de flexión cortadas tomadas para obtener imágenes de la distribución de la orientación de las fibras (Kang & Kim, 2012).

El análisis en Compuestos Cementosos de Ultra Alto Rendimiento (UHPCC) demostró que las fibras se orientan gradualmente más perpendiculares a la dirección del flujo a medida que aumenta la distancia (Figura 20 y Figura 21) (Kang & Kim, 2012).

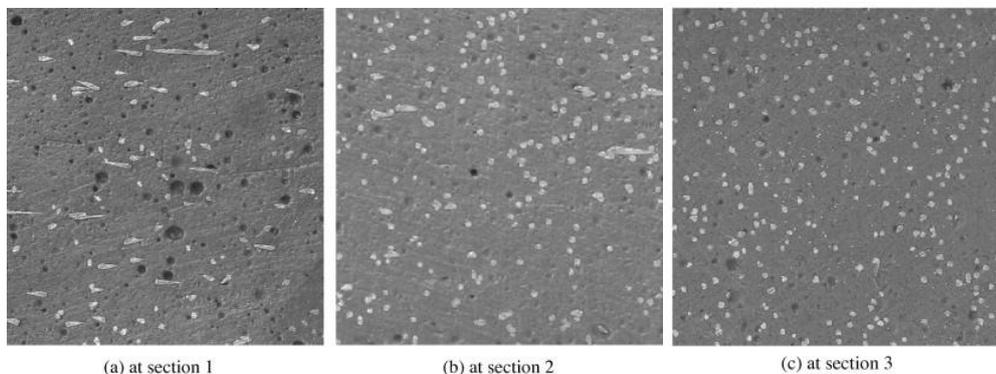


Figura 21: Comparación de la distribución de fibras a diferentes distancias de flujo en flujo radial con UHPCC (Kang & Kim, 2012).

2.4.1.5 Colocación del hormigón

Al fabricar elementos de UHPFRC, se suele hormigonar en una posición fija y se deja fluir debido a la alta fluidez del material. Por tanto, las características de distribución de la fibra dependen de la dirección y el tipo del flujo. Sin embargo, la mayoría de los estudios no han considerado las características del hormigonado ni la orientación de las fibras. Yoo, Zi, Kang, & Yoon investigaron el efecto del

método de colocación en UHPFRC mediante el uso de dos posiciones de vertido en especímenes circulares: la esquina y el centro (región de momento máximo).

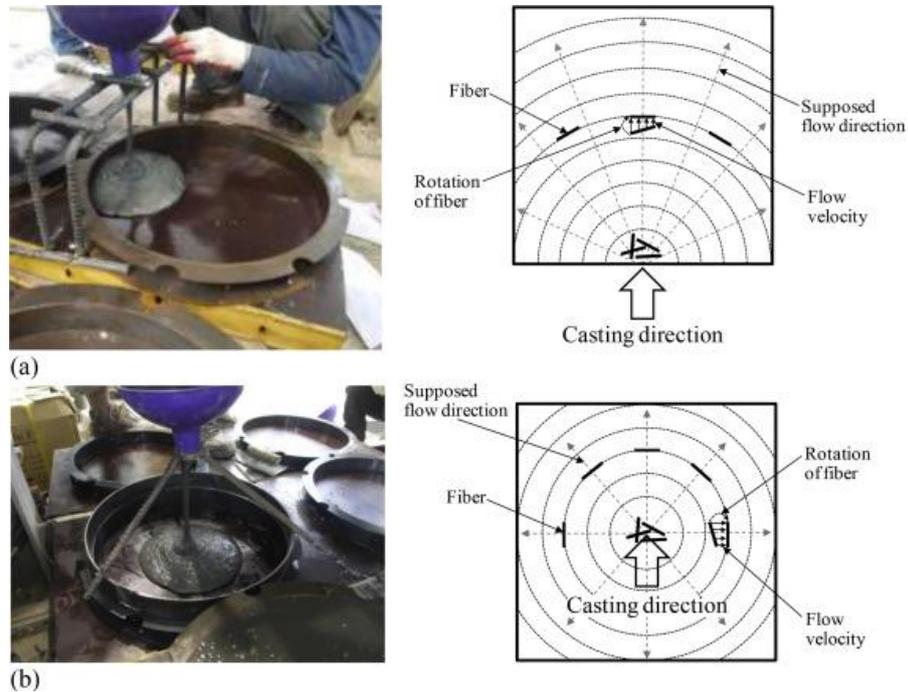


Figura 22: Métodos de colocación diferentes para paneles UHPFRC; (a) colocar hormigón en la esquina, (b) colocar hormigón en el centro (Yoo, et al., 2015).

Entre los principales resultados, se resumen en la Tabla 7:

Tabla 7: Resumen de las principales referencias recopiladas del estudio (Yoo, et al., 2015)

Evaluación	Colocación en el centro	Colocación en la esquina
Capacidad de carga para los comportamientos de flexión uniaxial	Mayor	Menor
Tenacidad (absorción de energía)	Mayor para ($l=16.3\text{mm}$)	Menor para ($l=19.5\text{mm}$)
Orientación y número de fibras	Mayor	Menor
Resistencia a flexión biaxial	Mayor	Menor
Modo de falla	falla por flexión y falla por punzonamiento	falla por punzonamiento
Fisuración y espaciamiento	Más fisuras y menor espaciamiento	Menos fisuras y mayor espaciamiento

En las muestras hormigonadas en el centro, el número de fibras detectadas en el plano de corte aumentó con la distancia del flujo desde la posición de colocación. Dado que la velocidad del flujo disminuye con la distancia, las fibras orientadas aleatoriamente giran perpendicularmente a la dirección del flujo por

el momento de rotación del gradiente de velocidad. Por tanto, la densidad de empaquetamiento y el coeficiente de orientación de la fibra aumentaron con la distancia desde el centro de la muestra y los valores más altos se obtuvieron cerca de la pared. Hubo una mayor cantidad de fibras cerca de la pared que aumentó con la distancia para todas las series de pruebas (Yoo, et al., 2015).

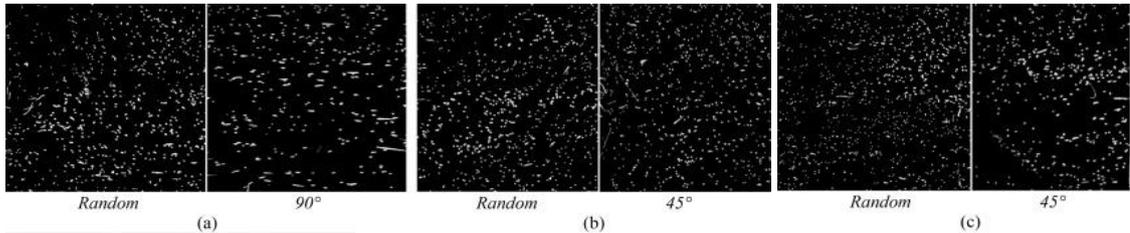


Figura 23: Imágenes del plano de corte en el anillo de carga (Izquierda: colocación en el centro, Derecha: colocación en la esquina); (a) S13 (aleatorio, 90°), (b) S16.3 (aleatorio, 45°), (c) S19.5 (aleatorio, 45°) (Yoo, et al., 2015).

Otro estudio, realizó este análisis en UHPFRC mediante la preparación de muestras colocando el material paralelo (PL) y transversal (TL) a la dirección longitudinal de la muestra (Figura 24). Para obtener imágenes digitales transversales, se cortó una muestra doblada en cuatro cubos. Cada cubo se dividió en cuatro placas pequeñas del mismo tamaño cortándolo transversal, horizontal y verticalmente (Figura 25). Tomaron fotografías de alta resolución en cada uno de los planos de corte para evaluar la orientación y dispersión de las fibras (Kang, et al., 2011)

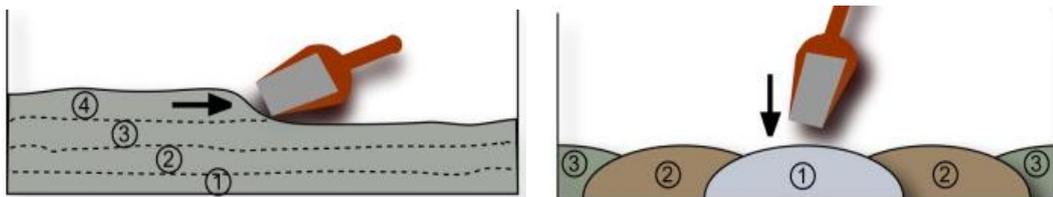


Figura 24: Colocación del hormigón en dirección paralela (PL) transversal a (TL) la dirección longitudinal de la muestra (izquierda y derecha respectivamente). El material se coloca en orden numérico (Kang, et al., 2011)

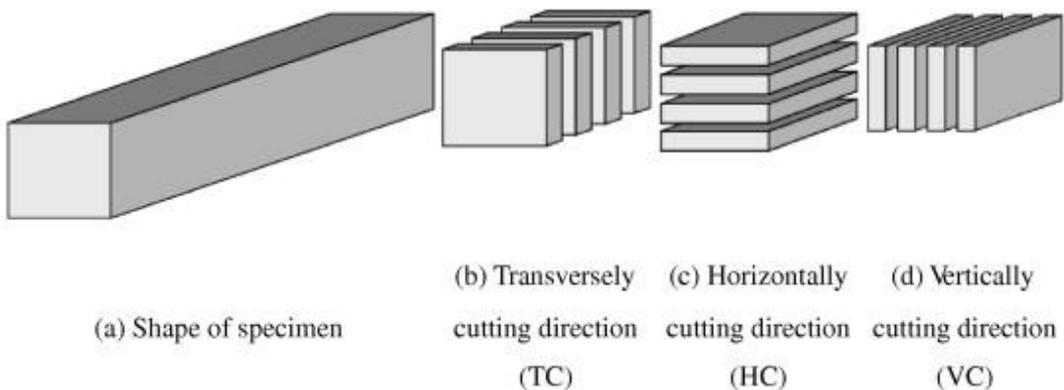


Figura 25: Tres direcciones de corte (Kang, et al., 2011)

Las muestras con hormigón colocado paralelo a la dirección longitudinal presentaron una resistencia inicial al fisuración y resistencia a la flexión un 5.5% y 61% respectivamente mayor que el colocado transversalmente.

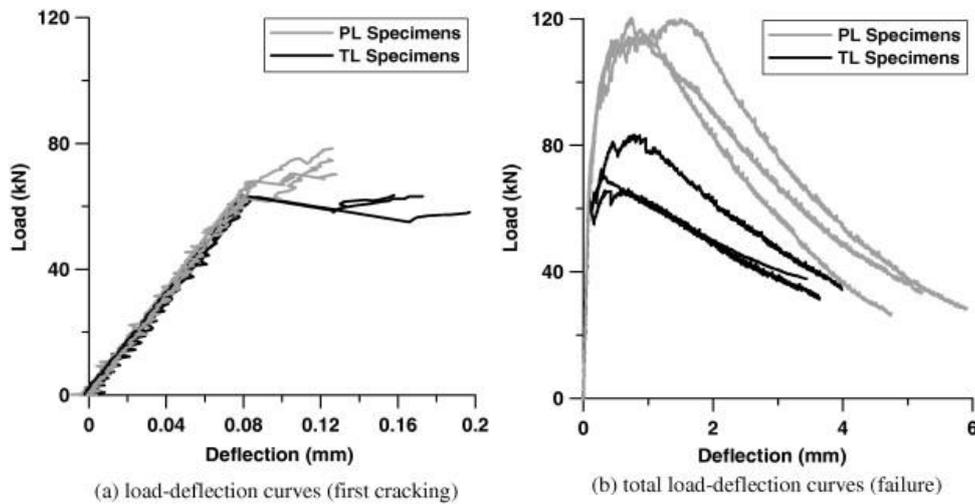


Figura 26: Resultados de las pruebas de flexión según la dirección de colocación (Kang, et al., 2011)

Se comparó la resistencia a la flexión prevista, suponiendo una distribución uniforme de las fibras, basada en un análisis de imágenes. Hubo una diferencia notable en la resistencia a la flexión entre los valores medidos y predichos cuando se asumió una distribución uniforme de las fibras. La suposición de uniformidad puede conducir a un error considerable al predecir la resistencia a flexión y, por ende, se debe tener en cuenta la dirección de colocación del hormigón reforzado con fibras.

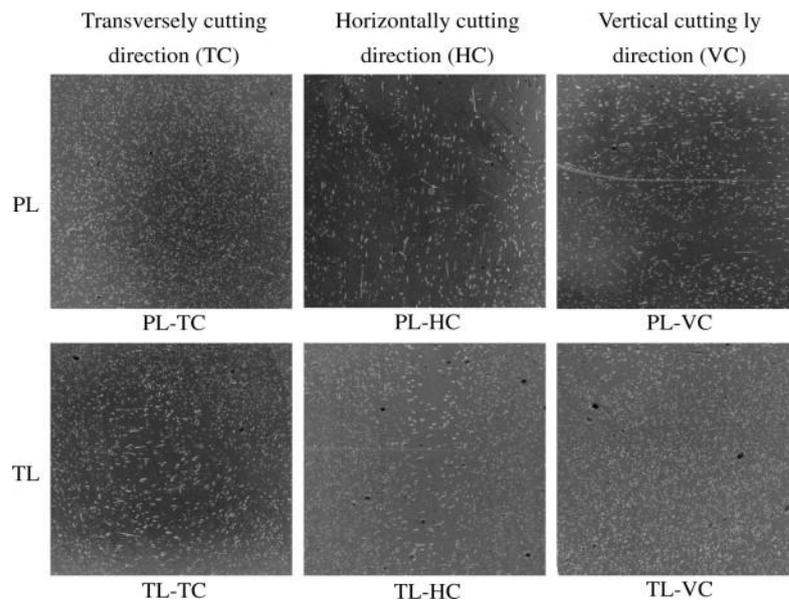


Figura 27: Imágenes de fibra mostradas con dirección de colocación y corte de muestra (Kang, et al., 2011).

En el caso del hormigón colocado paralelo a la dirección longitudinal de la muestra (PL), las fibras están más uniformemente dispersas en la sección

transversal cortada transversalmente (PL-TC) en comparación con los demás (PL-HC y PL-VC), como se muestra en la Figura 27. Además, la mayoría de las fibras en las muestras de PL-TC están alineadas más paralelas a la dirección normal del plano de corte, en relación con las otras muestras (Kang, et al., 2011).

Por otro lado, Yang et al. compararon vigas UHPFRC reforzadas con barras de acero fabricadas con dos métodos de colocación diferentes: (1) hormigonado en un extremo de los encofrados y permitir que fluya hacia el otro extremo y (2) hormigonado en el centro y permitir que fluya a ambos extremos. En los resultados, las vigas hormigonadas en un extremo proporcionaron la carga máxima de fisuración que fue aproximadamente un 15% mayor que cuando se hormigonó en el centro. Por tanto, la fluidez del UHPFRC hace que se orienten más fibras en la dirección longitudinal a la longitud de la viga (Yang, et al., 2010).

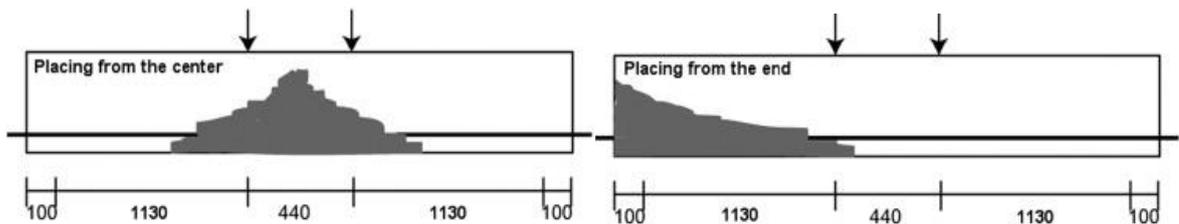


Figura 28: Procedimiento de colocación del UHPFRC.

2.4.2 Recomendaciones para una adecuada colocación y factor de orientación

Por tanto, la cuestión fundamental es conseguir controlar y asegurar la resistencia tras la fisuración en cualquier estructura. Esta resistencia depende de la orientación de las fibras que está relacionada con las condiciones de ejecución. A continuación, se recopilan algunas de las recomendaciones para la colocación del hormigón (Toutlemonde & Resplendio, 2011):

- Según el objetivo del elemento a construir, elaborar las piezas colocando UHPFRC directamente en su posición final, para evitar flujos.
- Si no es posible, se debe intentar compensar y/o dirigir el flujo en la dirección de las tensiones principales.
- En cualquier caso, para validar el proceso de implementación, es importante realizar sistemáticamente una prueba de idoneidad antes de la estructura real; es decir, crear una muestra representativa de la estructura real, realizada del

mismo material y con los mismos procedimientos propuestos para la ejecución. En ese elemento, se cortan varios prismas en la dirección de las fuerzas principales y se realizan ensayos de flexión para determinar la ley de comportamiento de tracción real en la estructura y corregir el resultado de la ley teórica de las muestras de laboratorio (el concepto del coeficiente corrector K) (Toutlemonde & Resplendio, 2011). El *fib* Model Code 2010 propone para el diseño estructural de elementos de HRF el uso de un factor que considere esta variable.

