



# **Efecto de la mezcla de micro-fibras y macro-fibras poliméricas en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC**

**ANDRÉS LEONARDO NEIRA MEDINA**

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría en Ingeniería Civil - Estructuras

Bogotá D.C. Colombia  
2020

# **Efecto de la mezcla de micro-fibras y macro-fibras poliméricas en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC**

**ANDRÉS LEONARDO NEIRA MEDINA**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería Civil con Énfasis en Ingeniería Estructural**

Director:

Joaquín Abellán García, I.C., MSc, PhD(c)

Codirectora:

Nancy Torres Castellanos, I.C., MSc, PhD

Línea de Investigación:

Materiales de Construcción

Grupo de Investigación:

Estructuras y Materiales

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría en Ingeniería Civil - Estructuras

Bogotá D.C. Colombia

2020

La tesis de maestría titulada “**Efecto de la mezcla de micro-fibras y macro-fibras poliméricas en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC**”, presentada por el ingeniero **Andrés Leonardo Neira Medina**, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras otorgado por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

---

Director de la tesis

**Joaquín Abellán García, I.C, MSc, PhD(c)**

---

Codirectora de la tesis

**Nancy Torres Castellanos, I.C, MSc, PhD**

---

Jurado

**Diana Marcela Burgos Galindo, I.C, MSc, PhD**

---

Jurado

**Ricardo Matallana Rodríguez, I.C, Esp**

Bogotá D.C. 28 Julio de 2020.

*Dedico el presente trabajo a mi familia.  
Especialmente a mi madre por su  
compañía y apoyo. A mi hermano por su  
esfuerzo y dedicación al brindarme la  
oportunidad de estudiar Ingeniería Civil.*



## **Agradecimientos**

A Dios por todas las oportunidades que me ha dado y permitirme culminar satisfactoriamente este logro en mi formación; a mi familia por el apoyo y la comprensión que siempre me han brindado en cada meta a la que me he propuesto.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería por su apoyo a través de los proyectos de convocatoria interna de investigación en materiales, en especial al personal del Laboratorio de Estructuras y Materiales, María Isabel Espejo, Ramón Torres y Jairo Páez quienes siempre estuvieron prestos a colaborar en cada una de las actividades del proyecto.

Al ingeniero Joaquín Abellán García por haber depositado su confianza en mí, por haberme hecho parte de su investigación en concretos de ultra altas prestaciones para optar al título de Doctor en Ingeniería y por haber estado siempre apoyándome en el desarrollo de la investigación con su acompañamiento y asesoría; a la ingeniera Nancy Torres por su orientación y valiosos aportes en la investigación; al ingeniero Camilo José Vega, por su gran amistad y apoyo.

Finalmente, a Cementos Argos SA por donar el cemento y la mayor parte de las fibras utilizadas en la investigación descrita en este documento; a Euclid Chemical Toxement por donar el humo de sílice, el superplastificante y las macro-fibras Tuf Strand; a Cristalería Peldar por el suministro del vidrio reciclado y; a Colombia Minerales Industriales SAS por el suministro de la arena fina silícea.

## Resumen

El avance constante de la ciencia y la tecnología ha permitido el desarrollo de concretos especiales como los concretos de ultra altas prestaciones (UHPC, por sus siglas en inglés). Para contrarrestar la fragilidad de estos concretos, y a su vez, para mejorar las condiciones mecánicas del mismo es habitual la incorporación de fibras, generando así los concretos de ultra altas prestaciones reforzados con fibras (UHPFRC, por sus siglas en inglés). El UHPFRC es un material que tiene mayor durabilidad, ductilidad, resistencia y tenacidad debido a su baja porosidad y la densificación de su matriz, en comparación a un concreto convencional o un concreto reforzado con fibras (FRC, por sus siglas en inglés). La adición de fibras a la matriz densificada permite desarrollar un comportamiento aceptable a tracción directa y a flexión. A través del tiempo las investigaciones relacionadas con el comportamiento de los UHPFRC han coincidido en que la mezcla híbrida de fibras, permite optimizar las prestaciones mecánicas de este material compuesto. No obstante, las investigaciones también han evidenciado que la incorporación de fibras metálicas a la matriz incrementa notablemente el costo inicial del UHPFRC, junto con las altas dosificaciones de cemento y humo de sílice requeridas para obtener una matriz densa. En consecuencia, el alto costo, la reciente incursión del material y la falta de lineamientos que indiquen sus parámetros de diseño estructural han limitado el desarrollo y la aplicabilidad del UHPFRC en Latinoamérica.

