

# Study of mechanical behavior of ultra - high performance concrete (UHPC) reinforced with hybrid fibers and with reduced cement consumption

## Estudio del comportamiento mecánico del hormigón de ultra-altas prestaciones (UHPC) reforzado con fibras híbridas y con consumo reducido de cemento

R. Christ \*, F. Pacheco \*, H. Ehrenbring \*, U. Quinino \*, M. Mancio \*, Y. Muñoz \*\*, B.Tutikian <sup>1</sup>\* \*\*

\* Universidade de Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, BRASIL

\*\* Universidad de la Costa, Barranquilla, COLOMBIA

Fecha de Recepción: 07/08/2018

Fecha de Aceptación: 01/01/2019

PAG 159-168

### Abstract

*This article evaluated mechanical behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) reinforced with hybrid steel and polypropylene fibers, with cement consumption of 250 kg/m<sup>3</sup> and application of confining pressure in fresh state. The consistency of the mixture was analyzed, as well as mechanical properties of compressive strength, flexural strength and toughness. The percentages of hybridization were 50 to 100% of metal fibers and 0 to 50% of polypropylene fibers. Results showed that the compressive strength of the composite was 180 MPa (26100 psi), despite its low cement consumption of 250 kg/m<sup>3</sup> (2.08 lb/gal), with 80% steel fibers and 20% polypropylene fibers. The combination of fibers increased the mixture's toughness. For the composition with 80% steel fibers and 20% polypropylene fibers, the strength for large deformations increased by 191% compared with the mixture with 100% steel fibers, pointing out the benefits of hybridization.*

**Keywords:** Ultra-high performance concrete (UHPC), hybrid fibers, low cement consumption, mechanical properties, and toughness

### Resumen

En este trabajo se evaluó el comportamiento mecánico de los hormigones de ultra-altas prestaciones (UHPC) reforzados con fibras híbridas de acero y polipropileno, con un consumo de cemento de 250 kg/m<sup>3</sup> y aplicando una presión de confinamiento en su estado fresco. Se analizó la consistencia de la mezcla, las propiedades mecánicas de las resistencias a la compresión y flexión, así como la tenacidad. Se usaron porcentajes de hibridación del 50 al 100% de fibras metálicas y de 0 al 50% de fibras de polipropileno. Los resultados muestran que la resistencia a la compresión del compuesto fue de 180 MPa (26.100 psi), a pesar de su bajo consumo de cemento, de 250 kg/m<sup>3</sup> (2,08 lb/gal), con 80% de fibras de acero y 20% de fibras de polipropileno. La combinación de fibras incrementó la tenacidad de la mezcla. Para esta misma composición, la resistencia para las grandes deformaciones aumentó en un 191% en comparación con la mezcla que contenía un 100% de fibras de acero, demostrando así los beneficios de la hibridación.

**Palabras clave:** Hormigón de ultra-altas prestaciones (UHPC), fibras híbridas, bajo consumo de cemento, propiedades mecánicas, tenacidad

## 1. Introducción

Se sabe que el hormigón tiene limitaciones respecto de su capacidad para resistir las tensiones de tracción, las que pueden ser compensadas mediante la adición de barras de acero o de fibras y permiten usarlo en muy diversas estructuras (Yoo et al., 2017) (Yu et al., 2015). El desarrollo y uso de materiales estructurales que contribuyen al mejoramiento del comportamiento mecánico se ha vuelto frecuente debido al tipo de estructuras cada vez más atrevidas y exigentes (Chasioti y Vecchio, 2017) (Kang et al., 2016) (Quinino, 2015). Considerando las ventajas obtenidas por este tipo de tecnología, es necesario comprender cabalmente el comportamiento de los elementos y componentes a fin de mejorar su desempeño estructural e incrementar la durabilidad del sistema.

El hormigón de ultra-altas prestaciones (UHPC) ha aparecido como un prometedor material constructivo para el siglo XXI, puesto que se han desarrollado diversos estudios

respecto de su comportamiento estructural y otras características (Yoo et al., 2017) (AFGC 2013) (Guo et al., 2018) (Safdar et al., 2016) (Shin et al., 2017).

Las propiedades mecánicas del UHPC son superiores a las de otros hormigones, superando la resistencia a la compresión de 120 MPa y resistencia a la tracción de 8 MPa, con un consumo de cemento mucho menor al de los hormigones convencionales (Huang et al., 2017).

En cuanto al alto consumo de aglomerantes, el consumo de cemento resulta ser de entre 1100 y 1300 kg/m<sup>3</sup> en la mayoría de los estudios (Torregrosa, 2013). Sin embargo, este alto contenido de cemento no es necesariamente el principal factor que garantiza las propiedades mecánicas del material, las que están relacionadas con otros factores como la baja porosidad, alta compacidad de la mezcla y el uso de refuerzos (Alkaysi et al., 2016) (Christ, 2014) (Wille y Boisvert-Cotulio, 2015). La sustitución de cemento por puzolanas, por ejemplo, ceniza fina, puede otorgarle varios beneficios al hormigón, como alta resistencia a edades avanzadas. Una sustitución por ceniza fina de entre 50 y 60% respecto a la masa de cemento puede mejorar la consistencia de la mezcla, reducir el consumo de agua, mejorar el desempeño debido a la

<sup>1</sup> Autor de correspondencia:

Universidade de Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, BRASIL  
E-mail: bftutikian@unisinos.br



reducción del calor producido por la hidratación del cemento (Wang y Park, 2015).