Algunos autores proponen el uso del coeficiente de orientación de la fibra (η_θ) para UHPFRC que depende de la longitud de la fibra, el efecto de la fricción en la interfaz entre la matriz y la fibra, etc. Cuando todas las fibras están alineadas paralelas a la dirección del esfuerzo de tracción $\eta_\theta = 1$ y, por el contrario, que todas las están alineadas perpendicularmente a la dirección de la tensión de tracción $\eta_\theta = 0$. Esto se deriva de la suposición de que no hay mejora en la resistencia cuando se alinean perpendicularmente a la dirección del esfuerzo de tracción, mientras que la resistencia de los compuestos se maximiza la alineación es paralela a la dirección del esfuerzo de tracción. En la Figura 29, se observa el comportamiento de tracción previo al fisuración y como la primera resistencia al fisuración mejoran a medida que aumenta el coeficiente de orientación de la fibra, limitada a aproximadamente el 10% (Kang & Kim, 2011).

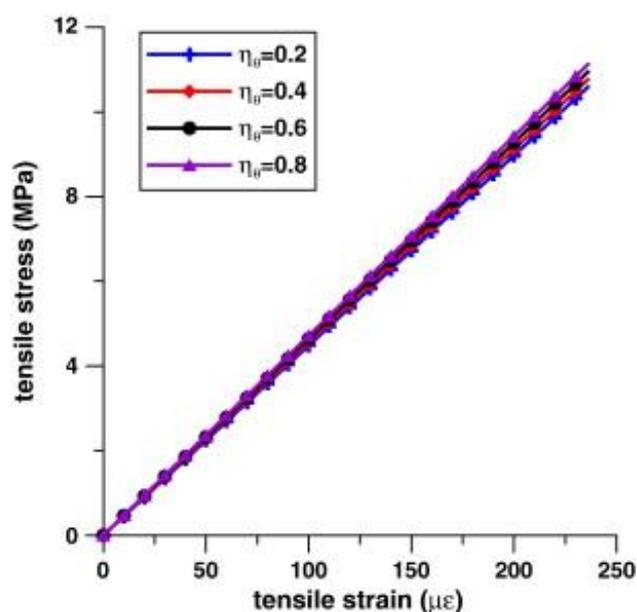


Figura 29: Comportamiento a la tracción según el coeficiente de orientación de la fibra antes de que se produzca el fisuración en UHPFRCC (Kang & Kim, 2011).

2.4.3 Factor de orientación de fibras

La norma francesa NF P 18-710 "Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC)" establece que la orientación de las fibras es un parámetro importante de la ley de diseño a tracción y se expresa mediante un conjunto de factores de orientación "K". Debe calcularse de acuerdo con el anexo F de la norma NF P18-470. Además:

- El factor de orientación K se establece sobre la base de pruebas en un modelo representativo de la estructura real, de acuerdo con el Anexo F de la norma NF P18-470.
- Para estudios preliminares o de diseño, y en ausencia de pruebas en un modelo que represente la estructura real, se proponen valores para el factor de orientación K en el anexo T:
 - Factor de orientación de fibras global K_{global} : 1.25
 - Factor de orientación de fibras local K_{local} : 1.75
- El factor de orientación K puede variar según las direcciones de esfuerzo y las partes de la estructura consideradas. En las diversas verificaciones que involucren este factor, su determinación debe relacionarse con la dirección perpendicular al plano de fisuración potencial en el mecanismo resistente considerado. En ausencia de una determinación experimental directa en esta dirección, se utilizará el máximo de los valores K determinados en las dos direcciones perpendiculares.
- La anisotropía y la falta de uniformidad espacial del comportamiento posterior a la fisuración inducida por la distribución y orientación de las fibras en la estructura deben tenerse en cuenta de manera conservadora, teniendo en cuenta la colocación del UHPFRC.

La norma suiza SIA 2055:2016 para compuestos cementicios con fibras de ultra alto rendimiento propone el uso de un coeficiente de conversión para tener en cuenta la influencia ejercida por el espesor del elemento (h_u) en la orientación de las fibras. La especificación del espesor del elemento se realizará teniendo en cuenta el proceso de fabricación. La Figura 30 contiene los datos que permiten determinar el coeficiente. Además, el anexo F de dicha norma define un método para determinar de manera no destructiva el contenido y la orientación de las

fibras de acero en una estructura basándose en la conductividad electromagnética de las fibras de acero.

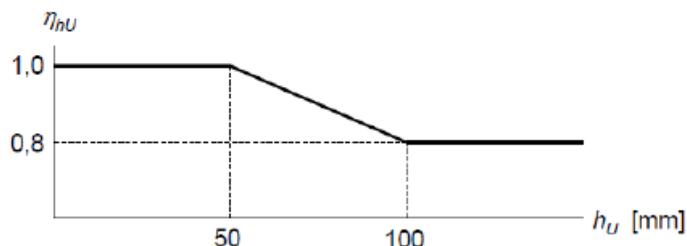


Figura 30: Coeficiente de conversión para tener en cuenta el espesor del elemento y el proceso de fabricación

La nueva guía austriaca de UHPC permite el diseño y la construcción de estructuras eficientes en material y duraderas hechas de UHPC tanto para edificios nuevos como para medidas de rehabilitación. La orientación local de las fibras es un parámetro decisivo que influye en la resistencia a tracción posterior a la fisuración del UHPC y debe considerarse al calcular el valor característico de esta resistencia local posterior a la fisuración. La guía ofrece dos métodos para determinar la orientación local de las fibras (Fehling, et al., 2024):

(i) un procedimiento de predicción teórica que considera la trabajabilidad, el contenido de fibras, la relación entre la longitud de las fibras y el ancho del encofrado, el flujo del concreto durante el vertido. Este método, muy simple pero bastante tosco, consiste en tomar valores conservadores de la Tabla 8

Tabla 8: Valores de orientación de fibras de acuerdo con la Figura 31 (Fehling, et al., 2024)

	Thickness t [mm]	η_1	η_2	η_3
Beams and panels	30	0.63	0.42	0.28
	60	0.58	0.42	0.32
	200	0.53	0.45	0.36
Slabs / plates	30	0.55	0.55	0.28
	60	0.53	0.53	0.32
	200	0.51	0.51	0.36
Columns and pillars	30	0.55	0.42	0.28
	60	0.53	0.42	0.32
	200	0.51	0.45	0.36
Standing profiles	30	0.55	0.42	0.28
	60	0.53	0.42	0.32
	200	0.51	0.45	0.36
Lying profiles	30	0.67	0.42	0.28
	60	0.62	0.42	0.32
	200	0.56	0.45	0.36

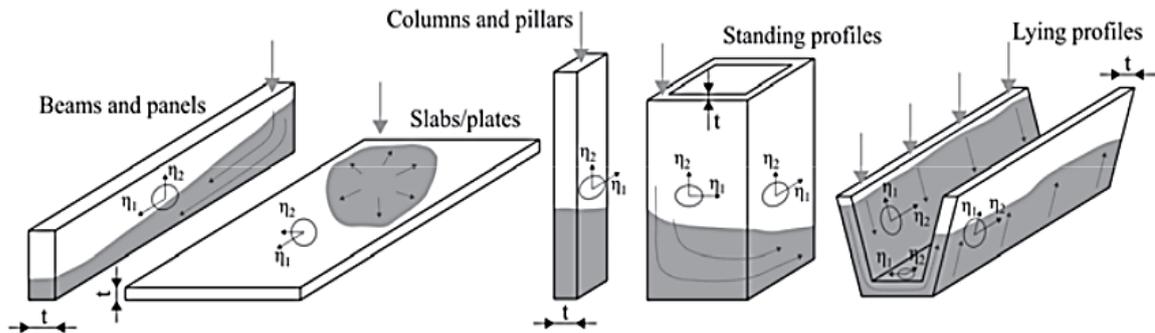


Figura 31: Elementos estructurales típicos, su método de hormigonado y las correspondientes direcciones principales (Fehling, et al., 2024)

La guía indica que se debe tener en cuenta que cada triple de valores en una línea de la tabla 1 no representa un estado consistente de orientación de las fibras, sino límites inferiores de los coeficientes de orientación de las fibras para cada dirección principal.

(ii) un método de medición no destructivo. Factores específicos de seguridad parciales cubren la incertidumbre del método utilizado.

Si la dirección de interés no coincide con una de las direcciones principales, se puede calcular el coeficiente con expresiones dadas por la norma. Para asegurar una distribución homogénea de las fibras y la orientación utilizada en los cálculos de diseño, se debe verificar experimentalmente una nueva relación especificada entre el asentamiento y el tiempo de flujo (Fehling, et al., 2024). Sin embargo, la fuente no especifica el método de obtención de los valores de la Tabla 8.

Si bien ambas propuestas permiten determinar o considerar un coeficiente de orientación de fibras, es importante tener en cuenta que dicho factor es empleado en expresiones de cálculo específicas correspondientes a su normativa.

III. PROGRAMA EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

3.1 Programa experimental

Como se mencionó anteriormente, el diseño de hormigón reforzado con fibras se basa en una hipótesis que estipula que las fibras están distribuidas homogénea y aleatoriamente dentro del material, pero eso no supone que no haya una cierta tendencia a orientación preferencial. Esto influirá en la isotropía en el comportamiento de la estructura, por lo que es importante conocer la orientación de las fibras al usar este tipo de hormigón.

La mayoría de las investigaciones que estudian el efecto de la orientación de las fibras tienen en común que la colocación del hormigón se realizó en una esquina para luego dejarlo fluir. Pocas consideraron que la distribución real de las fibras es afectada por diversos factores como el método de colocación. En la realidad, el procedimiento de hormigonado puede ser distinto a lo descrito anteriormente y suele variar según las condiciones del entorno, tiempos y programación, entre otros. Muchos casos consideran, por ejemplo: hormigonar en una posición fija en el centro o con una posición variable en capas o acompañando el flujo de hormigón.

Por tanto, se planteó un programa experimental que tiene como objetivo determinar la influencia de las condiciones de ejecución, a través de distintos métodos de vertido, en la orientación de las fibras para el análisis de las propiedades mecánicas según la dirección del elemento de hormigón. Se evaluaron dos tipos de elementos de UHPFRC (vigas y losas) para estudiar la diferencia de las propiedades mecánicas en elementos que trabajan a una y dos direcciones.

Las vigas se estudiaron en las posiciones horizontal y vertical. En horizontal fueron hormigonadas desde un punto fijo en un extremo, desde un punto fijo en el centro y variando el punto de vertido acompañando al avance de hormigón. Las verticales se hormigonaron controlando tres niveles de velocidad (alta, media y baja).

En las losas se analizaron tres condiciones de vertido: en la esquina, en el centro y variando el punto de vertido que acompañe al avance de hormigón. Se obtuvieron elementos prismáticos de las losas por corte para evaluar el efecto de la orientación de las fibras en dirección longitudinal y transversal.

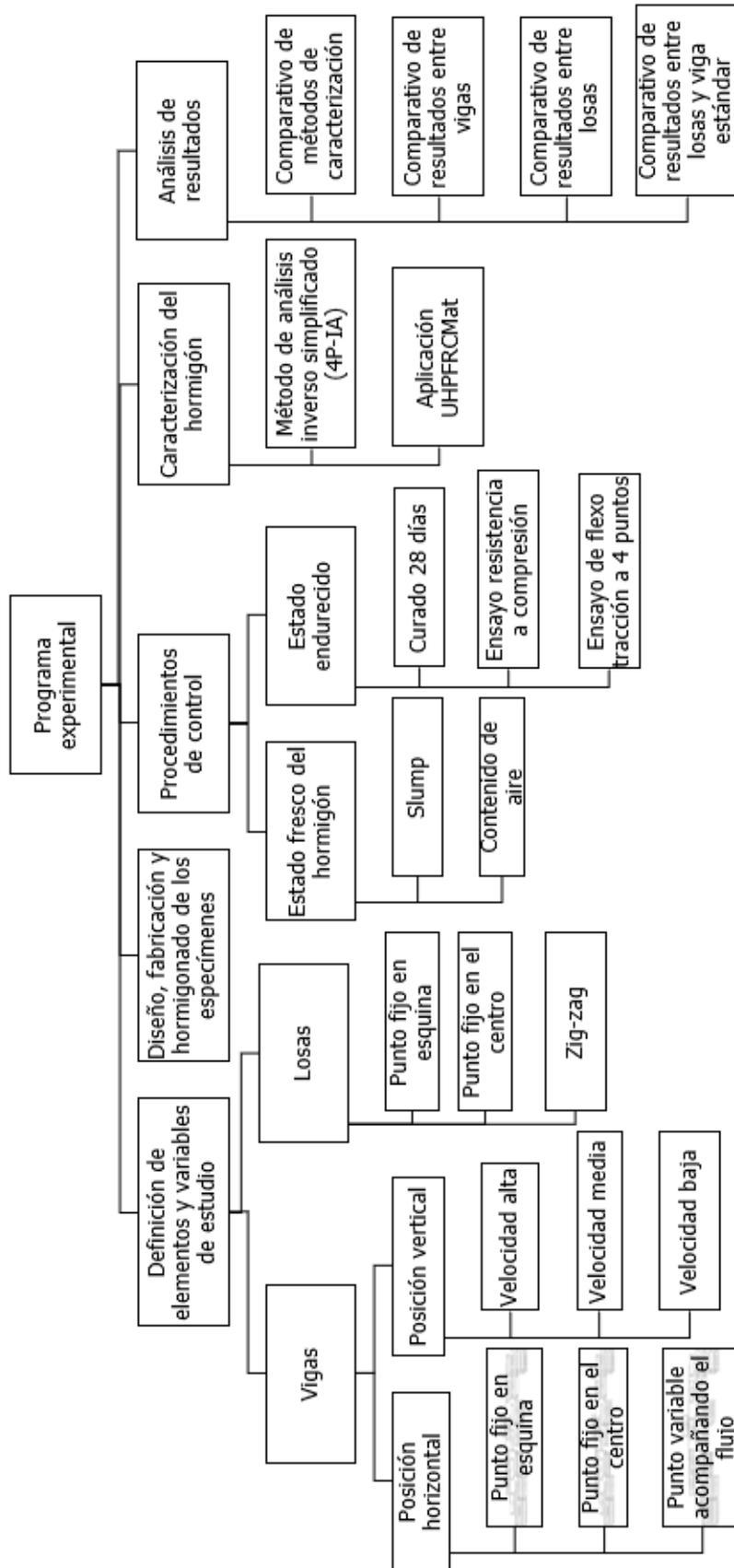


Figura 32: Esquema del programa experimental

a. Definición de elementos y variables de estudio:

Se buscaba analizar la diferencia de las propiedades mecánicas en elementos que trabajan a una y dos direcciones, por lo que se elaboraron vigas y losas. La Tabla 9 resume las variables de hormigonado, dimensiones y cantidad de probetas:

Tabla 9: Resumen de elementos a estudiar

Elemento	Posición	Dimensiones (cm)	Hormigonado	Cantidad
Viga	Horizontal	10x10x50	Punto fijo en esquina	3
Viga	Horizontal	10x10x50	Punto fijo en el centro	3
Viga	Horizontal	10x10x50	Punto variable acompañando el flujo de hormigón (referencia)	3
Viga	Horizontal	15x15x60	Punto fijo en esquina	3
Viga	Horizontal	15x15x60	Punto fijo en el centro	3
Viga	Horizontal	15x15x60	Punto variable acompañando el flujo de hormigón (referencia)	3
Viga	Vertical	10x10x50	Velocidad baja	3
Viga	Vertical	10x10x50	Velocidad media	3
Viga	Vertical	10x10x50	Velocidad alta	3
Viga	Vertical	15x15x60	Velocidad baja	3
Viga	Vertical	15x15x60	Velocidad media	3
Viga	Vertical	15x15x60	Velocidad alta	3
Losa	Horizontal	100x5x100	Punto fijo en esquina	1
Losa	Horizontal	100x5x100	Punto fijo en el centro	1
Losa	Horizontal	100x5x100	Zigzag acompañando el flujo de hormigón	1

El detalle de cada elemento hormigonado y el objetivo de su fabricación se explican a continuación:

- **Vigas:**

Se tomó como referencia las dimensiones de las probetas que se suelen ensayar para caracterizar el comportamiento del material de acuerdo con el estándar normativo: 100x100x500mm usados en ensayos 4PBT (UNE 83529) que pueden representar dimensiones próximas a las empleadas en elementos estructurales fabricados con UHPFRC y 150x150x600mm como standard para el 3PBT.

- **En horizontal:**

Para evaluar el efecto de los puntos de vertido, se emplearon muestras en posición horizontal, cuyos métodos de colocación fueron: hormigonado con punto de vertido fijo en un extremo (EP), con punto de vertido fijo en el centro (CP) y con punto de vertido avanzando a lo largo de la probeta y acompañando al avance del hormigón (RP).