Conscientes de esta problemática en el presente documento se exponen los resultados de un proyecto de investigación donde se evaluó el efecto de la mezcla de micro-fibras y macro-fibras poliméricas en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC. Fue necesario y pertinente desarrollar un programa experimental para evaluar el comportamiento del UHPFRC reforzado con fibras poliméricas.

En el programa experimental se elaboraron 36 dosificaciones, con las cuales se buscaba demostrar que el comportamiento a flexión y compresión de los UHPFRC reforzados con fibras poliméricas puede ser similar o mejor en algunos casos, al comportamiento a flexión

y compresión de los UHPFRC reforzados con micro-fibras metálicas. Las dosificaciones presentaron las siguientes variables y proporciones de fibras:

- 2 dosificaciones de UHPC fueron elaboradas para lograr el flujo estático adecuado de la mezcla patrón.
- 2 dosificaciones de UHPFRC fueron reforzadas con 1 o 2% de micro-fibras metálicas (OL 13/.20) en volumen. Estas dosificaciones permitieron comparar los resultados obtenidos por las dosificaciones de UHPFRC reforzadas con fibras poliméricas con igual contenido de fibras en volumen.
- 32 dosificaciones de UHPFRC fueron reforzadas con micro y/o macro fibras poliméricas. El material de las micro-fibras (mF) fue nylon o polivinilo de alcohol y el material de las macro-fibras (MF) fue polipropileno o una mezcla entre polipropileno y polietileno. La proporción de fibras poliméricas en volumen fue el siguiente:

1.0% de fibras en volumen	2.0% de fibras en volumen
2 mezclas con (1% - mF)	2 mezclas con (2% - mF).
4 mezclas con (0.75% - mF y 0.25% - MF)	4 mezclas con (1.5% - mF y 0.5% - MF)
4 mezclas con (0.5% - mF y 0.5% - MF)	4 mezclas con (1% - mF y 1% - MF)
4 mezclas con (0.25% - mF y 0.75% - MF)	4 mezclas con (0.5% - mF y 1.5% - MF)
2 mezclas con (1% - MF)	2 mezclas con (2% - MF)

Los resultados permitieron observar que las probetas de UHPFRC reforzadas con 1.5 o 2% de macro-fibras poliméricas en volumen, presentaron un comportamiento a flexión sobresaliente. Incluso fue similar al comportamiento a flexión de las probetas reforzadas con 1 o 2% de micro-fibras metálicas. Además, al realizar una comparativa técnico-económica de las propiedades mecánicas de los UHPFRC, se evidenció que las probetas de UHPFRC reforzadas con 2% de macro-fibras poliméricas en volumen tienen la mejor relación costo beneficio en cuanto a la capacidad de absorción de energía se refiere, en comparación al costo beneficio ofrecido por las probetas reforzadas con 2% de micro-fibras metálicas. Sin embargo, se observó que las probetas reforzadas con 2% de macro-fibras poliméricas en volumen absorben solo el 79% de la energía absorbida por las probetas reforzadas con 2% de micro-fibras metálicas en volumen.

Por último, los resultados permitieron evidenciar que la resistencia a compresión de las probetas de UHPFRC reforzadas con 0.75 o 1% de micro-fibras poliméricas en volumen, son capaces de resistir un 14% más de carga a compresión en comparación a las probetas de UHPC. Además, esta resistencia a compresión fue similar a la obtenida por las probetas de UHPFRC reforzadas con 1 o 2% de micro-fibras metálicas en volumen.

**Palabras clave:** UHPFRC, fibras poliméricas, fibras metálicas, mezcla híbrida de fibras, comportamiento a flexión, tenacidad.