Estas características mecánicas superiores provienen del empaque de la matriz del UHPC, entre otros factores. El uso de polvos finos de diferente composición granulométrica permite el empaque de las partículas al reducir los vacíos y eliminar la zona de transición interfacial (Torregrosa, 2013). De igual modo, las excelentes resistencias a la tracción y tenacidad de este compuesto provienen principalmente de la adición de fibras a la mezcla. El tipo de fibra usado afecta seriamente el desempeño del material respecto de esas propiedades (Kim et al., 2011). Los hormigones reforzados con fibra presentan un comportamiento pseudo-dúctil característico, mostrando un incremento de la energía requerida para romper el material (Nguyen et al., 2014).

Al agregar más de un tipo de fibra de materiales y tamaños diferentes a la mezcla se mejora la efectividad en prevenir y propagar las grietas en un área sometida a tensiones de tracción. Las fibras más pequeñas previenen las micro grietas, mientras que las fibras más largas obstaculizan la propagación de las grietas cuando éstas tienen una apertura más amplia (Shin et al., 2017) (Chen y Liu, 2005) (Yu et al., 2015).

La introducción de más de un tipo de fibra con características diferentes, ya sea respecto del material o sólo de la forma, produce una ganancia en la energía de fractura. Una matriz con hibridación de las fibras se comporta en forma diferente a una matriz reforzada con un sólo tipo de fibra, que presenta agrietamiento central al ser sometida a una tensión de tracción simple. Sin embargo, la aparición de pequeñas grietas antes del desarrollo de la fisura central se puede apreciar cuando existe más de un tipo de fibra (Yoo et

al., 2017), terminando en la distribución de las tensiones e incremento de la capacidad de carga.

En varias universidades, se han realizado extensas investigaciones sobre el comportamiento mecánico del UHPC, aunque aún falta información importante sobre el desempeño de este compuesto con bajo consumo de cemento y una mezcla híbrida de fibras de acero y polipropileno (Yoo et al., 2017) (Nguyen et al., 2014) (Khan et al., 2017). Buscando investigar y obtener más información sobre el comportamiento mecánico del UHPC para este estudio, se variaron las cantidades de fibras de acero y polipropileno y las mezclas se mantuvieron con un bajo contenido de cemento y con una cantidad de fibras equivalente al 3%.

## 2. Procedimiento experimental

### 2.1 Materiales y dosificaciones

Se definió la dosificación de los materiales considerados de acuerdo a la teoría de empaque de las partículas, según la (Ecuación 1) (Fennis y Walraven, 2012), donde el coeficiente de distribución "q" es igual a 0,20.

$$\frac{APD}{100\%} = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \quad (1)$$

La (Tabla 1) muestra la composición unitaria de los diversos porcentajes de hibridación de las fibras de acero y polipropileno. En la (Tabla 2) se muestra la composición química de los aglomerantes usados.

**Tabla 1.** Dosificación de las mezclas experimentadas (kg/m<sup>3</sup>)

Tipo de mezcla	Cemento	Ceniza fina	Vapores de cilice	Arena #1	Arena #2	Polvo de cuarzo	Fibras de acero	Fibras de Polip.
<b>S0/P100</b>	251.8	107.9	213.9	495.8	583.3	291.7	0	27.29
<b>S50/P50</b>	251.8	107.9	213.9	495.8	583.3	291.7	117.75	13.65
<b>S60/P40</b>	251.8	107.9	213.9	495.8	583.3	291.7	141.3	10.92
<b>S70/P30</b>	251.8	107.9	213.9	495.8	583.3	291.7	164.85	8.19
<b>S80/P20</b>	251.8	107.9	213.9	495.8	583.3	291.7	188.4	5.46
<b>S90/P10</b>	251.8	107.9	213.9	495.8	583.3	291.7	211.95	2.73
<b>S100/P0</b>	251.8	107.9	213.9	495.8	583.3	291.7	235.5	0

**Tabla 2.** Composición química de los aglomerantes

Material	Composición química (%)					
	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Others
<b>Cemento</b>	19.53	63.19	3.91	2.89	1.94	8.58
<b>Vapores de cilice</b>	88.43	0.29	0.32	0.01	0.12	10.83
<b>Ceniza fina</b>	69.3	0.9	26.1	1.8	0.05	1.85

Como aglomerante, además de cemento de alta resistencia inicial, se usó vapores de sílice y ceniza fina de carbón. El cemento, vapores de sílice y ceniza fina tenían áreas superficiales de 4.190 cm<sup>2</sup>/g, 200.000 cm<sup>2</sup>/g y 3.890 cm<sup>2</sup>/g respectivamente. La razón agua-cemento (a/c) fue de 0,45 y la razón agua-aglomerante, de 0,20.

Las arenas usadas estaban libres de materias orgánicas. La arena N°1 tenía un módulo de fineza de 2,36 y la arena N°2 de 2,42. Se agregó polvo de cuarzo a la mezcla durante el desarrollo del UHPC debido a la distribución extremadamente fina del tamaño del grano, con un diámetro de partículas menor a 74 µm. El uso de estos agregados de diferentes tamaños produjo un mejor empaque de las

partículas y redujo los vacíos provocados por la compactación de los granos.