Tabla 10: Detalle de vigas en posición horizontal

Elemento	Dimensiones (cm)	Colocación de referencia (RP)	Colocación esquina (EP)	Colocación central (CP)
Viga	10x10x50	3	3	3
Viga	15x15x60	3	3	3

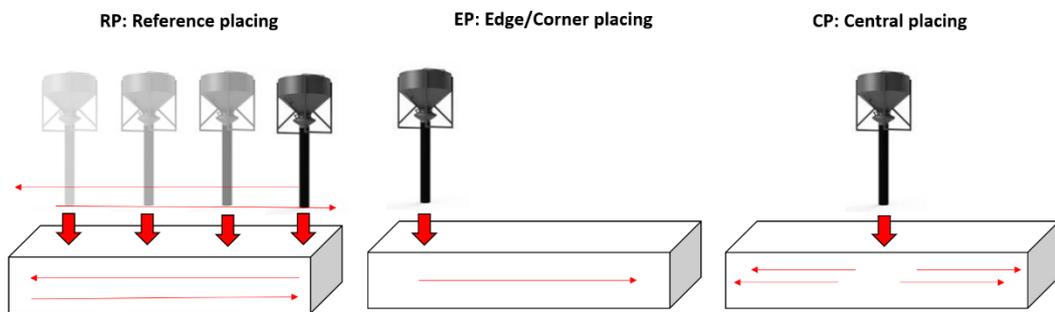


Figura 33: Condiciones de vertido en elementos horizontales - vigas

- **En vertical:**

Para estudiar la influencia de la velocidad de vertido y del efecto de la relación altura / ancho del elemento, los elementos se colocaron en posición vertical, cuyas variables fueron: velocidad alta, media y baja.

Tabla 11: Detalle de las vigas en posición vertical

Elemento	Dimensiones (cm)	Velocidad alta (HV)	Velocidad media (MV)	Velocidad baja (LV)
Viga	10x10x50	3	3	3
Viga	15x15x60	3	3	3

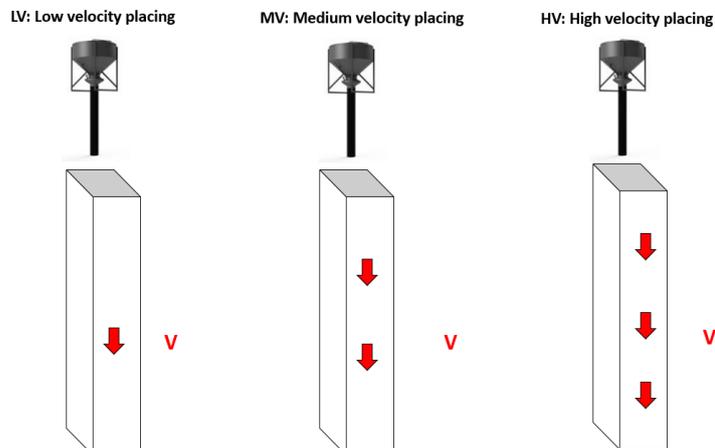


Figura 34: Condiciones de vertido en elementos verticales.

- **Losas:**

En el capítulo III del Estado del Arte, se mencionó que el uso de este material es recomendable cuando el volumen y/o espesores de los elementos son reducidos, por lo que se ensayaron losas cuadradas de 1 m de lado y 5 cm de espesor. Tal como las vigas, se estudiaron 3 condiciones de vertido: hormigonado fijo desde una esquina, fijo en el centro de la losa y desde un lado con el punto de vertido avanzando en zigzag y acompañando al avance del hormigón.

Tabla 12: Detalle de losas

Elemento	Dimensiones (cm)	Colocación en zigzag (ZP)	Colocación esquina (EP)	Colocación central (CP)
Losa	100x5x100	1	1	1

ZP: Zig-zag placing

EP: Edge/Corner placing

CP: Central placing

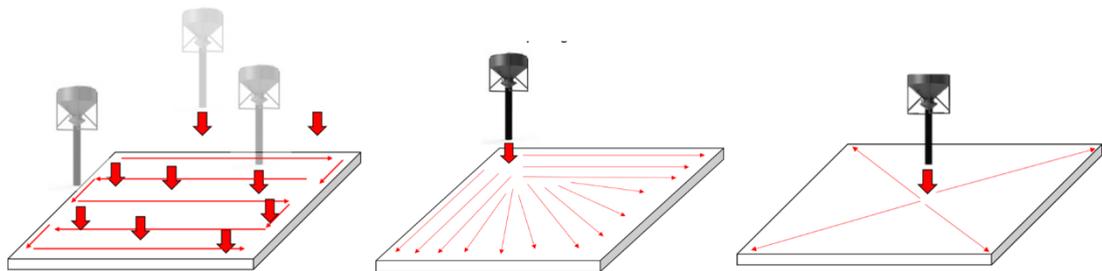


Figura 35: Condiciones de vertido en elementos horizontales - losas

Este tipo de elementos trabaja en dos direcciones, por lo que se evaluó el efecto de la orientación obteniendo probetas mediante la realización de cortes en la losa en dirección longitudinal y transversal (Figura 36).

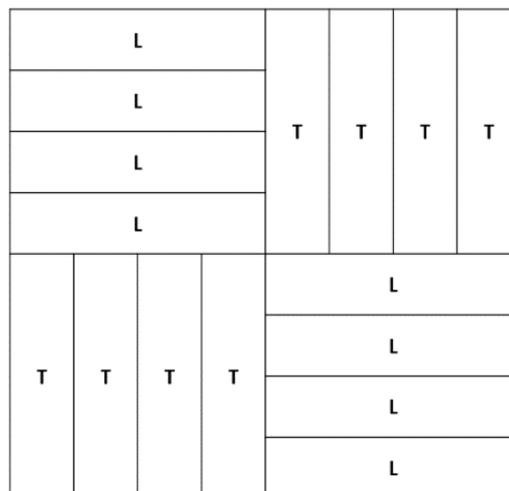


Figura 36: Esquema de cortes realizados por cada losa

Por tanto, las muestras a ensayar a flexo tracción presentaron las siguientes dimensiones:

Tabla 13: Cantidad de muestras extraídas de las losas según el modo de colocación

Elemento	Sentido	Dimensiones (cm)	Colocación en zigzag (ZP)	Colocación esquina (EP)	Colocación central (CP)
Losa	Longitudinal (L)	10x5x50	8	8	8
Losa	Trasversal (T)	10x5x50	8	8	8

b. Diseño, fabricación y hormigonado de los especímenes:

Con las variables de estudio definidas, se programaron 3 días de hormigonado en función de las dimensiones de los especímenes: 10x10x50 cm, 15x15x60 cm y 100x5x100 cm

c. Control del hormigón:

Se planearon ensayos en estado fresco y endurecido como parte del control:

- Ensayos en estado fresco:
 - Extensión diametral o escurrimiento
 - Contenido de aire
- Para el curado, las probetas se sometieron a curado en cámara húmeda por 28 días
- Ensayos en estado endurecido:
 - Resistencia a compresión
 - Ensayos a flexo tracción a 4 puntos

Aunque en los ensayos de tracción el comportamiento a tracción se obtiene directamente, su configuración experimental es complicada y requiere una preparación específica para la alineación y el agarre de la muestra, lo que frecuentemente conduce a resultados inexactos. Los ensayos de flexión entallada en tres puntos no se consideraron para materiales con endurecimiento por deformación, debido a la sobreestimación de las propiedades de tracción como consecuencia de su fase de multi micro fisura (Mezquida Alcaraz, et al., 2021).

En todos los elementos estudiados se realizó el ensayo de flexión de cuatro puntos (4PBT), debido a que brinda un área grande con un momento de flexión relativamente constante. Por lo tanto, el proceso de micro fisuración que caracteriza a este hormigón en su parte de endurecimiento queda libre para desarrollarse.

d. Caracterización del hormigón:

Para ello, era necesario obtener la curva experimental tensión vs flecha mediante el ensayo a flexo tracción a 4 puntos (PNE 83519) de cada espécimen.

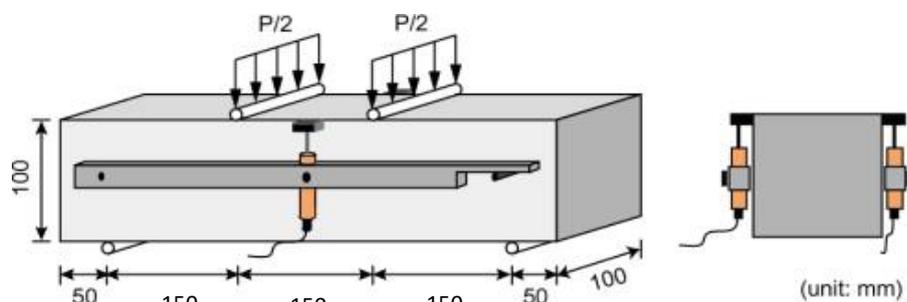


Figura 37: Esquema teórico del ensayo (Kang, et al., 2011)

Para determinar los parámetros constitutivos de tracción se utilizó dos métodos cuyo principio y uso se detalla en el capítulo III del Estado del Arte. Los métodos empleados fueron:

- Análisis inverso simplificado propuesto en la norma UNE 83519.

Al obtener la curva experimental mediante el ensayo de flexo tracción, se extrajeron los parámetros de acuerdo con las expresiones de la Tabla 1. Con esto, se pudo graficar la ley constitutiva a tracción de la muestra ensayada, tal como se observa en la Figura 38:

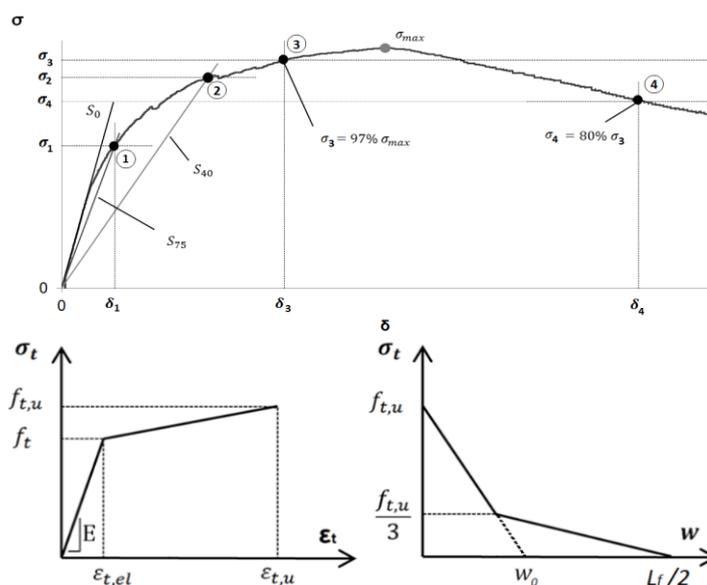


Figura 38: Resultado experimental tipo y proceso de obtención de los puntos característicos

- Aplicación predictiva UHPFRCMat desarrollada en la UPV (Cáceres Vergara, et al., 2024):

El objetivo fue encontrar una forma de determinar los parámetros constitutivos de tracción en aquellos casos en los que las muestras de estudio no cumplían con los requisitos normativos de UNE 83519 para hacer uso de las expresiones indicadas, y que por tanto no podían evaluarse con esa norma.

En el capítulo III del Estado del Arte se detalló acerca de esta aplicación desarrollada. Esta aplicación determina directamente los parámetros constitutivos de tracción al introducir la curva experimental σ - δ de 4PBT.

Las probetas con dimensiones standard se analizaron por los dos métodos para verificar la equivalencia entre ambos.

e. Análisis de resultados:

Con los resultados obtenidos, se procedió a analizar la relación de los métodos de colocación en la orientación de las fibras según el tipo de elemento de estudio y su influencia en las propiedades mecánicas del hormigón. Finalmente, se delimitaron las principales conclusiones.

Esta investigación está limitada al uso de UHPFRC para una determinada fluidez, por lo que la variación de esta propiedad puede generar otro tipo de resultados en cuanto a la orientación de las fibras.

3.2 Materiales

3.2.1 Cemento

Se empleó el cemento CEM I, 42.5 R-SR, el cual posee resistencia a sulfatos que se emplea en hormigones armados o pretensados, hormigones de altas resistencias (iniciales y finales). Además, se usa en ambientes químicamente agresivos o cuando se requiera una especial durabilidad frente a la agresividad de sulfatos o de agua de mar. La norma UNE-EN 197-1 especifica sus límites.

3.2.2 Agua

Se empleó agua potable procedente de la red de distribución de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

3.2.3 Agregados

Se empleó arena media de 1.6 mm y arena fina de 0.4 mm. También se utilizó la harina de cuarzo U-S500 un producto fabricado por la compañía Sibelco. Las propiedades granulométricas se detallan a continuación:

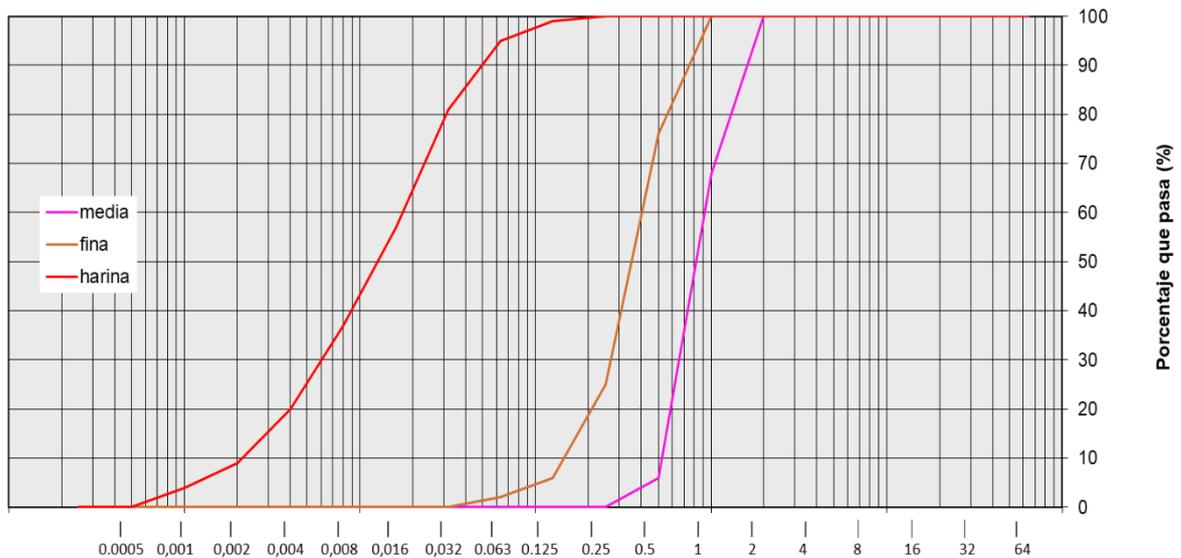


Figura 39: Granulometría de la arenas fina y media empleadas

3.2.4 Superplastificante

Para garantizar la fluidez adecuada en este tipo de hormigón, se empleó un aditivo superplastificante Viscocrete 20 HE de Sika. Este aditivo es empleado para confección de hormigones de altas resistencias iniciales, hormigones con gran necesidad de reducción de agua y de muy alta fluidez. Los límites son especificados por la norma UNE-EN-934-2.

3.2.5 Humo de sílice

Es un subproducto de la fabricación de silicio elemental (Si) y aleaciones ferro silíceas en hornos de arco eléctrico. Producto formado entre 95-98% de sílice amorfa, con diámetro medio 1µm.

Este material se usa para mejorar las resistencias del hormigón a corto plazo. Se empleó humo de sílice Elkem Microsilica

3.2.5 Fibras

Se emplearon las fibras metálicas de alta resistencia DRAMIX OL de 13 mm de longitud y 0,2 mm de diámetro de Bekaert.

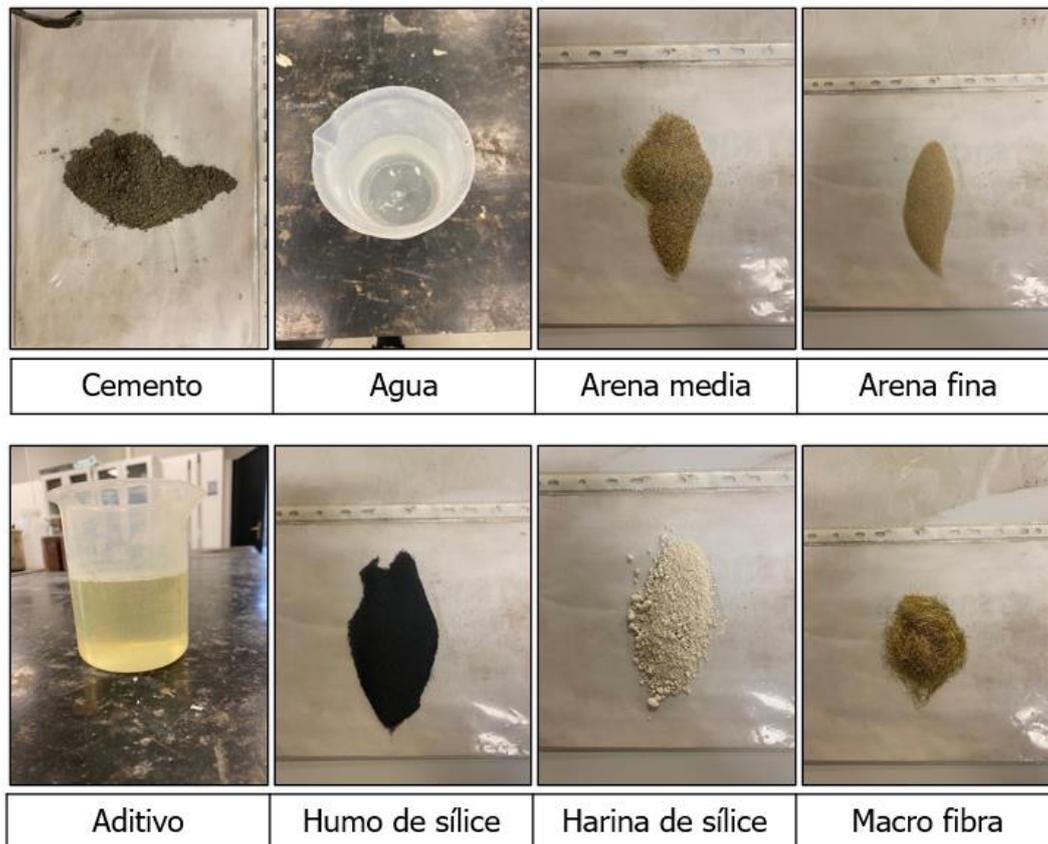


Figura 40: Materiales empleados para la elaboración de hormigón

3.3 Metodología

La producción de hormigón fue realizada en tres etapas debido al gran volumen de producción que suponía. El proceso se detalla a continuación:

3.3.1 Dosificación y amasado

La dosificación se definió con referencia a estudios y/o proyectos elaborados con UHFRC, por lo que se utilizó lo siguiente:

Tabla 14: Dosificación para 1 m³

Material	Cantidad (kg)
Arena media 0/1.6	560
Arena fina 0/0.4	300
Harina de sílice	225
Humo de sílice	175
Cemento I42.5R/SR	800
Agua	160
Fibra OL	160
Viscocrete 20 HE	30

El amasado era realizado hasta lograr una pasta homogénea entre todos los materiales y la fluidez requerida. Para ello, se empleó una mezcladora planetaria P375T08 con capacidad de 560 L.