## **Abstract**

The constant advancement of science and technology has allowed the development of special concretes such as ultra-high-performance concrete (UHPC). To counteract the fragility of these concretes, and in turn, to improve the mechanical conditions of the same, the incorporation of fibers is common, thus generating ultra-high-performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). UHPFRC has greater durability, ductility, strength and toughness compared to conventional concrete or fiber-reinforced concrete (FRC) due to its low porosity and the densification of its matrix. The addition of fibers to the densified matrix allows to develop an acceptable direct tensile and flexural behavior. Over time, research related to the behavior of UHPFRC has agreed that the hybrid mixture of fibers allows optimizing the mechanical performance of this composite material. However, research has also shown that the incorporation of steel fibers into the matrix greatly increases the initial cost of UHPFRC, along with the high dosages of cement and silica fume required to obtain a dense matrix. Consequently, the high cost, the recent incursion of the material and the lack of guidelines indicating its structural design parameters have limited a wider spread of UHPFRC in Latin America.

Aware of this problem, the present document presents the results of a research project that evaluated the effect of the mixture of polymeric micro and macro-fibers on the flexural and compressive behavior of the UHPFRC. For this reason, it was necessary and pertinent to develop an experimental program to evaluate the behavior of the UHPFRC reinforced with polymeric fibers.

In the experimental program, 36 dosages were elaborated, with which it was sought to demonstrate that the flexural and compression behavior of the UHPFRC reinforced with polymeric fibers can be similar or better in some cases, to the flexural and compression behavior of the UHPFRC reinforced with steel micro-fibers. The dosages presented the following variables and fiber proportions:

- 2 dosages of UHPC were made to achieve the adequate static flow of the standard mix.
- 2 dosages of UHPFRC were reinforced with 1 or 2% of steel micro-fibers (OL 13/.20) in volume. These dosages allowed to compare the results obtained by the dosages of UHPFRC reinforced with polymeric fibers with the same volume fiber content.
- 32 dosages of UHPFRC were reinforced with micro and/or macro polymeric fibers. The micro-fiber (mF) material was nylon or alcohol polyvinyl and the macro-fiber (MF) material was polypropylene or a mixture of polypropylene and polyethylene. The proportion of polymeric fibers by volume was as follows:

1.0% fiber by volume	2.0% fiber by volume
2 mixes with (1% - mF)	2 mixes with (2% - mF).
4 mixes with (0.75% - mF y 0.25% - MF)	4 mixes with (1.5% - mF y 0.5% - MF)
4 mixes with (0.5% - mF y 0.5% - MF)	4 mixes with (1% - mF y 1% - MF)
4 mixes with (0.25% - mF y 0.75% - MF)	4 mixes with (0.5% - mF y 1.5% - MF)
2 mixes with (1% - MF)	2 mixes with (2% - MF)

The results allowed to observe that the UHPFRC specimens reinforced with 1.5 or 2% of polymeric macro-fibers in volume, showed an outstanding flexural behavior. It was even similar to the flexural behavior of the specimens reinforced with 1 or 2% steel micro-fibers. In addition, when making a technical-economic comparison of the mechanical properties of UHPFRC, it was shown that UHPFRC specimens reinforced with 2% polymeric macro-fibers by volume have the best cost-benefit ratio in terms of energy absorption capacity. It refers, in comparison to the cost benefit offered by the specimens reinforced with 2% of steel micro-fibers in volume. However, it was observed that the specimens reinforced with 2% of polymeric macro-fibers by volume absorb only 79% of the energy absorbed by the specimens reinforced with 2% of steel micro-fibers in volume.

Finally, the results showed that the compressive strength of UHPFRC specimens reinforced with 0.75 or 1% of polymeric micro-fibers by volume, are capable of withstanding 14% more compressive load compared to UHPC specimens. Furthermore, this compressive strength

was similar to that obtained by UHPFRC specimens reinforced with 1 or 2% steel micro-fibers by volume.