Se tuvo que agregar un superplastificante en base a policarboxilato debido al contenido de finos de la mezcla y a la baja razón agua-aglomerante. La densidad del aditivo fue de 1,12 g/cm<sup>3</sup> y su dosificación se fijó como una función del asentamiento de la mezcla, fijada en un 3% de aditivo con respecto a la masa de aglomerante.

La (Figura 1) representa las fibras usadas en la experiencia y sus propiedades se encuentran descritas en la (Tabla 3). Se adoptó un contenido total de fibras del 3% respecto del volumen total de la mezcla.

**Tabla 3.** Propiedades de las fibras usadas en el estudio

Propiedad	Acero	Polipropileno
Diametro	0.21 mm	12 µm
Longitud	13 mm	6 mm
Factor de forma	62	500
Resistencia a la tracción	2750 N/mm <sup>2</sup>	500-700 N/mm <sup>2</sup>
Modulos elasticos	200 GPa	5 GPa
Densidad	7.8 g/cm <sup>3</sup>	0.91 g/cm <sup>3</sup>



**Figura 1.** Fibras usadas en el estudio

Las mezclas se sometieron al mismo proceso de colado; todos los elementos fueron premezclados y luego, colocados en una mezcladora de eje vertical. A continuación, se agregó el 90% del agua y el superplastificante hasta formar una mezcla altamente viscosa. La mezcladora se hizo funcionar a una velocidad de 140 rpm durante 12 minutos. Una vez que la mezcla alcanzó una alta viscosidad, se agregaron las fibras y el resto del agua y se mezcló durante otros 3 minutos.

## 2.2 Métodos de ensayos

Las evaluaciones realizadas en este trabajo se hicieron de acuerdo a métodos estandarizados, buscando alcanzar los objetivos establecidos en ellos.

### 2.2.1 Consistencia

Se evaluó la consistencia del compuesto usando la norma ASTM C1437. Este ensayo analiza la mezcla midiendo su asentamiento horizontal después de ser moldeado en forma de cono y sometido a impactos continuos una vez removido el cono, como se aprecia en la (Figura 2).



Figura 2. Ensayo de asentamiento del cono para evaluar la consistencia del UHPC

### 2.2.2 Ensayo a la compresión axial

Para los ensayos a la compresión axial, se moldearon probetas cilíndricas de 50 x 100 mm (1,96 x 3,94 pulg), usando moldes que permitieran aplicar una presión de confinamiento cuando la mezcla aún se encontrara en estado fresco. Aunque no se compactó el material, las probetas se mantuvieron bajo una presión de confinamiento de 20 MPa (2900 psi) durante un periodo de 24 horas, a una temperatura de  $21 \pm 2^\circ\text{C}$  y a una humedad relativa de  $65 \pm 10\%$ .

Las muestras se desmoldaron y sometieron a un curado de 12 horas, a  $90^\circ\text{C}$ , con una humedad relativa del 100%. El curado térmico del UHPC afecta a los productos de hidratación que se forman tempranamente y además, acelera las reacciones puzolánicas en el polvo de cuarzo a los  $90^\circ\text{C}$  (Richard y Cheyrezy 1995) (Kang et al. 2018). A esta temperatura, las reacciones de hidratación se aceleran, generando rápidamente el hidróxido de calcio consumido por las puzolanas, produciendo nuevos cristales hidratados (Yazici et al. 2013). Por lo tanto, se produce la transformación de los hidratos amorfos en hidratos cristalinos, haciendo que el UHPC alcance resistencias altas, ya que contiene gran parte de materiales cementicios suplementarios (SCM).

Posteriormente, las probetas se colocaron en un ambiente de humedad controlada al  $65 \pm 10\%$  y temperatura de  $21 \pm 2^\circ\text{C}$ . Los ensayos de compresión axial se practicaron a tres probetas de cada tipo de composición según las especificaciones de la norma ASTM C39M.

### 2.2.3 Ensayo de resistencia a la flexión

Para determinar la resistencia a la flexión y la tenacidad, se usaron probetas prismáticas metálicas de 40 x 40 x 160 mm (1,57 x 1,57 x 6,30 pulg) que permitían aplicar la misma presión de confinamiento aplicada a las muestras cilíndricas en estado fresco. Se determinó la resistencia a la flexión equivalente según la norma ASTM C78M y los índices de tenacidad se obtuvieron de acuerdo a la ASTM C1609. Se usó el índice I de la mezcla para determinar el índice de tenacidad, que corresponde a la división del valor obtenido para el área total bajo la curva carga-desviación por el área hasta el punto cuyo desplazamiento se asocia a la aparición de la primera grieta. Estos ensayos también requieren el uso de tres probetas para cada mezcla.