Los materiales fueron incorporados en el mismo orden en el que se detalla en la Tabla 14. Se colocaron los materiales secos de mayor granulometría al inicio para evitar que el cemento se pegue en la base.



Figura 41: Amasadora empleada para la fabricación de hormigón

Para obtener una mezcla homogénea, se empleó una rejilla y un vibrador al colocar las fibras en la mezcladora para facilitar que estas se separen (Figura 40).



Figura 42: Colocación de las fibras en la mezcladora.

3.3.2 Hormigonado

Se consideró los diferentes elementos a estudiar y las diferentes condiciones de colocación detalladas en el apartado del programa experimental. Para el proceso de hormigonado, se realizó en 3 etapas o amasadas en el siguiente orden:

- Amasada 1: elementos de 15x15x60 cm
- Amasada 2: elementos de 10x10x50 cm
- Amasada 3: losas de 100x5x100 cm

La Figura 43 muestra una referencia de los tipos de hormigonado para vigas, en este caso, de 15x15x60 cm. Esto mismo se realizó para las probetas de 10x10x50cm.

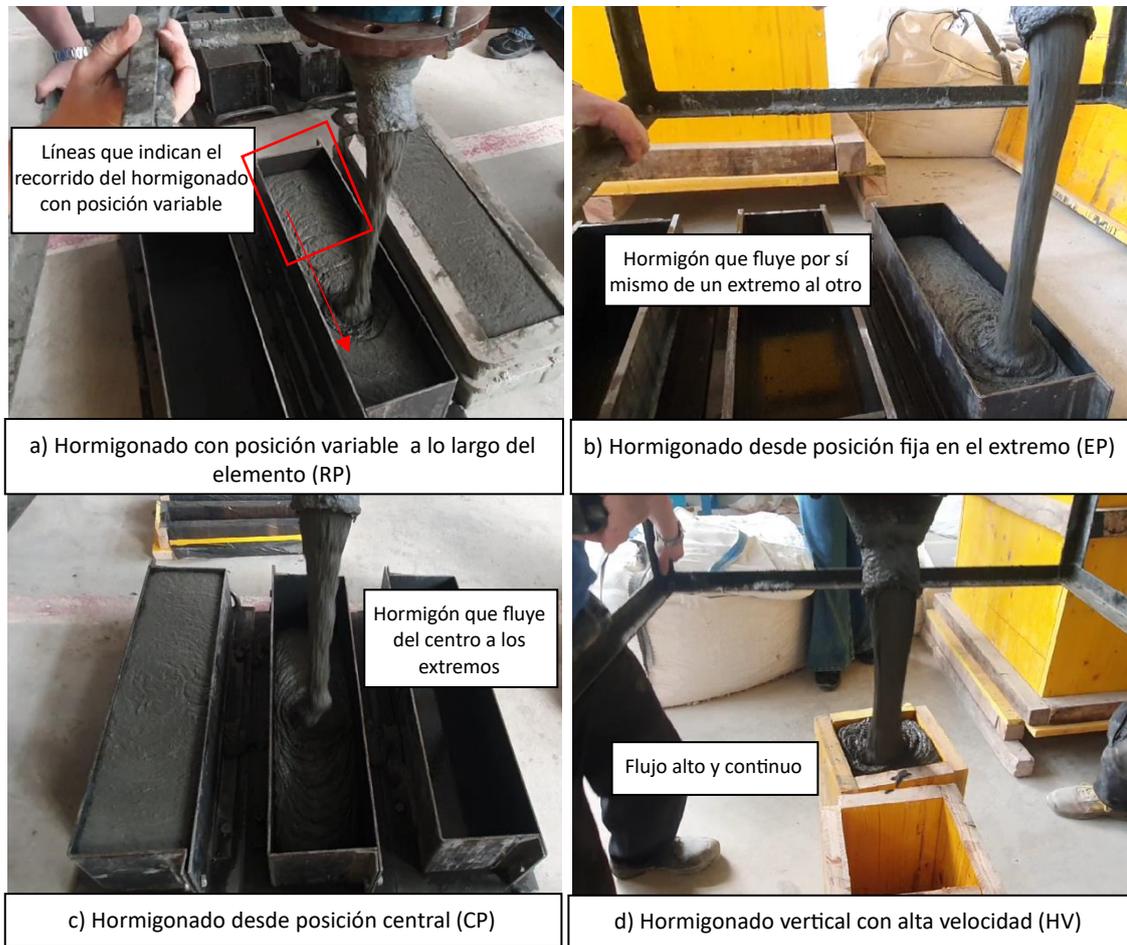
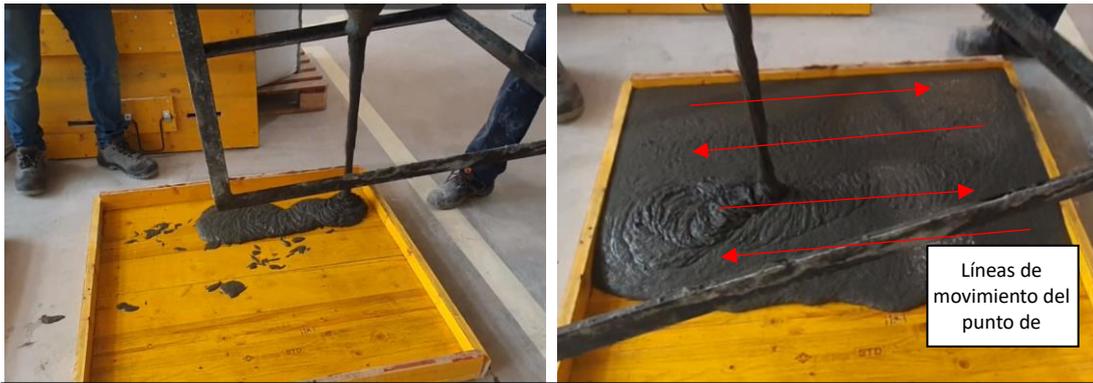
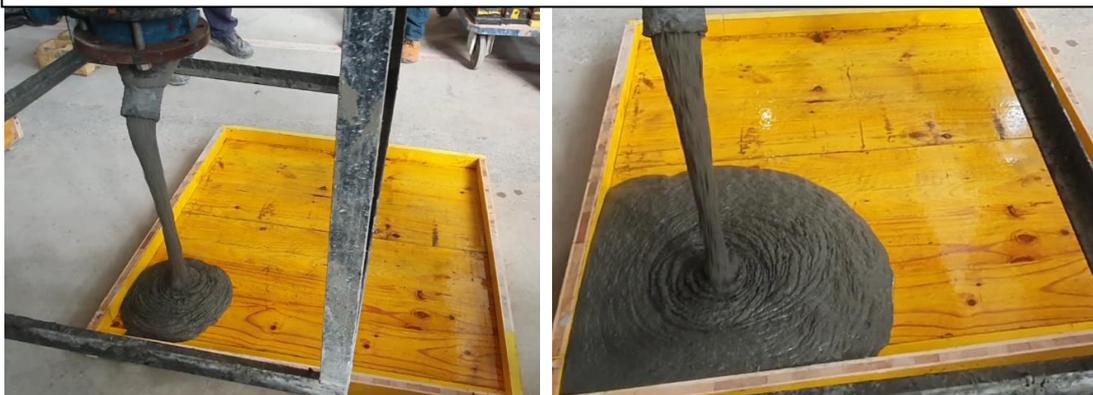


Figura 43: Secuencia de hormigonado para las vigas de 15x15x60 cm

La Figura 44 muestra los tipos de vertido al hormigonar las losas en el tercer día de hormigonado. Al día siguiente, se procuró realizar los cortes (Figura 45) en dirección longitudinal y transversal, según el esquema de la Figura 36, debido a que el procedimiento tendría menos dificultad cuando los elementos aún no desarrollen una resistencia elevada.



a) Hormigonado en zigzag (ZP)



b) Hormigonado con posición fija en la esquina de la losa (EP)



c) Hormigonado con posición fija en el centro de la losa (CP)

Figura 44: Tipos de hormigonado en losas

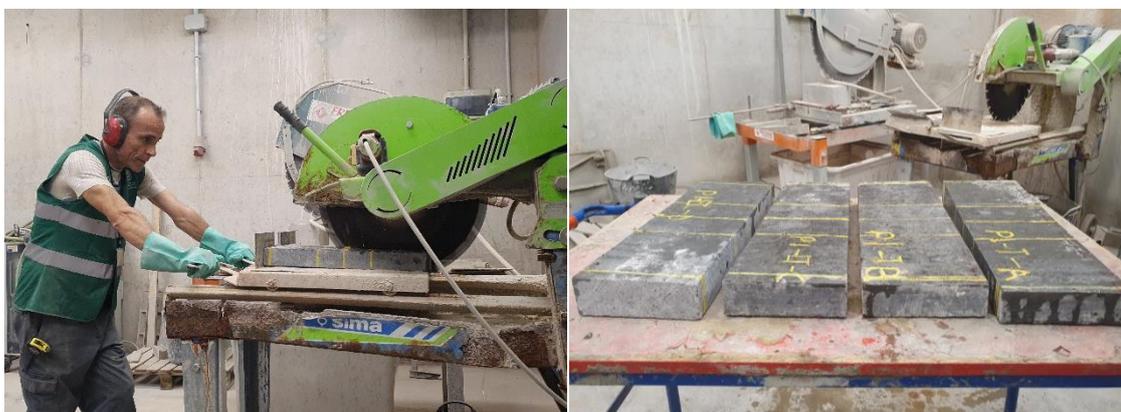


Figura 45: Procedimiento de corte de losas

3.3.3 Ensayos en estado fresco

3.3.3.1 Consistencia

Para las tres amasadas se realizó en el ensayo de consistencia de acuerdo con la norma UNE EN 12350. En este caso, se registró la extensión diametral del hormigón. Algunas fotografías se muestran en la Figura 46:



Figura 46: Medición de la extensión diametral o escurrimiento del hormigón en distintas fechas de hormigonado

3.3.3.2 Curado

Las muestras se cubrieron con láminas de plástico inmediatamente después del hormigonado y se curaron a temperatura ambiente durante las primeras 24 h, antes del desmolde. Pasadas las 24 h, las losas fueron cortadas en secciones transversales y longitudinales según Figura 36.

Finalmente, todos los especímenes se almacenaron en una cámara húmeda a 20 ° C-100% HR durante 28 días y las losas fueron cortadas para posteriormente ser ensayadas.

3.3.4 Ensayos en estado endurecido

3.3.4.1 Resistencia a compresión

Se realizó el ensayo de resistencia a compresión según la norma UNE-EN 12390. Para ello, se empleó la prensa IBERTEST y el programa WINTEST 32.

Mediante el equipo se obtenía la fuerza de la prensa que, al dividir con el área de la probeta se podía calcular la resistencia a compresión en MPa.

En total, se ensayaron 17 probetas cúbicas.



Figura 47: Ensayos a compresión del hormigón

3.3.4.2 Resistencia a tracción por flexión

Se realizó el ensayo de flexión de cuatro puntos (4PBT) de acuerdo con la normativa correspondiente. Para ello, se empleó la prensa ZwickRoell con capacidad de 600 kN.



Figura 48: Prensa ZwickRoell para ensayo a flexión (izquierda). Probeta con los captadores para el registro de la flecha (derecha).

IV. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Ensayos de asentamiento

Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 15:

Tabla 15: Resultados de la extensión diametral o escurrimiento del hormigón

1° Amasada	2° Amasada	3° Amasada
67.5 cm	76.5 cm	64 cm

4.2 Ensayos de rotura por compresión

De las tres amasadas realizadas, los resultados de resistencia a compresión obtenidos a 28 días se detallan en la Tabla 16:

Tabla 16: Resultados de resistencia a compresión por amasada

Amasada	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Coefficiente de variación CV (%)
A1	170.65	174	1.75
	171.74		
	174.23		
	177.5		
A2	158.6	161	2.36
	158.63		
	157.8		
	168.54		
	159.61		
	163.76		
	157.28		
	160.88		
A3	161.15	158	1.43
	158.43		
	156.77		
	157.12		
	155.09		
PROMEDIO	164	1.85	

El promedio obtenido entre amasadas de 164 MPa está dentro de lo esperado según la bibliografía para hormigones de ultra alta resistencia (superiores a 120MPa), con un coeficiente de variación de 1.85.

4.3 Ensayo a tracción por flexión

4.3.1 Análisis de los gráficos del ensayo a flexo tracción

4.3.1.1 Elementos tipo viga

Posterior a la ejecución de los ensayos, se realizaron las correcciones de las curvas correspondientes al tramo inicial lineal de acuerdo con la normativa de ensayo. Los gráficos y propiedades obtenidas se detallan en la Figura 49 y la Tabla 17. Previo al análisis de resultados, se debe tener en cuenta que la norma PNE 83519 indica que el procedimiento de hormigonado debe ser similar al de la condición RP (con punto de vertido avanzando a lo largo de la probeta). Por tanto, se considerará este tipo de elementos como referencia o estándar para fines comparativos.

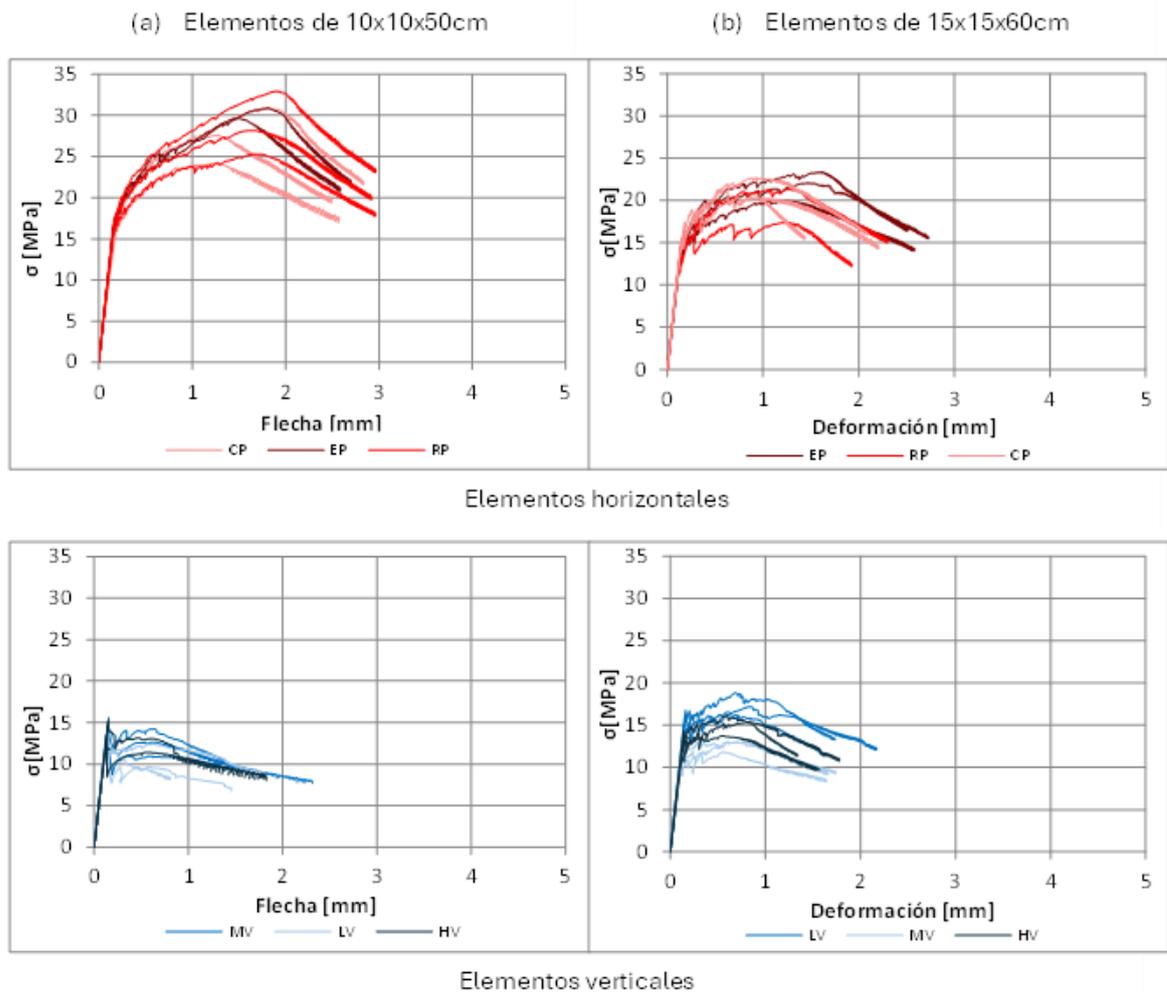


Figura 49: Gráfico tensión vs flecha para las condiciones de hormigonado en vigas: RP (con punto de vertido avanzando a lo largo de la probeta), EP (con punto de vertido fijo en posición lateral), CP (hormigonado con punto de vertido fijo en el centro), HV (alta velocidad), MV (media velocidad) y LV (baja velocidad).