**Keywords:** UHPFRC, polymeric fibers, steel fibers, hybrid blend fiber, flexural behavior, toughness.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>VI</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XIV</b>
<b>Lista de gráficas</b> .....	<b>XVIII</b>
<b>Lista de ilustraciones</b> .....	<b>XX</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XXII</b>
<b>Lista de símbolos y abreviaturas</b> .....	<b>XXV</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Marco teórico</b> .....	<b>6</b>
1.1    Conceptos básicos.....	7
1.1.1    Características del UHPFRC .....	7
1.1.2    Familias de concretos en torno al UHPFRC .....	8
1.1.3    Zona de transición intersticial.....	9
1.1.4    Componentes del UHPFRC .....	11
1.1.5    Dosificaciones del UHPFRC .....	26
1.2    Propiedades en estado fresco del UHPFRC .....	28
1.2.1    Flujo estático .....	29
1.3    Propiedades mecánicas del UHPFRC.....	31
1.3.1    Propiedades de los materiales dúctiles.....	31
1.3.2    Compresión.....	33
1.3.3    Tracción .....	34
1.3.4    Flexión.....	35
<b>2. Estado del arte</b> .....	<b>38</b>
2.1    Antecedentes del comportamiento a flexión del UHPFRC .....	40
2.2    Antecedentes de concretos reforzados con fibras poliméricas.....	45
2.3    Contexto normativo del UHPFRC .....	46
2.4    Ensayos para UHPFRC .....	47
2.4.1    Norma EN 196-1 .....	48
<b>3. Objetivos</b> .....	<b>51</b>
3.1    General .....	51
3.1.1    Específicos.....	51



<b>4. Programa experimental .....</b>	<b>52</b>
4.1 Metodología .....	52
4.2 Variables del programa experimental .....	53
4.3 Materiales.....	56
4.3.1 Cemento.....	56
4.3.2 Humo de sílice.....	57
4.3.3 Polvo de vidrio.....	58
4.3.4 Arena de sílice.....	58
4.3.5 Superplastificante.....	60
4.3.6 Agua.....	60
4.3.7 Fibras .....	61
4.4 Diseño de mezcla para UHPC .....	66
4.4.1 Distribución de tamaño de partícula - DTP .....	67
4.4.2 Relación agua y superplastificante.....	68
4.4.3 Proporción de materiales .....	69
4.5 Protocolo de amasado de los materiales .....	69
4.5.1 Pesaje de materiales.....	70
4.5.2 Moldes.....	71
4.5.3 Elaboración de mezcla .....	71
4.6 Flujo estático del UHPFRC .....	74
4.7 Vaciado del UHPFRC .....	74
4.8 Curado .....	75
4.9 Ensayos .....	76
4.9.1 Resistencia a flexión .....	76
4.9.2 Resistencia a compresión .....	78
<b>5. Resultados y análisis .....</b>	<b>80</b>
5.1 Flujo estático .....	80
5.2 Comportamiento a flexión .....	87
5.2.1 Resistencia a flexión .....	87
5.2.2 Comparación de resultados a flexión.....	105
5.2.3 Tenacidad.....	106
5.3 Resistencia a Compresión .....	112
5.3.1 Comparación de resultados a compresión.....	119
5.4 Correlación entre la resistencia a flexión y compresión en UHPFRC.....	120
5.5 Costo del UHPFRC.....	123
<b>6. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>134</b>
6.1 Conclusiones.....	134
6.2 Recomendaciones .....	135
<b>Bibliografía .....</b>	<b>139</b>
<b>A. Anexo: Flujo estático.....</b>	<b>146</b>
<b>B. Anexo: Comportamiento a flexión .....</b>	<b>153</b>
<b>C. Anexo: Resistencia a compresión .....</b>	<b>159</b>
<b>D. Anexo: Norma EN 196-1 .....</b>	<b>162</b>

# Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1.</b> Ejemplo de la matriz cementante de un UHPFRC y un concreto convencional. ....	7
<b>Figura 1-2.</b> Familia de concretos en torno al UHPFRC.....	9
<b>Figura 1-3.</b> Zona de transición intersticial alrededor de una fibra metálica.....	10
<b>Figura 1-4.</b> Comparación de observaciones de microscopia electrónica de barrido del ITZ de un concreto convencional y un UHPC. ....	11
<b>Figura 1-5.</b> Composición esquemática del UHPFRC.....	11
<b>Figura 1-6.</b> Fotografía del cemento $d_{50} = 8.0 \mu\text{m}$ .....	12
<b>Figura 1-7.</b> Fotografía del humo de sílice visto desde el microscopio $d_{50} = 0.15 \mu\text{m}$ . ....	13
<b>Figura 1-8.</b> Fotografía de la harina de cuarzo $d_{50} = 15 \mu\text{m}$ . ....	14
<b>Figura 1-9.</b> Fotografía de la ceniza volante vista desde el microscopio $d_{50} = 30 \mu\text{m}$ . ....	15
<b>Figura 1-10.</b> Fotografía de la escoria granulada de alto horno vista desde el microscopio $d_{50} = 2.4 \mu\text{m}$ . ....	16
<b>Figura 1-11.</b> Fotografía del polvo de vidrio visto desde el microscopio $d_{50} = 7.0 \mu\text{m}$ . ....	17
<b>Figura 1-12.</b> Fotografía de la ceniza de la cascara de arroz vista desde el microscopio $d_{50} = 7.5 \mu\text{m}$ . ....	18
<b>Figura 1-13.</b> Fotografía de la arena silíceo ( $d_{\text{max}} = 600 \mu\text{m}$ ). ....	19
<b>Figura 1-14.</b> Mecanismo de absorción de energía en la interfaz matriz-fibra. ....	21
<b>Figura 1-15.</b> Geometría de las macro-fibras metálicas más comunes.....	22
<b>Figura 1-16.</b> Geometría de las macro-fibras poliméricas más comunes (dimensiones en mm): (a) botón en los extremos; (b) retorcida; (c) extremo enganchado; (d) extremos sinusoidales; (e) doble deformación; (f) rizada. ....	22
<b>Figura 1-17.</b> Fibrilación de una fibra y cambio de dimensiones antes y después de la mezcla. ....	25

<b>Figura 1-18.</b> Fotografías de fibras metálicas típicas para UHPFRC. De izquierda a derecha se presenta la micro-fibra metálica recta y lisa, macro-fibra metálica con gancho y macro-fibra metálica altamente retorcida.....	26
<b>Figura 1-19.</b> Un ejemplo de dosificación de materiales en volumen, comparando UHPFRC con un concreto convencional. ....	28
<b>Figura 1-20.</b> Tabla de flujo y molde de ensayo. ....	30
<b>Figura 1-21.</b> Diagrama de esfuerzo – deformación convencional y verdadero para el acero (no se presenta a escala). ....	32
<b>Figura 1-22.</b> Grafica esfuerzo vs deformación de UHPFRC a compresión, reforzado con diferentes porcentajes de fibras.....	33
<b>Figura 1-23.</b> Grafica esfuerzo a tracción directa vs deformación de UHPFRC.....	34
<b>Figura 1-24.</b> Ilustración del comportamiento a la flexión del UHPFRC. ....	36
<b>Figura 2-1.</b> Puente peatonal Sherbrooke, Quebec, Canadá. ....	39
<b>Figura 2-2.</b> Puente peatonal en Medellín, Colombia. ....	39
<b>Figura 2-3.</b> Resistencias a flexión en VHPFRC reforzado con uno o dos tipos de fibras metálicas, con contenidos de fibras del 1 al 5% en volumen. ....	41
<b>Figura 2-4.</b> Dispositivo de carga para determinar la resistencia a flexión en tres puntos. Medidas en milímetros. ....	49
<b>Figura 4-1.</b> Cemento - CEM. ....	57
<b>Figura 4-2.</b> Humo de sílice - SF. ....	57
<b>Figura 4-3.</b> Polvo de vidrio - GP. ....	58
<b>Figura 4-4.</b> Arena Float - SS. ....	59
<b>Figura 4-5.</b> Superplastificante – HRWR. ....	60
<b>Figura 4-6.</b> Agua potable - W. ....	61
<b>Figura 4-7.</b> Micro-fibra polimérica de Nylon. ....	62
<b>Figura 4-8.</b> Micro-fibra polimérica de polivinilo de alcohol (PVA). ....	63
<b>Figura 4-9.</b> Macro-fibra polimérica de polietileno y polipropileno (PP/PE). ....	64
<b>Figura 4-10.</b> Macro-fibra polimérica de polipropileno (PP). ....	65
<b>Figura 4-11.</b> Micro-fibra metálica Dramix OL 13/.20. ....	66
<b>Figura 4-12.</b> Distribución del tamaño de partículas (DTP) usada en la mezcla de UHPC. ....	67
<b>Figura 4-13.</b> Flujo estático de la mezcla N00 y N0 de UHPC. ....	68