### 2.2.4 Índice de tenacidad

Para incrementar la confiabilidad del trazado de las curvas carga-desplazamiento, se controló el desplazamiento con un Transductor Diferencial Variable Lineal (LVDT) conectado a un computador dentro de un sistema de circuito cerrado, que registraba la deformación vertical y el comportamiento del material. Se controló el desplazamiento durante la aplicación de la carga y los valores muestran un incremento vertical a medida que aumenta la deformación de las probetas de ensayo. La (Figura 3) representa el sistema usado para determinar la tenacidad de las muestras analizadas, considerando cuatro muestras para cada composición.

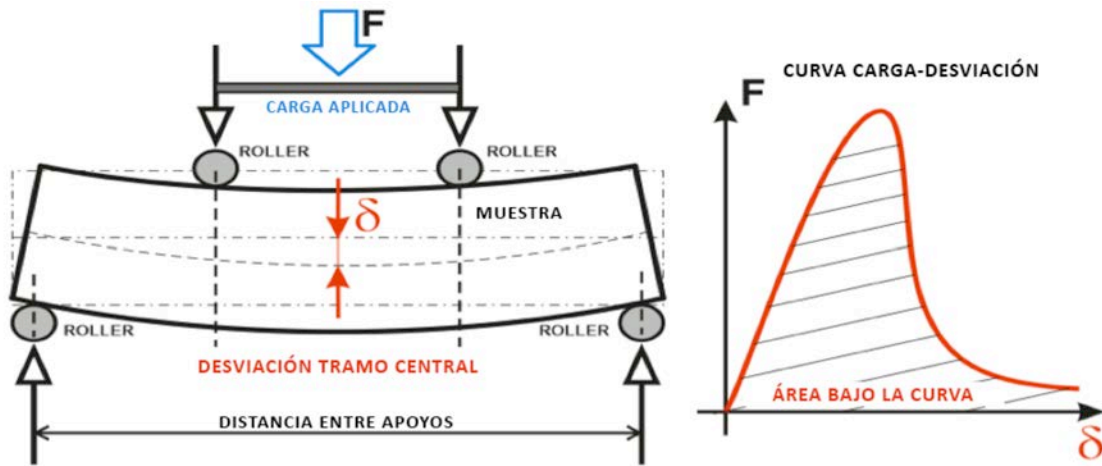


Figura 3. Esquema de la instrumentación de los puntos de medición del desplazamiento para las probetas sometidas a los ensayos de flexión

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1 Consistencia de la mezcla

Se evaluó el comportamiento reológico de diversas dosificaciones de UHPC y los resultados se presentan en la (Tabla 4).

Tabla 4. Flujo de asentamiento de las mezclas híbridas

	S0/P100	S50/P50	S60/P40	S70/P30	S80/P20	S90/P10	S100/P0
Propagación (mm)	210	216	219	218	220	221	240

Se redujo la consistencia de la matriz a medida que se agregaban más fibras debido al incremento de la consistencia, que está influenciada por la ganancia de fricción interna entre los componentes, un hecho que se relaciona con la forma y área superficial de las fibras. Además, las fibras metálicas afectan la consistencia de la mezcla, haciendo necesario determinar un porcentaje máximo de fibras que pueden ser agregadas a la matriz (Rydval et al. 2016).

La gran área superficial de las fibras, especialmente de aquellas de polipropileno, aumenta la fricción entre una y otra fibra y entre las fibras y otros materiales, lo que restringe la fluidez y movilidad de la mezcla. Como las fibras de polipropileno son más pequeñas que las fibras de acero – por ejemplo, el diámetro de una fibra polimérica es casi 95% menor que el de las fibras de acero – el compuesto resultante tiene mayor concentración de fibras (casi 1,62 millones de fibras por kg, según el fabricante), lo que produce áreas específicas mayores (366m<sup>2</sup>/kg aprox.). Al igual que la interface agregado-pasta, existe una zona de transición en la

interface fibra-matriz en la que una capa de agua es absorbida por la superficie de las fibras. La reducción de agua libre en la mezcla reduce el espacio entre las partículas de concreto fresco, afectando negativamente la fluidez.

Al comparar la consistencia de las mezclas con mayor cantidad de fibras de polipropileno (S100/P0) con una sin fibras de polipropileno (S0/P100) se aprecia que las aberturas del compuesto se reducen en un 87,5%. Cabe señalar que la consistencia del UHPC estaba deteriorada debido a la tasa agua/aglomerante y al alto contenido de fibras. Por último, el material mostró una fluidez relativa alta, a pesar de presentar un comportamiento no Newtoniano tras la aplicación de energía (Martinie et al. 2010).

#### 3.2 Resistencia mecánica

La (Figura 4) muestra los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión para las diferentes mezclas de fibras. Estos valores corresponden a la media aritmética de cuatro muestras para cada mezcla.