Tabla 17: Propiedades del hormigón de acuerdo con las curvas tensión deformación para probetas

Propiedades del UHPFRC					
Vertido	Ítem	Probetas 10x10x50 cm		Probetas 15x15x60 cm	
		σ_{MAX} (MPa)	$\delta_{\sigma MAX}$ (mm)	σ_{MAX} (MPa)	$\delta_{\sigma MAX}$ (mm)
RP - Reference Placing	Promedio	28.8	1.7	19.4	1.3
	Máximo	32.9	1.9	21.3	1.3
	Mínimo	25.3	1.6	17.4	1.2
	CV	13.4	8.5	14.5	1.9
EP – Edge/ Corner Placing	Promedio	30.3	1.3	21.8	1.4
	Máximo	30.9	1.8	23.4	1.6
	Mínimo	29.6	0.6	20.0	1.2
	CV	2.8	47.3	7.9	14.9
CP – Central Placing	Promedio	27.5	1.4	21.7	0.8
	Máximo	30.8	1.8	22.7	0.9
	Mínimo	24.2	1.2	20.3	0.6
	CV	12.0	22.8	5.6	19.6

Es evidente que los especímenes verticales mostraron una rotura más frágil en ambos tamaños, evidenciando que la orientación preferente de las fibras en los elementos verticales se desarrolla con dirección contraria a las tensiones principales en comparación con sus pares horizontales y, por tanto, su aporte a la resistencia a flexión fue menor.

Todos los elementos muestran una pendiente inicial similar; es decir, poseen un parecido módulo de elasticidad debido a que son especímenes producto del mismo diseño de hormigón.

Elementos horizontales:

Los elementos horizontales presentaron un comportamiento de endurecimiento por deformación y dúctil en las probetas de 10x10x50 cm y las de 15x15x60 cm, siendo las primeras las que tuvieron una mayor resistencia a flexión.

Según la bibliografía, las probetas de menor espesor tienden a desarrollar una mayor orientación de las fibras por la mayor influencia del efecto pared. En este caso, la orientación en dirección de las tensiones principales generó un mayor aporte de las fibras en la resistencia a flexión en las muestras de menor tamaño.

Por otro lado, las fibras también suelen orientarse en dirección del flujo, por lo que se preveía un mejor comportamiento por parte de las vigas hormigonadas desde la esquina debido a que dicha orientación ocurre en dirección de las

tensiones de tracción. Si bien existen algunas curvas con distinta condición de vertido que superan el comportamiento de las EP en ambos tamaños, en promedio, el comportamiento de las muestras con vertido en la esquina tiende a resistir mayores tensiones.

Elementos verticales:

Las probetas de 10x10x50cm recuperaron menos la resistencia frente a las de 15x15x60cm. Esto puede indicar que, en las muestras de menor tamaño, el efecto pared influyó en la orientación de las fibras en dirección contraria al eje principal, probablemente, debido a sus dimensiones. Debido a la recuperación de resistencia de las probetas de 15x15x60cm, se estima un aparente comportamiento de endurecimiento por deformación en flexión.

Se observa que la posición de las curvas para las diferentes velocidades de vertido tiene un distinto orden en ambos tamaños. Por tanto, no existe una diferencia evidente que pueda relacionar el incremento de velocidad con la orientación de las fibras. Algunos estudios indican que, al aumentar la velocidad, se podría evitar un patrón de flujo en forma de serpiente y se podría obtener una capa más delgada con una alineación preferida de las fibras en el eje del haz para especímenes horizontales; sin embargo, en este caso no se ha observado dicho efecto como tal o una relación de la resistencia a flexión en función de la velocidad de vertido.

4.3.1.2 Elementos tipo losa

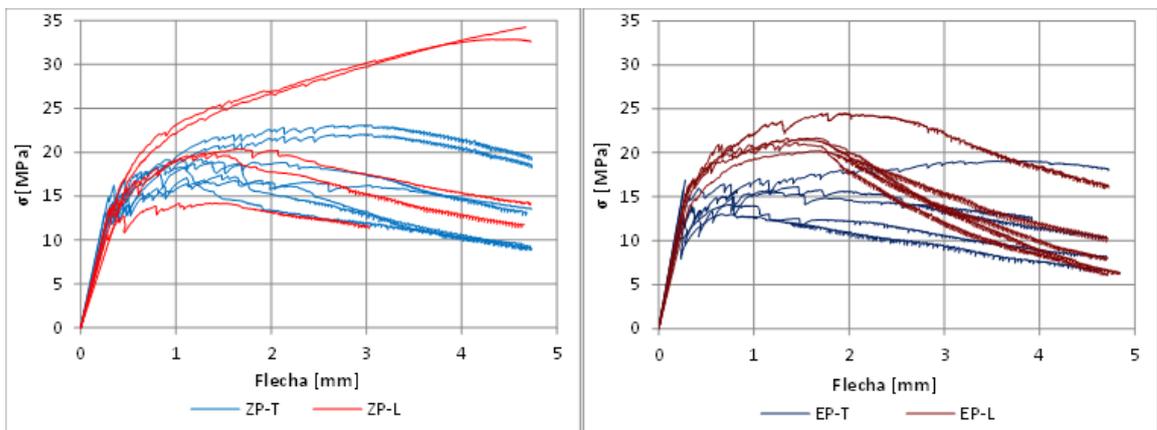
En el caso de las placas fabricadas, también se realizaron los ensayos de flexión en los cortes elaborados.

En las curvas obtenidas con la condición de vertido de hormigón en el centro, por simetría y similitud, se unieron los resultados de los cortes realizados en longitudinal y transversal. En cambio, para las muestras hormigonadas en esquina (EP) y en zigzag (ZP) se han diferenciado los resultados en función de la dirección de corte. Los gráficos y propiedades obtenidas se detallan en la Figura 50 y la Tabla 18.

Todos los elementos muestran una pendiente o módulo de elasticidad similar debido a que son especímenes producto del mismo diseño de hormigón.

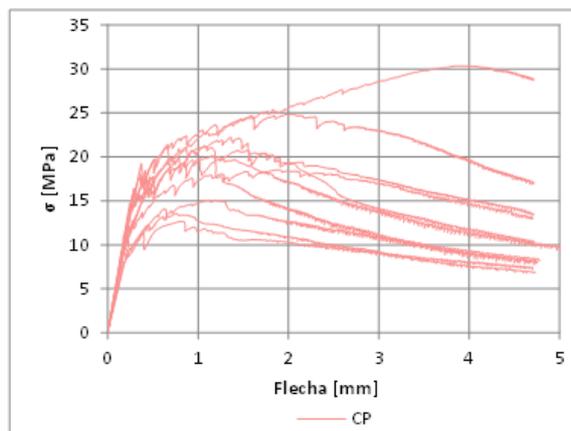
Las probetas con hormigonado en zigzag (ZP) tienen puntos de tensión máxima hacia la izquierda y el centro del gráfico en ambas direcciones longitudinal (ZP-L) y transversal (ZP-T). Por el contrario, los elementos hormigonados en la esquina (EP) muestran una diferencia notoria entre la dirección longitudinal (EP-L) y transversal (EP-T). Las probetas EP-L muestran un comportamiento más dúctil y una mayor resistencia a la flexión luego de la etapa lineal elástica. Sin embargo, las EP-T tienen una caída de resistencia brusca luego del tramo elástico lineal. Esto podría reflejar la orientación preferente de las fibras en dirección longitudinal con respecto al transversal, por lo que esta última dirección de la losa tendría un menor aporte de las fibras frente a las tensiones.

Debido a la simetría que se obtiene al realizar hormigonar desde el centro (CP), los gráficos son similares entre los cortes transversales y longitudinales, tal como se preveía. La tensión máxima es alcanzada antes de los 2 mm en la mayoría de los casos a diferencia de las otras condiciones de vertido que varían en ese punto.



(a)Hormigonado en zigzag

(b)Hormigonado con punto fijo la esquina



(c)Hormigonado con punto fijo en el centro

Figura 50: Resultados del ensayo de flexo tracción para las diferentes condiciones de hormigonado.

Tabla 18: Propiedades del hormigón de las losas según el ensayo a 4 puntos

Vertido	Método	Ítem	σ_{MAX} (MPa)	$\delta_{\sigma MAX}$ (mm)
		Media	26.8	3.0
ZP - Zigzag Placing	Longitudinal (L)	Máx.	34.2	4.7
		Mín.	19.9	1.3
		CV	28.9	58.0
	Transversal (T)	Media	19.4	1.8
		Máx.	23.1	3.0
		Mín.	16.8	0.9
		CV	12.0	48.7
Promedio (L,T)			22.1	2.2
CV			26.9	59.3
		Media	21.8	1.7
EP – Edge/Corner Placing	Longitudinal (L)	Máx.	24.5	2.0
		Mín.	20.2	1.5
		CV	7.4	12.0
	Transversal (T)	Media	15.5	0.7
		Máx.	16.9	1.5
		Mín.	13.0	0.3
		CV	10.9	84.5
Promedio (L,T)			19.0	1.2
CV			19.3	52.7
		Media	17.9	1.2
CP – Central Placing	Longitudinal (L)	Máx.	22.2	1.4
		Mín.	13.5	0.8
		CV	23.7	25.7
	Transversal (T)	Media	19.4	1.4
		Máx.	24.9	2.0
		Mín.	12.7	0.8
		CV	23.0	37.1
Promedio (L,T)			18.7	1.3
CV			22.2	32.9

4.3.2 Análisis de las propiedades a tracción

4.3.2.1 Leyes constitutivas a tracción en elementos en una dirección

Comparativo gráfico en elementos tipo viga

No era posible emplear la norma UNE 83519 para el cálculo de la ley constitutiva en todos los especímenes debido a:

- Las dimensiones de la mayoría no cumplían con los límites para el uso de dicha de normativa.
- Muchos de los elementos presentaron un comportamiento de ablandamiento por deformación, en especial los hormigonados en vertical. Al calcular los cuatro puntos que indica la normativa (Figura 38), los valores obtenidos no cumplían con los requisitos para el uso de la norma ($\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ y $\delta_1 < \delta_2 < \delta_3$).

Se realizó el cálculo y la comparación de las propiedades a tracción mediante la aplicación UHPFRCMat para las distintas condiciones de hormigonado en los elementos horizontales y verticales con las dimensiones correspondientes.

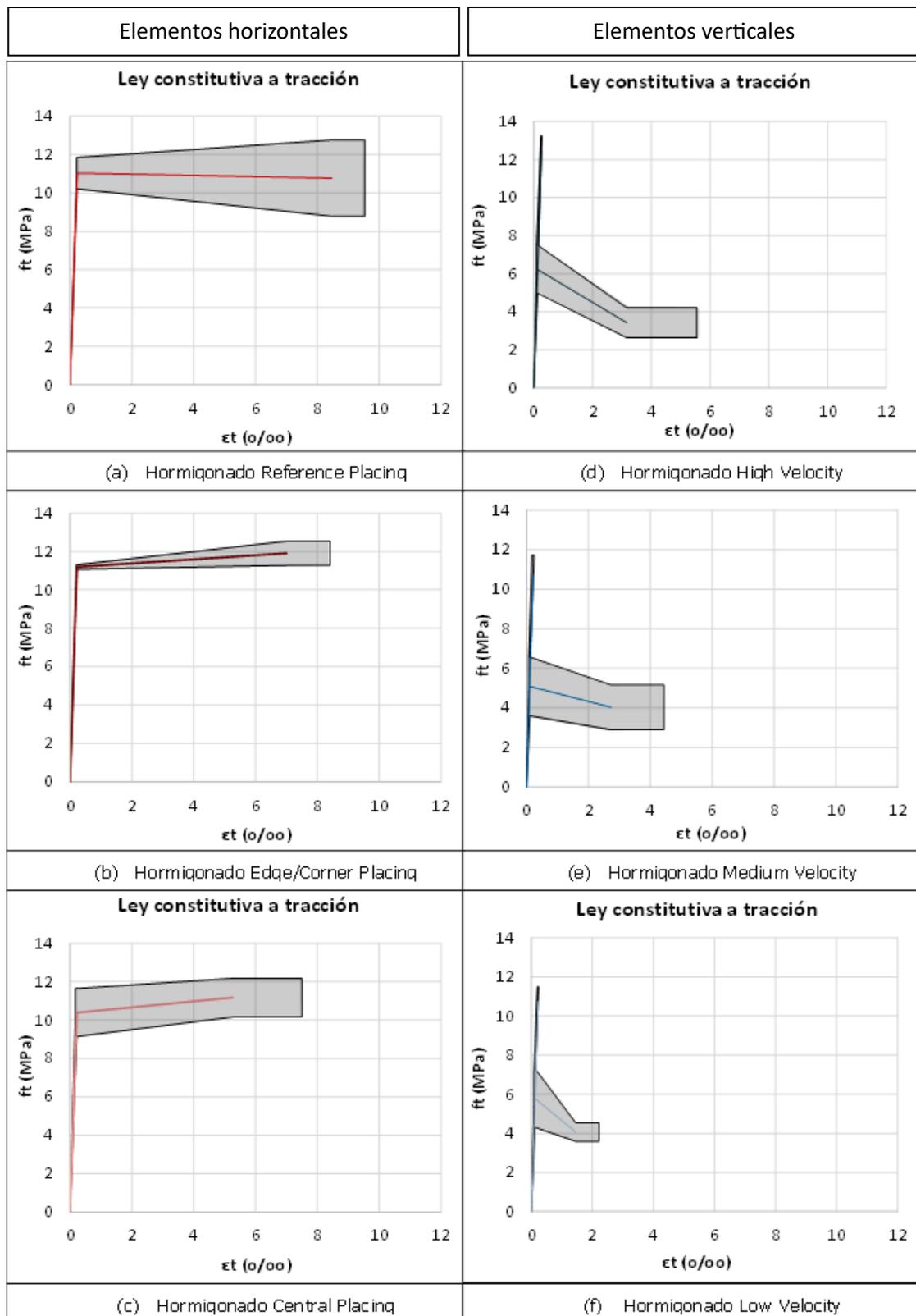


Figura 51: Leyes constitutivas a tracción para cada espécimen según la condición de hormigonado y el promedio para probetas de 10x10x50 cm

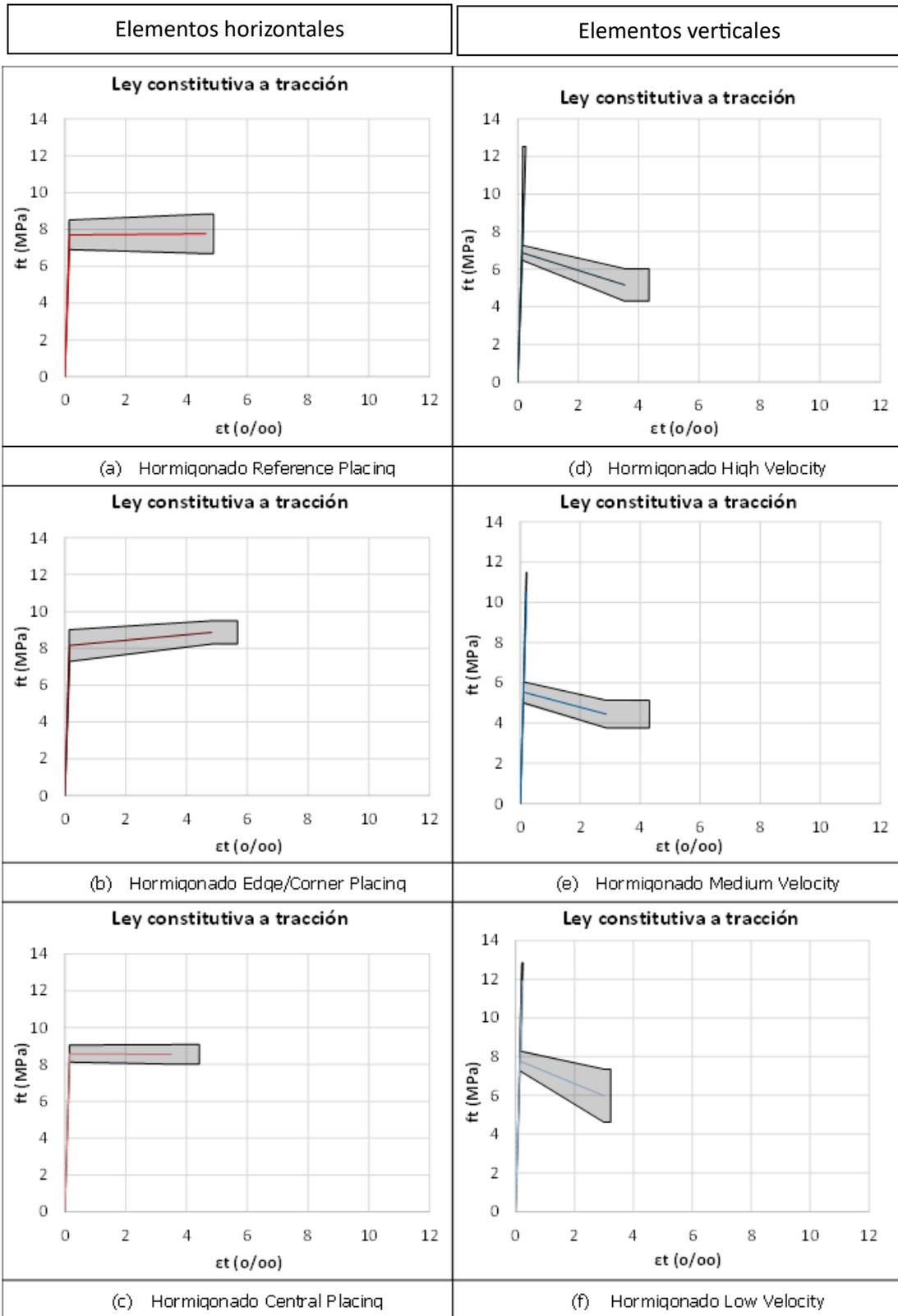


Figura 52: Leyes constitutivas a tracción para cada espécimen según la condición de hormigonado y el promedio para probetas de 15x15x60 cm

Se calculó el promedio de las propiedades y se elaboraron los gráficos correspondientes a las leyes constitutivas de cada caso. Además, mediante el

programa Excel se determinó el coeficiente de variación de todos los resultados, de tal manera que se incluyó dicha dispersión en los gráficos, tal como se muestra en la Figura 51 y la Figura 52. El área gris representa el alcance de la variación de resultados entre las distintas probetas. En su mayoría, los elementos de mayor tamaño (15x15x60cm) tuvieron una menor dispersión en comparación con los de menor dimensiones (10x10x50cm).