<b>Figura 4-14.</b> Materiales cementantes y arena discriminados en laboratorio para elaborar UHPFRC. ....	70
<b>Figura 4-15.</b> Fibras discriminadas en laboratorio para elaborar UHPFRC.....	70
<b>Figura 4-16.</b> Moldes para probetas de UHPFRC. ....	71
<b>Figura 4-17.</b> Mezcla de materiales cementantes. A la izquierda amasadora con premezcla de agua y superplastificante, a la derecha premezcla de materiales cementantes para UHPFRC. ....	73
<b>Figura 4-18.</b> Mezcla de materiales. De izquierda a derecha: Incorporación de la arena silíceo, proceso de amasado típico e incorporación de fibras a la mezcla de UHPFRC. ....	73
<b>Figura 4-19.</b> Toma del flujo estático mezcla de UHPFRC. ....	74
<b>Figura 4-20.</b> Vaciado del UHPFRC en los moldes.....	75
<b>Figura 4-21.</b> Proceso de embalaje y curado de las probetas.....	76
<b>Figura 4-22.</b> Montaje de dispositivo de carga para ensayo a flexión en tres puntos. ....	77
<b>Figura 4-23.</b> Diagramas de corte y momento para flexión en 3 puntos. ....	78
<b>Figura 4-24.</b> Resistencia a compresión. A la izquierda muestra de cubos de UHPFRC y a la derecha montaje del dispositivo de carga para el ensayo a compresión.....	79
<b>Figura 5-1.</b> Flujo estático en mezclas de UHPFRC reforzadas con solo micro-fibras de nylon (mF1). A la izquierda mezcla (N1) con 1% de fibras y a la derecha mezcla (N18) con 2% de fibras en volumen.....	84
<b>Figura 5-2.</b> Flujo estático en mezclas de UHPFRC reforzadas con solo micro-fibras de PVA (mF2). A la izquierda mezcla (N10) con 1% de fibras y a la derecha mezcla (N27) con 2% de fibras en volumen.....	84
<b>Figura 5-3.</b> Flujo estático en mezclas de UHPFRC reforzadas con solo macro-fibras de polipropileno y polietileno (MF1). A la izquierda mezcla (N5) con 1% de fibras y a la derecha mezcla (N22) con 2% de fibras en volumen. ....	85
<b>Figura 5-4.</b> Flujo estático en mezclas de UHPFRC reforzadas con solo macro-fibras de polipropileno (MF2). A la izquierda mezcla (N9) con 1% de fibras y a la derecha mezcla (N26) con 2% de fibras en volumen.....	85
<b>Figura 5-5.</b> Flujo estático en mezclas de UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas (mFOL). A la izquierda mezcla (N17) con 1% de fibras y a la derecha mezcla (N34) con 2% de fibras en volumen.....	86
<b>Figura 5-6.</b> Dispositivo de control y registro de la maquina universal y LVDT.....	87

- 
- Figura 5-7.** Probeta de UHPFRC reforzada con 0.5% de micro-fibras de nylon y 1.5% de macro-fibras de polipropileno en volumen. Probeta con endurecimiento por deflexión y con múltiple fisuración..... 104
- Figura 5-8.** Rotulado y corte de probeta de UHPFRC para ensayo a compresión. .... 113