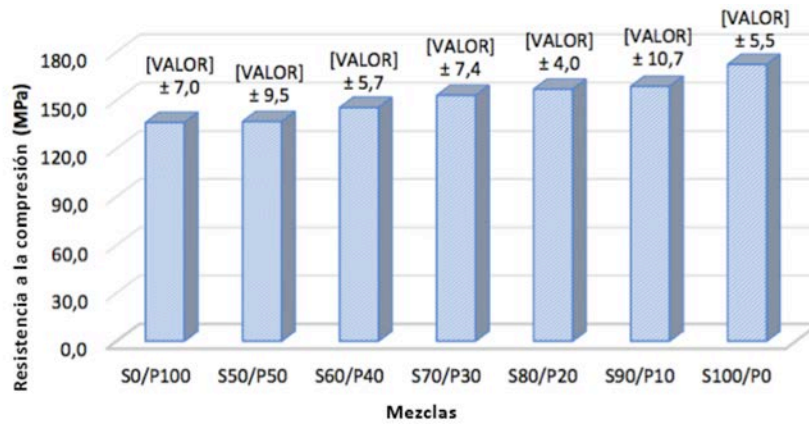


Figura 4. Resistencia a la compresión de las muestras híbridas y de referencia

En general, la resistencia a la compresión de los compuestos no se ve influenciada significativamente por la adición de fibras, que tiene poca relevancia para el hormigón reforzado con fibras (Walraven 2009). Sin embargo, la resistencia a la compresión puede sufrir ligeros aumentos debido a la cantidad y forma de las fibras, a pesar de que el aumento más significativo se debe a la cantidad más que a la forma. Generalizando, los cambios no son realmente significativos en términos de los valores de resistencia del concreto. Como se puede observar en la (Figura 4), la resistencia a la compresión aumenta a medida que el porcentaje de fibras de acero en la mezcla híbrida aumenta por sobre el 50% y se reduce la cantidad correspondiente de fibras de polipropileno. A mayor cantidad de fibras de acero, la resistencia a la compresión tiende a ser mayor, considerando la cantidad óptima de fibras que es compatible con las propiedades de la matriz y este elemento de refuerzo. Las muestras que contenían solo microfibras de acero dieron resistencias a la compresión un 26% mayor que las muestras que contenían sólo microfibras de polipropileno. Cabe señalar que la resistencia a la compresión depende principalmente de las propiedades de la matriz cementicia y las fibras actúan únicamente en la etapa post agrietamiento.

A pesar de que algunos estudios han informado sobre las ventajas del uso de microfibras aisladas de polipropileno, es notable la mayor sinergia de su uso híbrido con

microfibras metálicas (Wang 2012). Según (Ren et al. 2018) no existen daños ni beneficios en la resistencia a la compresión debido al tamaño reducido de las microfibras metálicas.

(Wu et al. 2017) analizaron la hibridación de las fibras y diversos tamaños de los mismos materiales y obtuvieron resultados diferentes de los de este estudio. En cuanto a la forma, los mejores resultados se relacionan con la hibridación de las fibras y superó a las mezclas con sólo fibras largas y con sólo fibras cortas. Los autores también observaron los mismos resultados en la resistencia a la flexión. (Yoo et al. 2017) usaron fibras metálicas de diversos tamaños y agregaron fibras medianas además de fibras cortas y largas, por consiguiente, notaron que las mezclas híbridas entregaban valores más altos que las mezclas con sólo un tamaño del material.

### 3.3 Índice de tenacidad

El comportamiento de las muestras reforzadas con fibras híbridas fue bastante satisfactorio en términos de tensión de tracción y de flexión. Para determinar la tenacidad se usaron las curvas carga-deformación de los ensayos de resistencia a la flexión. Luego, se trazó un gráfico carga-desplazamiento para cada una de las mezclas de las fibras híbridas bajo análisis y sus valores potenciales se muestran en la (Figura 5).

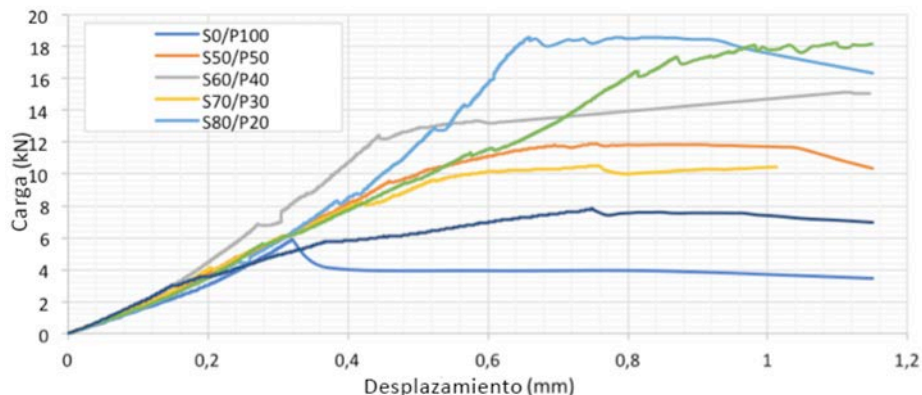


Figura 5. Curvas carga-desplazamiento para cada mezcla de fibras híbridas

Los compuestos reforzados con un sólo tipo de fibra no muestran un incremento en la tenacidad ni en la capacidad de carga. Cabe destacar que al hibridar las fibras de la mezcla se dobla la capacidad de carga de las vigas ensayadas, en comparación con las muestras reforzadas con fibras no hibridadas (S0/P100 and S100/P0). La deformación total máxima también difiere significativamente entre las muestras ensayadas, ya que en ciertos casos – las mezclas S80/P20 y S90/P10 – la deformación máxima alcanzó los 1,6mm (0,06 pulg). Como se aprecia en la (Figura 5), cada muestra exhibe un comportamiento elástico lineal en la etapa inicial, con capacidad de soporte y de desplazamiento variando de acuerdo a cada razón de mezcla de los materiales. Existe una diferencia significativa respecto de la

energía de ruptura de cada compuesto. Las muestras que mostraron mayor tenacidad son aquellas preparadas con fibras híbridas, mezcladas con las siguientes dosificaciones: 80% a 90% de fibras de acero y 20% a 10% de fibras de polipropileno (muestras S80/P20 y S90/P10), respectivamente.