Los especímenes hormigonados desde la esquina mostraron menor área de dispersión para ambos tamaños en comparación con los otros métodos de hormigonado. Esto podría indicar que la orientación preferente de las fibras en dirección del flujo del hormigón para estos elementos de una dirección contribuye a una menor variación de las propiedades.

Las curvas en su mayoría para las distintas condiciones de hormigonado en horizontal presentan un comportamiento de endurecimiento por deformación en tracción a diferencia de las que fueron hormigonadas en vertical que, aparentemente, podría indicar un comportamiento de ablandamiento por deformación en tracción. También se observa la fuerte caída de la resistencia a tracción en las probetas verticales y una baja deformación producto de la baja orientación de las fibras en dirección de las tensiones principales.

Para los diferentes métodos de hormigonado, se agruparon los gráficos promedio de los resultados obtenidos para facilitar la comparación entre los distintos casos en la Figura 53. Las líneas rojas corresponden a los elementos horizontales y las azules a los elementos verticales.

Se observa la notoria diferencia entre los elementos horizontales y verticales para las probetas de 10x10x50 cm en el gráfico de la ley constitutiva a tracción. Esto podría indicar que la orientación preferente de las fibras fue en sentido contrario a las tensiones en las probetas verticales, por lo que el aporte fue menor. Por tanto, se podría decir que los elementos horizontales mostraron un comportamiento de endurecimiento por deformación en tracción.

La diferencia se acortó en los especímenes de 15x15x60cm. Como se mencionó en el Estado del Arte, el efecto pared es limitado en las estructuras de espesor

sustancial y, por tanto, la mayoría de las fibras ya no están orientadas paralelas a los bordes del prisma. Esto, probablemente, pudo causar que la resistencia a tracción de estas probetas disminuya en los elementos horizontales de mayor tamaño y, por tanto, se acercara a los resultados de los elementos verticales.

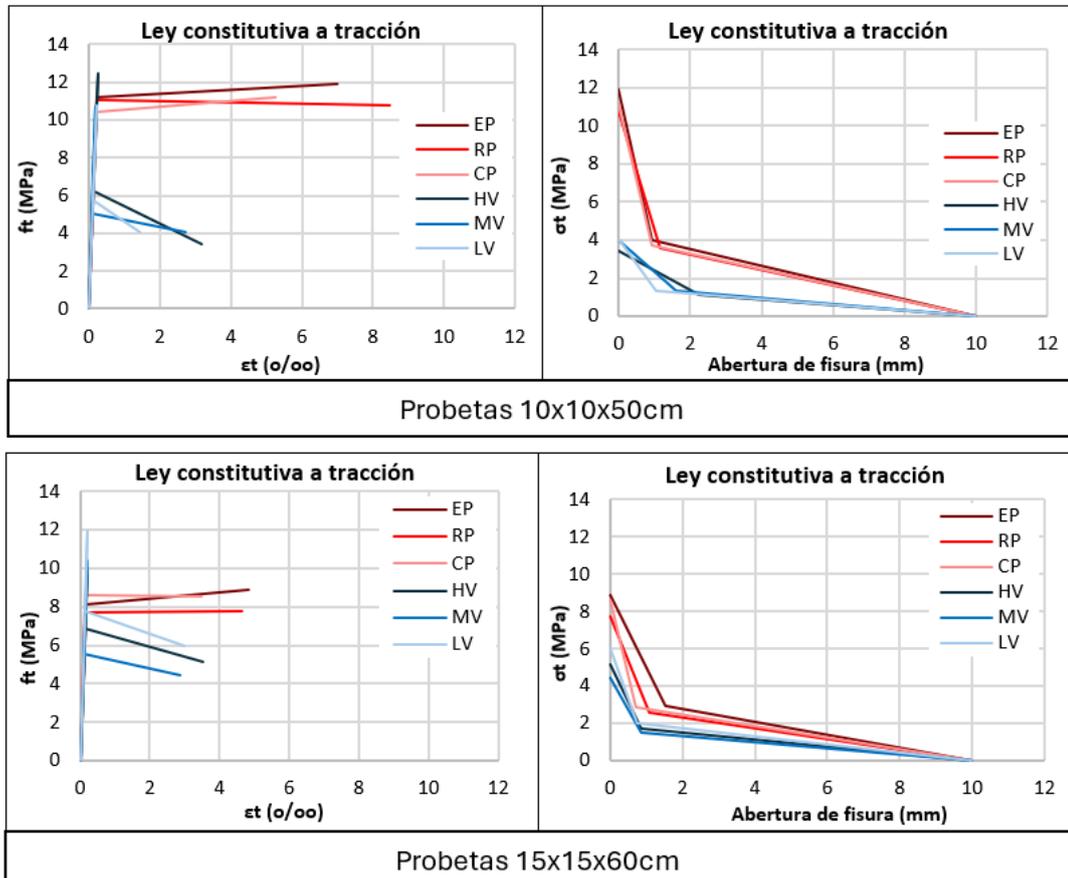


Figura 53: Curvas promedio para cada condición de vertido en probetas 15x15x60cm

La Tabla 19 resume la diferencia entre las propiedades a tracción calculadas para cada caso de hormigonado horizontal. Según la bibliografía, la resistencia a tracción promedio de este material suele estar en el rango entre 10-12 MPa, lo cual se cumple en el caso de los elementos de menor espesor.

Las diferencias ente la resistencia a tracción de la matriz y la resistencia a tracción última se incrementan con el tamaño de las probetas, tal como ya se había mencionado.

En los especímenes de 10x10x50 cm se esperaba que el menor espesor influiría en el efecto pared de las vigas, por lo que podría mostrar que las diferencias entre las condiciones de vertido sean menores. Por ejemplo, la resistencia a

tracción última fue 10.64% y 3.77% mayor para las probetas EP y CP respectivamente. Asimismo, la resistencia a tracción de la matriz entre la referencia y las muestras hormigonadas en la esquina (EP) y el centro (CP) fue de 1.44% y -5.44% respectivamente.

Por otro lado, en el caso de los elementos de 15x15x60cm, las diferencias incrementaron entre resultados, probablemente, debido a que el efecto pared fue menor a causa del espesor de estas probetas. Por un lado, se esperaba una orientación de las fibras según el flujo del hormigón en las probetas hormigonadas en la esquina (EP). Por otro lado, los especímenes cuyo hormigonado fue en el centro (CP) también podrían desarrollar una orientación de las fibras en dirección del flujo del hormigón a medida que aumente la distancia desde el punto de vertido hacia los extremos; sin embargo, en menor medida que los EP. Por tanto, ambos factores pueden estar relacionados en que la resistencia última a tracción sea superior en 14.27% y 10.27% para las muestras EP y CP respectivamente en comparación con el estándar (RP).

Tabla 19: Cálculo de las propiedades a tracción para cada tipo de vertido y tamaño de elemento

Vertido	Ítem	Probetas 10x10x50cm				Probetas 15x15x60cm			
		f_t (MPa)	f_{tu} (MPa)	ϵ_{tu} (o/oo)	wo (mm)	f_t (MPa)	f_{tu} (MPa)	ϵ_{tu} (o/oo)	wo (mm)
RP Reference Placing	Media	11.0	10.8	8.5	1.8	7.7	7.8	4.6	1.6
	Máx.	11.8	12.9	9.6	2.2	8.3	8.5	4.8	1.9
	Mín.	10.2	9.0	7.5	1.5	7.1	7.0	4.5	1.3
	CV	7.4	18.5	12.5	21.3	10.4	13.8	5.3	24.4
EP Edge/ Corner Placing	Media	11.2	11.9	7.0	1.4	8.2	8.9	4.8	2.3
	Máx.	11.3	12.4	8.0	1.7	9.1	9.3	5.7	2.8
	Mín.	11.1	11.5	6.0	1.2	7.4	8.1	4.0	2.0
	CV	1.1	5.3	20.2	25.5	10.6	7.1	17.8	17.5
CP Central Placing	Media	10.4	11.2	5.3	1.4	8.6	8.6	3.5	1.1
	Máx.	11.2	12.2	7.7	2.1	9.0	8.9	4.1	1.4
	Mín.	9.0	10.3	3.3	0.9	8.1	7.9	2.4	0.7
	CV	12.0	9.0	42.5	42.4	5.4	6.2	26.3	32.2
Diferencias en %									
Relación EP/RP		1.44	10.64	-17.41	-19.83	5.78	14.27	4.05	44.30
Relación CP/RP		-5.74	3.77	-37.86	-20.00	11.37	10.27	-24.53	-33.58

También se determinaron las propiedades a tracción de los elementos verticales detallados en la Tabla 20 y la Tabla 21.

Tabla 20: Cálculo de las propiedades a tracción para cada tipo de vertido de hormigón en vertical

Propiedades del UHPFRC en elementos 10x10x50cm								
Vertido	Ítem	E (MPa)	f_{t1} (MPa)	f_{t2} (MPa)	f_{tu} (MPa)	ε_{tu} (o/oo)	w_o (mm)	
HV High Velocity	Media	48758.8	12.4	6.2	3.4	3.2	3.3	
	Máx.	49697.5	13.3	6.4	4.2	5.7	5.3	
	Mín.	49079.0	12.4	6.2	2.6	5.7	3.3	
	CV	2.3	6.5	20.0	23.0	75.3	52.0	
MV Medium Velocity	Media	53402.2	10.7	5.1	4.0	2.7	2.4	
	Máx.	58000.0	11.8	5.5	4.8	3.3	2.7	
	Mín.	48827.6	10.7	3.4	4.0	0.8	2.4	
	CV	8.6	9.6	29.2	28.1	62.6	20.3	
LV Low Velocity	Media	48983.7	10.7	5.8	4.1	1.4	1.6	
	Máx.	50000.0	11.5	7.3	4.6	2.2	1.7	
	Mín.	48669.0	10.7	5.7	4.1	2.2	1.5	
	CV	1.8	7.0	25.4	11.9	52.9	6.7	
Diferencias en % entre tipos de vertido								
Relación HV/MV		-8.70	16.25	22.53	-15.26	16.26	37.72	
Relación LV/MV		-8.27	0.44	13.82	1.04	-46.90	-35.02	
Caída ft (%): relación f_{t2}/f_{t1}								
HV						-49.9		
MV						-52.5		
LV						-46.2		

Tabla 21: Cálculo de las propiedades a tracción para cada tipo de vertido de hormigón en vertical

Propiedades del UHPFRC 15x15x60cm								
Vertido	Ítem	E (MPa)	f_{t1} (MPa)	f_{t2} (MPa)	f_{tu} (MPa)	ε_{tu} (o/oo)	w_o (mm)	
HV High Velocity	Media	47902.3	10.0	6.9	5.2	3.5	1.3	
	Máx.	50531.8	12.3	6.7	5.4	4.5	1.9	
	Mín.	50531.8	12.3	6.6	5.4	4.5	1.9	
	CV	5.5	25.1	5.7	16.8	22.8	38.8	
MV Medium Velocity	Media	48500.3	10.4	5.5	4.4	2.9	1.3	
	Máx.	48237.6	10.2	5.2	4.8	3.2	1.8	
	Mín.	46315.0	9.5	5.2	4.8	1.3	1.8	
	CV	4.8	10.1	9.5	15.5	49.7	34.1	
LV Low Velocity	Media	52611.7	11.9	7.8	6.0	3.0	1.1	
	Máx.	53004.0	12.0	8.3	7.2	3.1	0.8	
	Mín.	52172.0	11.0	8.3	4.5	2.7	0.5	
	CV	0.8	7.7	6.6	22.8	7.6	74.1	
Diferencias en % entre tipos de vertido								
Relación HV/MV		-1.23	-3.97	24.44	16.27	23.01	-1.68	
Relación LV/MV		8.48	14.52	40.83	34.85	4.24	-14.43	
Caída ft (%): relación f_{t2}/f_{t1}								
HV						-31.3		
MV						-47.0		
LV						-34.8		

En el caso del hormigonado vertical para elementos 10x10x50 cm no se observa una relación evidente entre el orden de resultados según el incremento de la velocidad con la orientación de las fibras. La caída del f_t alcanza alrededor del 50% al realizar el hormigonado vertical, por lo que se evidencia que la orientación de las fibras fue preferente en sentido contrario a las tensiones que se generaron. Por tanto, el aporte de las fibras fue mucho menor.

Las probetas de 15x15x60cm, nuevamente, no se observa una relación evidente entre el orden de resultados según el incremento de la velocidad con la orientación de las fibras al hormigonar en elementos verticales. También se observa una caída del f_t de aproximadamente entre el 30 y 50%.

Adicionalmente, se elaboraron los gráficos completos de la ley constitutiva a tracción (Figura 54) convirtiendo el espesor de fisura w_o en deformación.

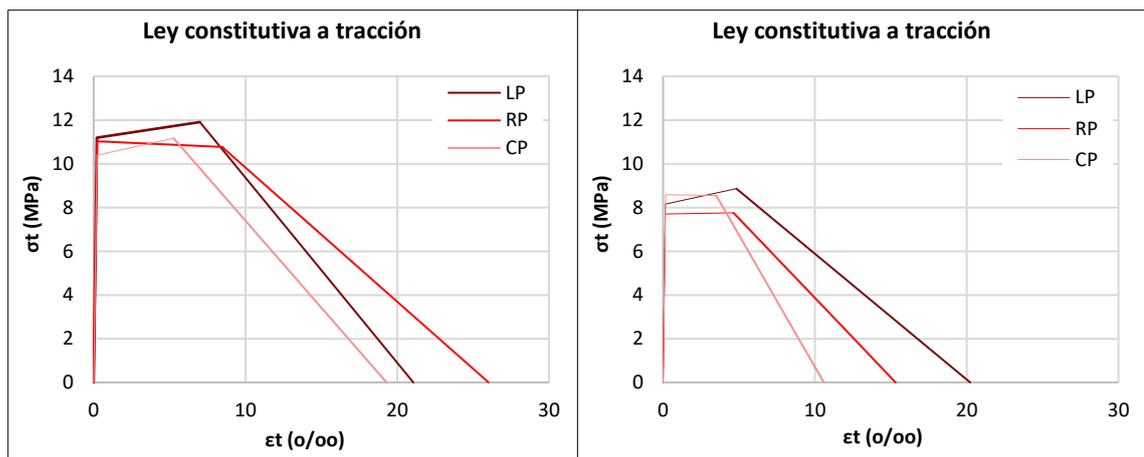


Figura 54: Leyes constitutivas a tracción para especímenes de 10x10x50 cm (izquierda) y 15x15x60cm (derecha).

Debido a la deformación ϵ_{tu} alcanzada en cada caso, se observa un cambio de pendiente con el último tramo. Esto podría indicar la aparición de fisuras separadas con una baja distancia en la zona de la rótula plástica antes de la formación de la fisura principal.

Se observa que los especímenes de menor tamaño tuvieron un mejor comportamiento, probablemente, por la orientación de las fibras a causa del efecto pared. Además, la diferencia entre resultados para las distintas condiciones de vertido fue menor.

Además, la orientación de las fibras en dirección del flujo en los elementos hormigonados en la esquina fue más notorio en los elementos de 15x15x60cm.

Comparativo en elementos tipo losas

Se extrajo el comportamiento promedio entre los cortes transversales y longitudinales para cada caso de hormigonado en losas (Figura 55).