(Thomas y Sorensen 2017) informan sobre la disminución de la carga máxima y altas deformaciones al hibridar con diferentes microfibras metálicas. Esos resultados concuerdan con los de esta investigación.

Los índices de tenacidad para las mezclas reforzadas con fibras se calcularon de acuerdo a las curvas carga-desplazamiento y se mencionan en la (Tabla 5).

**Tabla 5.** Índices de tenacidad para los compuestos ensayados

Índice de resistencia a la flexión	S0/P100	S50/P50	S60/P40	S70/P30	S80/P20	S90/P10	S100/P0
<b>I<sub>5</sub> (0.286)</b>	0.28 ± 0.02	0.34 ± 0.03	0.23 ± 0.06	0.33 ± 0.09	0.38 ± 0.01	0.37 ± 0.04	0.25 ± 0.03
<b>I<sub>10</sub> (0.572)</b>	1.57 ± 0.08	2.38 ± 0.09	2.32 ± 0.12	3.42 ± 0.19	2.81 ± 0.16	2.44 ± 0.22	1.94 ± 0.25
<b>I<sub>20</sub> (0.858)</b>	-	5.69 ± 0.12	6.31 ± 0.27	8.00 ± 0.32	7.72 ± 0.35	6.17 ± 0.39	4.11 ± 0.42
<b>I<sub>30</sub> (1.144)</b>	-	9.18 ± 0.13	10.16 ± 0.12	8.48 ± 0.21	13.98 ± 0.24	11.08 ± 0.14	6.43 ± 0.15
<b>I<sub>40</sub> (1.43)</b>	-	12.28 ± 0.16	13.44 ± 0.18	11.49 ± 0.19	18.09 ± 0.27	16.01 ± 0.35	8.58 ± 0.11

Se usaron los Índices I<sub>5</sub>, I<sub>10</sub>, I<sub>20</sub>, I<sub>30</sub>, y I<sub>40</sub> para calcular el factor de tenacidad. Por esta razón, estos cinco Índices eran múltiplos de una deformación de 0,286mm (0,01pulg), valor considerado como el más cercano a la mayoría de las mezclas ensayadas.

Se usaron los Índices I<sub>5</sub>, I<sub>10</sub>, I<sub>20</sub>, I<sub>30</sub>, y I<sub>40</sub> para determinar las tasas de tenacidad entre los índices de referencia de cada compuesto. La (Tabla 6) resume la tasa del porcentaje resultante de la relación entre la capacidad de carga de desplazamiento y la capacidad de carga cuando aparece la primera grieta.

**Tabla 6.** Índices de tenacidad para cada compuesto

a) Relaciones de resistencia entre los límites de deflexión- en secuencia.

Resistencia residual factor R (%)	Mezclas						
	S0/P1000	S50/P50	S60/P40	S70/P30	S80/P20	S90/P10	S100/P0
<b>R<sub>5-10</sub></b>	25.8 ±	40.8 ±	41.8 ±	61.8 ±	48.6 ±	41.4 ±	33.8 ±
	1.4	1.7	1.9	3.6	1.2	1.9	2.1
<b>R<sub>10-20</sub></b>	-	33.1 ±	39.9 ±	45.8 ±	49.1 ±	37.3 ±	21.7 ±
		1.7	1.4	2.9	2.5	1.7	1.8
<b>R<sub>20-30</sub></b>	-	34.9 ±	38.5 ±	4.8 ±	62.6 ±	49.1 ±	23.2 ±
		2.3	1.8	2.4	1.7	2.3	2.9
<b>R<sub>30-40</sub></b>	-	31.0 ±	32.8 ±	30.1 ±	41.1 ±	49.3 ±	21.5 ±
		3.5	1.8	2.5	3.5	4.1	1.8

b) Relaciones de resistencia de los índices  $I_{10}$ ,  $I_{20}$ ,  $I_{30}$ , and  $I_{40}$  en relación con el primer índice  $I_5$

Resistencia residual factor R (%)	Mezclas						
	S0P/100	S50/P50	S60/P40	S70/P30	S80/P20	S90/P10	S100/P0
<b>R<sub>5-10</sub></b>	25.8 ±	40.8 ±	41.8 ±	61.8 ±	48.6 ±	41.4 ±	33.8 ±
	1.4	1.7	1.9	3.6	1.2	1.9	2.1
<b>R<sub>5-20</sub></b>	-	35.67 ±	40.53 ±	51.13 ±	48.93 ±	38.67 ±	25.73 ±
		3.1	1.8	3.9	1.6	2.2	2.6
<b>R<sub>5-30</sub></b>	-	35.36 ±	39.72 ±	32.6 ±	54.4 ±	42.84 ±	24.72 ±
		2.9	2.5	2.7	3.6	4.9	2.7
<b>R<sub>5-40</sub></b>	-	34.11 ±	37.74 ±	31.89 ±	50.6 ±	44.69 ±	23.8 ±
		3.7	2.7	3.7	2.2	2.9	3.5

Gráficamente, la (Tabla 6) muestra las diferencias entre las relaciones de tenacidad para cada mezcla y la comparación con las demás. Después de determinar las áreas bajo las curvas, es posible observar que los índices de tenacidad varían expresivamente debido a las diferentes mezclas de fibras, aunque los valores de energía para las mezclas S80P20 y S90P10 fueron similares entre sí. Para la

mezcla S0P100, con 100% de fibras de polipropileno, no fue posible determinar la energía absorbida por la muestra para las deformaciones altas, mostrando la incapacidad de esta fibra para evitar la propagación de la grieta porque posee una rigidez geométrica y física que es incompatible con las propiedades de los constituyentes de la matriz. La mezcla que mostró el mejor comportamiento fue aquella con un



SPANISH VERSION.....

refuerzo de 80% de fibra de acero y 20% de fibra de polipropileno (S80/P20), ya que las relaciones de tenacidad para este material son sorprendentemente más altas que los valores encontrados para otras composiciones híbridas, alcanzando ganancias de tenacidad por sobre el 60%, seguido por el compuesto híbrido S90/P10, con una capacidad de carga de aproximadamente 49%. El compuesto S70/P30 mostró la mayor ganancia en tenacidad para los primeros índices de tenacidad, pero esta ganancia no fue relevante para los índices siguientes.

## 4. Observaciones finales

En base a los resultados obtenidos por los ensayos de las muestras de hormigón reactivo en polvo reforzado con fibras híbridas de acero-polipropileno y con consumo reducido de cemento, en términos de la resistencia a la compresión, tenacidad y energía de fractura, además de su consistencia en estado fresco, se puede concluir que:

Agregar grandes cantidades de fibras de polipropileno a la mezcla perjudica su consistencia. La alta concentración de estas fibras hace que la mezcla sea más cohesiva puesto que favorece la fricción interna y contribuye al contacto entre ellas mismas y los demás constituyentes del compuesto, estorbando en la fluidez y la movilidad.

La presencia de fibras de acero en la mezcla mejora el comportamiento del UHPC en términos de la resistencia a la compresión sin comprometer las propiedades de la matriz.

La combinación estratégica de las fibras de acero y polipropileno favorece el incremento de la tenacidad para

todos los porcentajes ensayados. La sinergia que surge por la introducción de dos tipos de fibras, que operan en etapas y regiones diferentes dentro de la matriz incrementa la capacidad de carga del material. Al inicio, cuando sólo existen micro grietas en la matriz, la presencia de las fibras de acero casi no tiene efecto y la eficiencia de las fibras de polipropileno es bastante limitada, volviéndose activas a medida que las micro grietas empiezan a unirse para formar grietas más definidas. Las fibras metálicas juegan un rol crucial en la propagación de la grieta, aumentando el calibre de la carga y favoreciendo el reforzamiento de la matriz, incrementando así la resistencia a la propagación de la grieta.

Al hibridar la cantidad de fibras de acero en un 80% y 90%, y las fibras de polipropileno en un 20% y 10%, respectivamente, se incrementa la tenacidad del material reforzado para los desplazamientos mayores. La capacidad de carga de la mezcla S80/P20 se duplicó en más del doble en comparación con las mezclas no hibridadas, incluso para los límites de deflexión 5,5 veces por sobre la deformación obtenida hasta la aparición de la primera grieta. De manera similar, el compuesto S90/P10 presentó una energía de fractura muy alta, demostrada por su tenacidad aumentada en el rango de deflexión final (15,5 veces el desplazamiento al inicio del agrietamiento).

Por último, los hallazgos muestran que la hibridación de dos tipos de fibra, acero y polipropileno, aumenta significativamente la tenacidad del material, como lo informó (Lawler et al. 2002). Claramente, las propiedades mecánicas del UHPC con fibras híbridas resulta ser superior al UHPC reforzado sólo con un tipo de fibra, especialmente en términos de mayor de resistencia a la flexión y a la tenacidad.