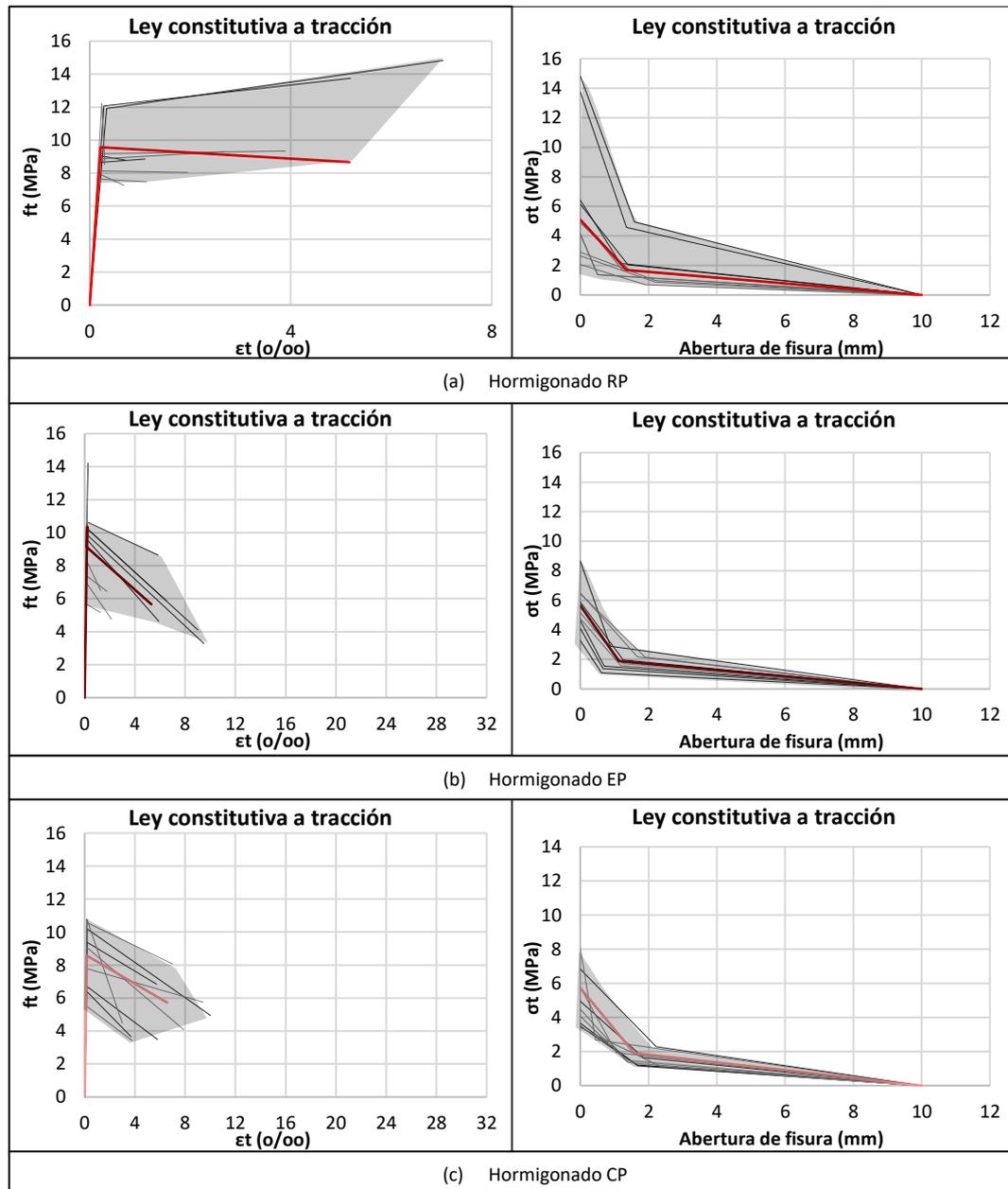


Figura 55: Leyes constitutivas a tracción para cada espécimen según la condición de hormigonado y el promedio para probetas de 15x15x60 cm

Se tomará como referencia los resultados de las muestras hormigonadas con punto de vertido avanzando a lo largo de la probeta acompañando al hormigón correspondientes a las vigas 10x10x50cm (RP estándar) para la comparación con

los resultados promedio obtenidos de las losas. Esto sería lo mínimo que se espera cumplir de forma individual por parte de cada elemento en ambas direcciones.

La Figura 56 muestra que ningún tipo de condición de hormigonado se encuentra dentro del rango de las gráficas de tracción estándar. Sin embargo, la gráfica más cercana al estándar corresponde al método de colocación de punto variable acompañando el flujo de hormigón.

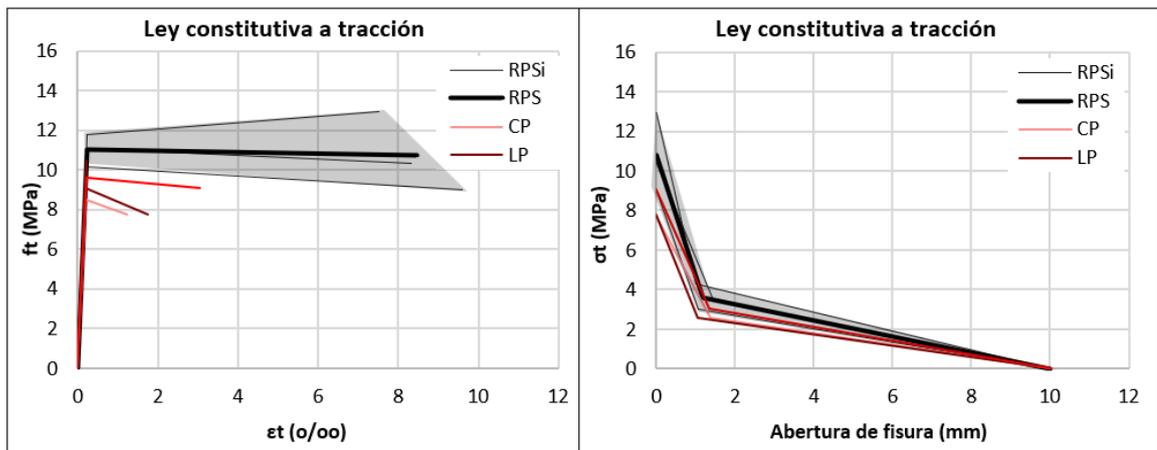


Figura 56: Curvas promedio para cada condición de vertido en losas comparada con las probetas RPS (promedio de resultados de las vigas 10x10x50 cm estándar) y sus rango de resultados individuales RPSi (resultados individuales de las vigas 10x10x50 cm estándar)

Adicionalmente, se realizó un cálculo de las diferencias porcentuales detallados en la Tabla 22. En primer lugar, se observa que el módulo de elasticidad es similar en todos los métodos de vertido con respecto a la muestra estándar. La máxima diferencia encontrada fue del 11%.

Las losas que fueron hormigonadas de forma controlada en toda la superficie tuvieron en promedio un f_{tu} de 9.1 MPa; es decir, un 15.75% menos que las muestras estándar con 10.8 MPa. En el caso de la resistencia a la tracción de la matriz f_t , el resultado fue un 13.59% menor con respecto a la referencia.

En las losas hormigonadas desde un punto en la esquina(EP), se observa la caída promedio del f_t desde 11.4MPa a 8.3MPa, aproximadamente el 12%. Además, el f_{tu} longitudinal (EP-L) y transversal (EP-T) fue de 9.4MPa y 5.8 MPa respectivamente; es decir, un menor aporte de las fibras en una de las dos direcciones. Las probetas EP-L y EP-T, en promedio, tuvieron un f_{tu} de 7.8MPa,

lo cual es aproximadamente 28% menos de lo esperado con respecto a las probetas estándar de 10x10x50 cm. Adicionalmente, la caída de resistencia en la matriz para el f_t , alcanzó un 28% menos que las probetas de referencia.

De forma similar, en el caso de las losas hormigonadas en el centro (CP), el f_{tu} fue de 7.8MPa; es decir, 28% menos que las probetas estándar.

Tabla 22: Comparativo de las propiedades a tracción obtenidas de la losa con el estándar en vigas

Propiedades del UHPFRC								
Vertido	Corte	Ítem	E (MPa)	ft1 (MPa)	ft2 (MPa)	ftu (MPa)	εtu	wo
	RPS	Media	49484.0	11.0		10.8	8.5	1.8
	Reference	Máx.	50971.0	11.8		12.9	9.6	2.2
	Placing	Mín.	47500.0	10.2		9.0	7.5	1.5
	Standard	CV	3.6	7.4		18.5	12.5	21.3
		Media	42455.7	10.4		10.3	5.6	2.1
	Longitudinal (L)	Máx.	46729.0	12.1		14.8	7.0	2.4
		Mín.	35241.4	8.6		6.1	4.5	1.8
		CV	12.0	17.5		45.1	19.3	12.1
Zigzag Placing		Media	45319.8	9.0		8.4	1.6	2.0
	Transversal (T)	Máx.	51387.0	12.2		9.3	3.9	2.9
		Mín.	40803.0	7.6		7.3	0.3	1.0
		CV	8.5	17.1		9.8	86.7	39.3
	Promedio (L,T)		44278.3	9.6		9.1	3.0	2.0
	CV		9.8	15.0		30.8	78.3	30.8
		Media	48788.3	9.7		9.4	2.0	1.0
	Longitudinal (L)	Máx.	54747.0	10.7		10.1	2.4	1.6
		Mín.	38710.0	8.7		8.7	1.7	0.6
		CV	13.5	7.8		5.2	16.2	38.0
EP Edge/Corner Placing		Media	49250.5	11.4	8.3	5.8	1.4	2.2
	Transversal (T)	Máx.	56174.1	14.2	13.2	6.7	2.1	2.6
		Mín.	42624.1	7.4	5.7	4.8	0.9	1.8
		CV	11.6	26.5	40.1	16.8	38.4	19.9
	Promedio (L,T)		48993.7	10.5	9.1	7.8	1.7	1.6
	CV		11.9	20.4	24.6	25.7	30.2	46.5
		Media	43739.8	7.9		7.9	7.4	0.8
	Longitudinal (L)	Máx.	51307.0	10.3		10.3	9.4	0.9
		Mín.	36631.0	6.1		6.1	5.2	0.8
		CV	17.2	24.4		24.4	27.8	6.3
CP Central Placing		Media	49308.1	9.0		9.0	8.1	1.6
	Transversal (T)	Máx.	53358.0	11.6		11.6	10.3	3.8
		Mín.	43856.0	5.5		5.5	3.4	0.5
		CV	7.3	28.0		28.0	34.5	95.6
	Promedio (L,T)		46833.3	8.5		8.5	7.8	1.2
	CV		12.9	26.1		26.1	30.5	91.2
Diferencias en %								
	Relación ZP/RPS		-10.52	-13.59		-15.75	-64.18	14.27
	Relación EP/RPS		-0.99	-5.09	-17.63	-27.75	-79.42	-11.59
	Relación CP/RPS		-5.36	-22.92		-27.98	-85.45	18.37

Para analizar el efecto de las propiedades como el ϵ_{tu} y w_o , se procedió a realizar un solo gráfico de la ley constitutiva hasta la abertura de fisura w_o . Para lo cual se convirtieron los parámetros de las abscisas a deformaciones ϵt :

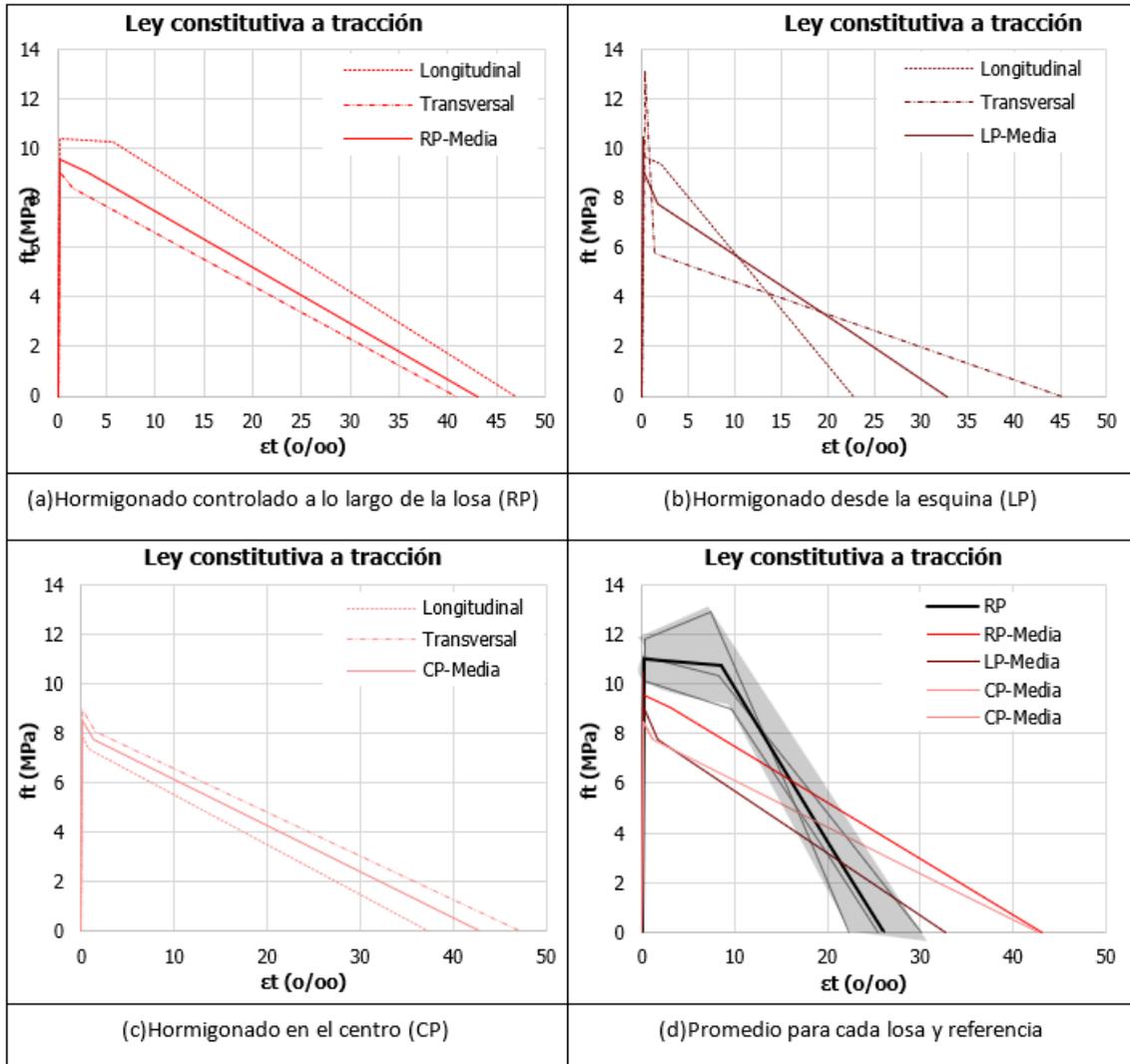


Figura 57: Gráficos de las leyes constitutivas del hormigón para las diferentes condiciones de vertido (a,b,c) y comparativo de los promedios con el estándar de 10x10x50cm (d)

Como se observa, los resultados más distintos entre la dirección transversal y longitudinal corresponden a la losa hormigonada en la esquina (EP). Esto reitera la orientación preferencial de las fibras en una de las direcciones.

Por otro lado, debido a la simetría del elemento, la diferencia entre los gráficos en dirección longitudinal y transversal para la losa hormigonada en el centro (CP) fue menor.

En el gráfico comparativo de los promedios de las tres losas, se observa que el tramo inicial desaparece en las tres losas. En el caso del segundo tramo, la losa que tuvo un hormigonado zigzag (ZP) tuvo una pendiente similar a la del tercer tramo del gráfico, a diferencia de las otras condiciones de vertido. Sin embargo, el tercer tramo de las 3 condiciones de vertido tiene una pendiente muy distinta a la probeta estándar. Esto se debe a que las deformaciones ϵ_{tu} son menores y las aberturas de fisura w_o son mayores, lo cual podría relacionarse con la aparición de menos fisuras en la rótula plástica y con una distancia mayor entre sí.

Por tanto, el aporte de las fibras en la etapa de fisuración para elementos en losas debe ser controlado porque la orientación de las fibras no dependerá de una sola dirección, sino de ambas direcciones.

4.3.3 Comparativo entre los resultados obtenidos con la norma y la aplicación UHPFRCCMat

Se calcularon los parámetros de la ley constitutiva a tracción mediante la normativa anteriormente descrita y la aplicación UHPFRCCMat detallados en la Tabla 23.

Los resultados de las propiedades de la ley constitutiva del hormigón son similares para ambos métodos. Por un lado, el módulo de elasticidad E y resistencia a tracción f_t y la resistencia última a tracción f_{tu} tuvieron las diferencias más bajas de hasta $\pm 9\%$. De acuerdo con la Figura 10 del Estado del Arte, se esperaba que los valores de f_t y f_{tu} sean los más precisos. Además, los coeficientes de variación en su mayoría son inferiores al 30% para los distintos casos.