## 9. Referencias

- AFGC.** Documents scientifiques et techniques Bétons fibrés à ultra-hautes performances - recommandations. (E. Révisée, Ed.)France: 2013
- Alkaysi, M. et al (2016)** Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC) Michigan.
- ASTM C1437 (2013)** Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. ASTM C1437. Book of Standards volume, 04.01. Philadelphia, 2013.
- ASTM C39M-14a (2014)** Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical concrete Specimens. ASTM C39M-14a. Book of Standards volume, 04.02. Philadelphia, 2014.
- ASTM C78M-10e1 (2013)** Standard Test Method for flexural Strength of concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM C78M-10e1. Book of Standards volume, 04.02. Philadelphia, 2013.
- ASTM C 1609 (2012)** Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete. ASTM C 1609. Book of ASTM Standards. Philadelphia, 2012.
- Chasioti, S. G.; Vecchio, F. J (2017).** Shear behavior and crack control characteristics of hybrid steel fiber-reinforced concrete panels. *ACI Structural Journal*, 114 (1): 209–220, doi: 10.14359/51689164
- Chellapandian, M.; Suriya Prakash, S.; Sharma, A (2017).** Strength and ductility of innovative hybrid NSM reinforced and FRP confined short RC columns under axial compression. *Composite Structures*, 176: 205–216.
- Chen, B.; Liu, J. (2005)** Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability. *Cement and Concrete Research*, 35 (5): 913–917, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.07.035
- Christ, R (2014).** Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós-reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental São Leopoldo: Universidade do Vale dos Sinos- UNISINOS.
- Fennis, S.A.A.M; Walraven, J.C (2012).** Using particle packing technology for sustainable concret mixture design. *Heron*, 57, (2).
- Guo, W; Fan, W; Shao, X; Shen, D; Cheng, B (2018)** Constitutive model of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete for low-velocity impact simulations. *Composite Structures*, 185: 307–326, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.11.022
- Huang, W; Kazemi-Kamyab, H; Sun, W; Scrivener, K (2017).** Effect of cement substitution by limestone on the hydration and microstructural development of ultra-high performance concrete (UHPC). *Cement and Concrete Composites*, 77: 86–101, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2016.12.009.
- Kang, S. H; Hong, S. G; Moon, J (2018)** Shrinkage characteristics of heat-treated ultra-high performance concrete and its mitigation using superabsorbent polymer based internal curing method. *Cement and Concrete Composites*, 89: 130-138, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.03.003
- Kang, S. T; Choi, J; Koh, K.T; Lee, K.S; Lee, B.Y. (2016)** Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high



- performance concrete. *Composite Structures*, 145: 37–42, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.02.075
- Khan, M. I.; Abbas, Y. M.; Fares, G (2017).** Review of high and ultrahigh performance cementitious composites incorporating various combinations of fibers and ultrafines. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 29 (4): 339–347.
- Kim, D. J; Park, S.H; Ryu, G.S; Koh, K.T (2011)** Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers. *Construction and Building Materials*, 25 (11): 4144–4155, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.051
- Martinie, L.; Rossi, P.; Roussel, N. (2010)** Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. *Cement and Concrete Research*, 40 (2): 226–234, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.08.032
- Nguyen, D. L; Ryu, G.S; Koh, K.T; Kim, D.J (2014)** Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*, 58.: 279–292, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.10.072
- Quinino, U. C. DE M. (2015)** Investigación experimental das propiedades mecánicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras. [s.l.] Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.
- Ren, G.M; Wu, H; Fang, Q; Liu, J.Z (2018)** Effects of steel fiber content and type on dynamic compressive mechanical properties of UHPCC. *Construction and building materials*, 164: 29-43, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.203
- Richard, P; Cheyrezy, M (1995)** Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25: 1501-1511, doi: 10.1016/0008-8846(95)00144-2.
- Rydval, M; Bittner, T; Kolisko, J; Nenaálová, S. (2016),** Impact of Steel Fibers on Workability and Properties of UHPC, *Solid State Phenomena*, 249: 57-61, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.249.57
- Sáidar, M.; Matsumoto, T.; Kakuma, K (2016).** Flexural behavior of reinforced concrete beams repaired with ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). *Composite Structures*, 157: 448–460, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.09.010
- Shin, H.-O.; Min, K.-H.; Mitchell, D. (2017)** Confinement of ultra-high-performance fiber reinforced concrete columns. *Composite Structures*, 176: 124–142, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.05.022.
- Torregrosa, E. C (2013).** Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties. [s.l.] Valencia, Universitat Politècnica de València.
- Thomas, R. J.; Sorensen, A. D (2017).** Review of Strain Rate Effects for UHPC in Tension. *Materials Journal*, 153: 846–856.
- Wang, H.W (2012)** Effect of Polypropylene Fiber on Strength and Flexural Properties of Concrete Containing Silica Fume, *Advanced Materials Research*, 346: 30-33, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.346.30
- Wang, X.-Y.; Park, K.-B (2015).** Analysis of compressive strength development of concrete containing high volume fly ash. *Construction and Building Materials*, 98: 810–819, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.099
- Walraven, J. C (2009).** High performance fiber reinforced concrete: progress in knowledge and design codes. *Materials and Structures*, 42 (9): 1247–1260, doi: 10.1617/s11527-009-9538-3.
- Wille, K.; Boisvert-Cotulio, C. (2015)** Material efficiency in the design of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 86: 33–43, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.087.
- Wu, Z; Shi, C; He, W; Wangm, D. (2017)** Static and dynamic compressive properties os ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fibers reinforcements. *Cement and concrete composites*, 79: 148-157, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.02.010
- YAZICI, H; DENIZ, E; BARADAN, B (2013)** The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 42: 53–63, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.003
- YOO, D. Y; KIM, S; PARK, G; PARK, J.J; KIM, S.W.(2017)** Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites. *Composite Structures*, 174: 375–388, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.04.069
- YOO, D. Y.; KIM, S. W.; PARK, J. J (2017).** Comparative flexural behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers. *Construction and Building Materials*, 132: 219–229, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.104.
- YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H (2015a).** Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Cement and Concrete Composites*, 55:383–394, doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.09.024
- YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. (2015b)** Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards an efficient utilization of binders and fibres. *Construction and Building Materials*, 79: 273-282, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.050.