Por otro lado, la deformación ϵ_{tu} y la abertura de fisura w_o obtuvieron una diferencia de alrededor $\pm 20\%$. y los correspondientes al ϵ_{tu} y w_o presenten una mayor diferencia, pero siendo considerados confiables. Según la bibliografía, también era de esperarse que estas propiedades sean las que posean mayor coeficiente de variación, pero dentro de un rango aceptable. Solo el caso de las

probetas que fueron hormigonadas en el centro tiene coeficientes del orden de 42% al 50%

Tabla 23: Comparativo de resultados entre las propiedades del método de análisis inverso y el método analítico

Propiedades del UHPFRC								
Vertido	Método	Ítem	E (Mpa)	ft (Mpa)	ftu (Mpa)	ε_{tu}	w_o	
		Promedio	49484.0	11.0	10.8	8.5	1.8	
RP - Reference Placing	Aplicación UPHCMat	Máximo	50971.0	11.8	12.9	9.6	2.2	
		Mínimo	47500.0	10.2	9.0	7.5	1.5	
		CV	3.6	7.4	18.5	12.5	21.3	
			Promedio	49483.8	11.2	10.2	6.9	1.8
	Norma	Máximo	50970.6	11.7	13.4	8.0	2.1	
		Mínimo	47500.0	10.6	8.5	6.2	1.4	
		CV	3.6	4.9	27.3	13.4	17.6	
			Promedio	51188.0	11.2	11.9	7.0	1.4
	EP – Edge/Corner Placing	Aplicación UPHCMat	Máximo	51744.0	11.3	12.4	8.0	1.7
Mínimo			50632.0	11.1	11.5	6.0	1.2	
CV			1.5	1.1	5.3	20.2	25.5	
			Promedio	51187.8	11.5	12.1	6.6	1.4
Norma		Máximo	51743.5	11.5	12.4	7.4	1.4	
		Mínimo	50632.1	11.5	11.8	5.9	1.3	
		CV	1.5	0.1	3.7	15.6	6.2	
			Promedio	49062.0	10.4	11.2	5.3	1.4
CP – Central Placing		Aplicación UPHCMat	Máximo	52299.0	11.2	12.2	7.7	2.1
	Mínimo		45865.0	9.0	10.3	3.3	0.9	
	CV		6.6	12.0	9.0	42.5	42.4	
			Promedio	49075.3	11.4	10.2	4.4	1.7
	Norma	Máximo	52299.4	12.7	12.5	7.0	1.9	
		Mínimo	45864.6	10.2	7.9	3.0	1.5	
		CV	6.6	11.0	22.2	50.7	11.1	
	Diferencias en %							
	RP: Relación Aplicación/Norma			0.00	-1.14	5.57	22.41	0.17
EP: Relación Aplicación/Norma			0.00	-2.39	-1.85	5.43	3.52	
CP: Relación Aplicación/Norma			0.00	-8.95	9.06	20.00	-16.96	

La Figura 58 muestra las diferencias entre las leyes constitutivas para el promedio de cada condición de hormigonado para vigas en posición horizontal. Debido a la similitud entre los resultados de los dos métodos, se optó por emplear la aplicación para el cálculo de las propiedades de la ley constitutiva en aquellos especímenes que no cumplían los requisitos para el uso de la norma UNE 83519.

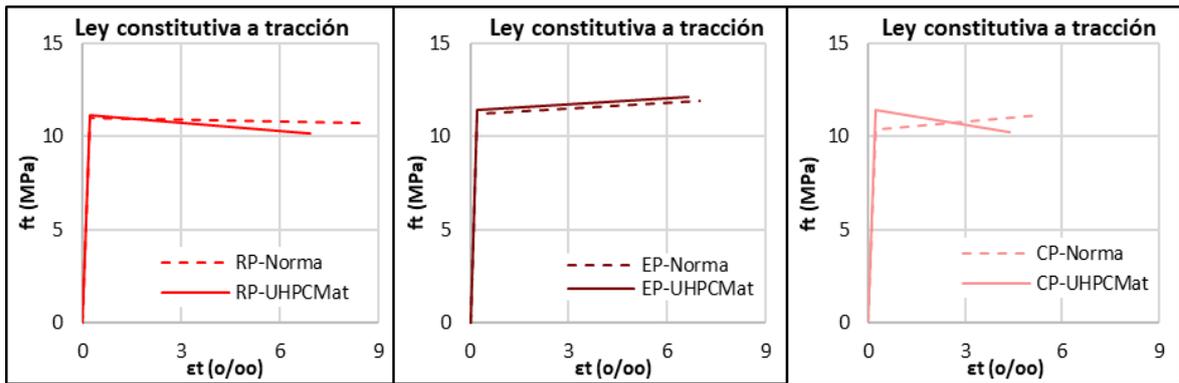


Figura 58: Diferencias entre las leyes constitutivas calculadas con el programa analítico y la norma

4.2.3 Propuesta de coeficiente de orientación

En el capítulo III del Estado del Arte, se abordó sobre como algunas guías o normas proponen el cálculo ω , incluso establecen valores referenciales a tener en cuenta para considerar el efecto de la orientación de las fibras a través de un coeficiente de orientación. Este coeficiente, es empleado para el cálculo estructural de acuerdo con las expresiones que cada documento establece.

Con las propiedades calculadas, se han estimado o propuesto algunos coeficientes de orientación en hormigones de ultra alta resistencia reforzados con fibras, en relación con los métodos de hormigonado. Esta propuesta tiene como fin ser un punto de partida tentativo que se sugiere ampliar según el objetivo de la estructura a diseñar.

Para esto se debe tener en cuenta que la norma PNE 83519 indica que el procedimiento de hormigonado debe ser similar al de la condición RP (con punto de vertido avanzando a lo largo de la probeta). Se considerará este tipo de elementos como referencia o estándar para fines comparativos, cuyo coeficiente de orientación se asignó igual a 1.

Se consideró el cálculo del coeficiente de orientación diferenciando los elementos que trabajan a una y dos direcciones, así como el tipo de elemento y el espesor correspondiente. La Tabla 24 resume los coeficientes tentativos para los siguientes parámetros: f_{tu} , ϵ_{tu} y ω_o .

Tabla 24: Propuesta tentativa de coeficientes de orientación de fibras en función del método de colocación, elemento y espesor

Elemento	Posición	Condición de hormigonado	Espesor (cm)	K - ftu		K - etu		wo - ftu	
				Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
Viga	horizontal	RP - Reference Placing	10	1.00	-	1.00	-	1.00	-
Viga	horizontal	EP - Edge/Corner Placing	10	1.10	-	0.82	-	0.78	-
Viga	horizontal	CP - Central Placing	10	1.04	-	0.62	-	0.78	-
Viga	horizontal	RP - Reference Placing	15	0.72	-	0.54	-	0.89	-
Viga	horizontal	EP - Edge/Corner Placing	15	0.82	-	0.56	-	1.28	-
Viga	horizontal	CP - Central Placing	15	0.80	-	0.41	-	0.61	-
Viga	vertical	HV - High Velocity	10	0.31	-	0.38	-	1.83	-
Viga	vertical	MV - Medium Velocity	10	0.37	-	0.32	-	1.33	-
Viga	vertical	LV - Low Velocity	10	0.38	-	0.16	-	0.89	-
Viga	vertical	HV - High Velocity	15	0.48	-	0.41	-	0.72	-
Viga	vertical	MV - Medium Velocity	15	0.41	-	0.34	-	0.72	-
Viga	vertical	LV - Low Velocity	15	0.56	-	0.35	-	0.61	-
Losa	horizontal	ZP - Zigzag Placing	5	0.95	0.78	0.66	0.19	1.17	1.11
				0.84		0.35		1.11	
Losa	horizontal	EP - Edge/Corner Placing	5	0.87	0.54	0.24	0.16	0.56	1.22
				0.72		0.20		0.89	
Losa	horizontal	CP - Central Placing	5	0.73	0.83	0.87	0.95	0.44	0.89
				0.79		0.92		0.67	

Como era de esperarse, los valores más bajos obtenidos como coeficiente de orientación corresponden a los elementos hormigonados en vertical. Además, también se puede observar el efecto de la orientación de fibras en losas donde el efecto del flujo y el efecto pared influyen en cada tipo de condición de hormigonado.

Aquellas condiciones de hormigonado en las que el flujo se encuentra en dirección del elemento de estudio tienen los valores mayores de coeficiente de orientación.

Por tanto, debido a la variabilidad en los resultados, se confirma la importancia de considerar las condiciones de hormigonado en la orientación de las fibras.

Cabe destacar que esta propuesta es un punto de partida y se sugiere un muestreo más amplio en líneas futuras de investigación. Para uso inmediato, tal como señalan algunos autores, se sugiere realizar pruebas preliminares al hormigonado que simulen las condiciones en las que se realizará el proyecto.

V. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

5.1 Conclusiones

Las principales conclusiones del presente trabajo son:

- Los resultados obtenidos de las propiedades de la ley constitutiva del hormigón son similares al emplear la normativa de ensayo PNE83519 y la aplicación UHPFRMat. Las diferencias en la resistencia a tracción f_t y la resistencia a tracción última es de $\pm 9\%$. En el caso de la deformación ϵ_{tu} y la abertura de fisura w_o obtuvieron una diferencia de alrededor $\pm 20\%$.
- El uso de la aplicación UHPFRMat representa una oportunidad en aquellos elementos en los que la normativa no pueda aplicarse para el cálculo de las propiedades a tracción del hormigón
- Se ha observado una orientación preferente de las fibras en dirección del flujo, lo cual ha sido favorable en aquellos elementos de una dirección (vigas).
- Los especímenes verticales mostraron una rotura frágil en ambos tamaños, evidenciando que existía orientación de las fibras en dirección contraria a las tensiones principales del elemento. En comparación con sus pares horizontales se demostró una menor resistencia a flexión.

- No se encontró una diferencia evidente que pueda relacionar el incremento de velocidad con la orientación de las fibras.
- Las curvas en su mayoría para las distintas condiciones de hormigonado en horizontal presentan un comportamiento de endurecimiento por deformación en tracción a diferencia de las que fueron hormigonadas en vertical.
- Las losas con distintas condiciones de vertido presentan un comportamiento inferior con respecto de las probetas estándar. Esta diferencia alcanzó el 14% en aquellas con hormigonado de punto variable y acompañando y 28% en las que fueron hormigonadas en la esquina y el centro.

5.2 Líneas futuras

- El uso de la aplicación UHPFRCMat representa una oportunidad en aquellos elementos en los que la normativa no pueda aplicarse para el cálculo de las propiedades a tracción del hormigón.
- No se encontraron diferencias importantes en la velocidad de vertido en elementos verticales, por lo que se podría ampliar al respecto. Además, también puede considerarse analizar el factor velocidad en elementos horizontales.
- La influencia de la orientación de las fibras en distintos sectores de la losa puede variar no solo en función de la dirección longitudinal y transversal, sino también en la posición en la que se extrajo cada probeta. Es una oportunidad el poder determinar cómo influye este aspecto en los resultados para los elementos en dos direcciones.
- Se sugiere ampliar el muestreo experimental para complementar o afinar los coeficientes de orientación propuestos.

VI. REFERENCIAS

Referencias

18-710, N. P., 16 April 2016. *National addition to Eurocode 2 — Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC)*. s.l.:French standard.

ACI, A. C. I., 2009. *Report on Fiber Reinforced Concrete*. s.l.:ACI 544.1R.

Alberti, M., Enfedaque, A., Gálvez, J. & Picazo, A., 2020. Recent advances in structural fibre-reinforced concrete focused on polyolefin-based macro-synthetic fibres. *Materialesde Construcción*, 70(337).

Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M. & Amziane, S., 2010. Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material. *Construction and Building Materials*, 24(9), pp. 1664-1671.

Buttignol, T. E., Sousa, J. L. A. O. & Bittencourt, T. N., 2017. Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC): a review of material properties and design procedures. *Revista IBRACON de estruturas e materiais*, Volume 10, pp. 957-971.

Cáceres Vergara, V. et al., 2024. *Laboratorio virtual Universitat Politècnica de València*. [Online]

Available at: <https://labmatlab-was.upv.es/webapps/home/UHPFRCMat.html>

Camacho Torregrosa, E. & Serna Ros, P., 2012. Hormigón de muy alto rendimiento reforzado con fibras (UHPFRC): innovaciones para la transmisión unidireccional de cargas.. *Hormigón y Acero*, 63(264).

Conforti, A., Plizzari, G. & Zerbino, R., 2018. Estudio comparativo de la orientación del refuerzo en losas de hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas y de acero. In: *HAC2018 / V Congreso Iberoamericano de Hormigón*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València., pp. 609-618.

Construction, S. 2., 11 avril 2021. *Composite cimentaire fibré ultra-performant (CFUP) – Matériaux, dimensionnement et exécution*. Version 11 ed. s.l.:s.n.

Cordero Morrobel, H. M., 2015. *APLICACIÓN DE HORMIGÓN DE ULTRA ALTA RESISTENCIA CON FIBRAS DE VIDRIO. CARACTERIZACIÓN DE HORMIGÓN DE ULTRA ALTA RESISTENCIA CON FIBRAS DE VIDRIO*, s.l.: Universidad Politécnica de Valencia.

EHE, 2008. *Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008*. 203,704 ed. s.l.:Comisión Permanente del Hormigón.

Fehling, E., Middendorf, B. & Thiemicke, J., 2024. Ultra-High Performance Concrete and High Performance Building Materials for Sustainability Construction.

Ferrara, L. & Meda, A., 2006. Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements.. *Materials and Structures*, Volume 39, pp. 411-420.

Graybeal, B., 2006. Material property characterization of Ultra-High Performance Concrete.. *Federal Highway Administration FHWA-HRT-06-103*.

HRT-06-103, F., 2006. FHWA HRT-06-103 Material Property Characterization of Ultra-high Performace Concrete.

Interim Recommendations, 2012. *Ultra High Performance Fibre-Reinforced*, Paris: s.n.

Kang, S. T. & Kim, J. K., 2011. The relation between fiber orientation and tensile behavior in an Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRCC).. *Cement and Concrete Research*, 41(10), pp. 1001-1014.

Kang, S. T. & Kim, J. K., 2012. Numerical simulation of the variation of fiber orientation distribution during flow molding of ultra high performance cementitious composites (UHPCC). *Cement and Concrete Composites*, 34(2), pp. 208-217.

Kang, S. T., Lee, B. Y., Kim, J. K. & Kim, Y. Y., 2011. The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 25(5), pp. 2450-2457.

Kang, S. T., Lee, Y., Park, Y. & Kim, J., 2010. Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber. *Composite structures*, 92(1), pp. 61-71.

Kwon, S. H., Kang, S. T., Lee, B. Y. & Kim, J. K., 2012. The variation of flow-dependent tensile behavior in radial flow dominant placing of Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRCC). *Construction and Building Materials*, Volume 33, pp. 109-121.

López Martínez, J. Á., 2012. *Adaptación del Modelo de Comportamiento del Ultra High Performance*, s.l.: Universidad Politécnica de Valencia.

López, J. Á., 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*, Volume 48, pp. 3703-3718.

Mezquida Alcaraz, E. J., Navarro Gregori, J. & Serna Ros, P., 2021. Direct procedure to characterize the tensile constitutive behavior of strain-softening and strain-hardening UHPFRC. *Cement and Concrete Composites*, Volume 115, p. 103854.

Morrobél, H. M. C., 2015. *APLICACIÓN DE HORMIGÓN DE ULTRA ALTA RESISTENCIA CON FIBRAS DE VIDRIO. CARACTERIZACIÓN DE HORMIGÓN DE ULTRA ALTA RESISTENCIA CON FIBRAS DE VIDRIO*, Valencia: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.

Rosario, N. d. J. C., 2021. *Estudio del comportamiento mecánico de hormigones reforzados con macrofibras sintéticassometidos a temperaturas moderadas*, Valencia: s.n.

Schmidt, M. & Fehling, E., 2005. *Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe*. Washington D.C., USA, s.n., pp. 51-78.

Serna Ros, P., López Martínez, J. A. & Camacho Torregosa, E., 2012. *UHPFRC: De los componentes a la estructura..* s.l., s.n.

Sostenible, M. d. T. y. M., 10 de noviembre de 2021. *Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural.*, s.l.: s.n.

Spasojevic, A., 2008. *Structural Implications of Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete in Bridge Design*. Suiza: s.n.

Toutlemonde, F. & Resplendio, J., 2011. *Designing and Building with UHPFRC*. UK and USA: s.n.

UNE 14845-2, 2008. *Fibras para hormigón - Parte1: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad*, s.l.: s.n.

WALRAVEN, J., 2007. *FIBRE REINFORCED CONCRETE: A MATERIAL IN DEVELOPMENT*. Barcelona, s.n.

Wille, K. & P.-M. G. J., 2012. Effect of Beam Size, Casting Method, and Support Conditions on Flexural Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, 109(3), pp. 379-388.

Xu, et al., 2018. Experimental studies and modeling of creep of UHPC. *Construction and Building Materials*.

Yang, I. H., Joh, C. & Kim, B.-S., 2010. Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending. *Engineering Structures*, 32(11), pp. 3478-3487.

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

Yoo, D. Y., Zi, G., Kang, S. T. & Yoon, Y. S., 2015. Biaxial flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with different fiber lengths and placement methods. *Cement and Concrete Composites*, Volume 63, pp. 51-66.

Yu, R., Spiesz, P. & Brouwers, H. J. H., 2014. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Cement and concrete research*, Volume 56, pp. 29-39.

Zerbino, R., Tobes, J. M., Bossio, M. E. & Giaccio, G., 2012. On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites*, Volume 34, pp. 191-200.