## Lista de gráficas

	<b>Pág.</b>
<b>Gráfica 0.</b> Flexión en probetas N0.....	89
<b>Gráfica 1.</b> Flexión en probetas N1.....	92
<b>Gráfica 2.</b> Flexión en probetas N2.....	92
<b>Gráfica 3.</b> Flexión en probetas N3.....	93
<b>Gráfica 4.</b> Flexión en probetas N4.....	93
<b>Gráfica 5.</b> Flexión en probetas N5.....	93
<b>Gráfica 6.</b> Flexión en probetas N6.....	93
<b>Gráfica 7.</b> Flexión en probetas N7.....	93
<b>Gráfica 8.</b> Flexión en probetas N8.....	93
<b>Gráfica 9.</b> Flexión en probetas N9.....	94
<b>Gráfica 10.</b> Flexión en probetas N10.....	94
<b>Gráfica 11.</b> Flexión en probetas N11.....	94
<b>Gráfica 12.</b> Flexión en probetas N12.....	94
<b>Gráfica 13.</b> Flexión en probetas N13.....	94
<b>Gráfica 14.</b> Flexión en probetas N14.....	94
<b>Gráfica 15.</b> Flexión en probetas N15.....	95
<b>Gráfica 16.</b> Flexión en probetas N16.....	95
<b>Gráfica 17.</b> Flexión en probetas N17.....	95
<b>Gráfica 18.</b> Flexión en probetas N18.....	100
<b>Gráfica 19.</b> Flexión en probetas N19.....	100
<b>Gráfica 20.</b> Flexión en probetas N20.....	100
<b>Gráfica 21.</b> Flexión en probetas N21.....	100
<b>Gráfica 22.</b> Flexión en probetas N22.....	100
<b>Gráfica 23.</b> Flexión en probetas N23.....	100
<b>Gráfica 24.</b> Flexión en probetas N24.....	101
<b>Gráfica 25.</b> Flexión en probetas N25.....	101
<b>Gráfica 26.</b> Flexión en probetas N26.....	101
<b>Gráfica 27.</b> Flexión en probetas N27.....	101
<b>Gráfica 28.</b> Flexión en probetas N28.....	101
<b>Gráfica 29.</b> Flexión en probetas N29.....	101

---

<b>Gráfica 30.</b> Flexión en probetas N30.....	102
<b>Gráfica 31.</b> Flexión en probetas N31.....	102
<b>Gráfica 32.</b> Flexión en probetas N32.....	102
<b>Gráfica 33.</b> Flexión en probetas N33.....	102
<b>Gráfica 34.</b> Flexión en probetas N34.....	102

# Lista de ilustraciones

	Pág.
<b>Ilustración 1-1.</b> Composición y costo de mezcla media de UHPFRC. Número de dosificaciones observadas 128. Costo medio: 2.236.265 COP/m <sup>3</sup> . Contenido de fibras metálicas: 1.84%.....	3
<b>Ilustración 2-1.</b> Proporción de ensayos a flexión en UHPFRC. ....	47
<b>Ilustración 2-2.</b> Proporción de dimensiones de probetas en los ensayos a flexión en tres puntos para UHPFRC. ....	48
<b>Ilustración 5-1.</b> Resultados del flujo estático promedio en mezclas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 1% en volumen. ....	82
<b>Ilustración 5-2.</b> Resultados del flujo estático promedio en mezclas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 2% en volumen. ....	83
<b>Ilustración 5-3.</b> Resultados del módulo de rotura en las probetas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 1% en volumen. ....	90
<b>Ilustración 5-4.</b> Resultados de la deflexión asociada al módulo de rotura en las probetas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 1% en volumen.....	91
<b>Ilustración 5-5.</b> Resultados del módulo de rotura en las probetas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 2% en volumen. ....	97
<b>Ilustración 5-6.</b> Resultados de la deflexión asociada al módulo de rotura en las probetas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 2% en volumen.....	98
<b>Ilustración 5-7.</b> Resultados de la resiliencia en las probetas de UHPFRC con endurecimiento por deflexión. ....	108
<b>Ilustración 5-8.</b> Resultados de la tenacidad en las probetas de UHPFRC con endurecimiento por deflexión. ....	108
<b>Ilustración 5-9.</b> Resultados de la tenacidad en las probetas de UHPFRC con endurecimiento por deflexión. ....	111
<b>Ilustración 5-10.</b> Resultados de la resistencia a compresión en las probetas de UHPFRC con 1% de fibras en volumen. ....	115
<b>Ilustración 5-11.</b> Resultados de la resistencia a compresión en las probetas de UHPFRC con 2% de fibras en volumen. ....	117
<b>Ilustración 5-12.</b> Relación entre la densidad de las fibras para reforzar UHPFRC. ....	124
<b>Ilustración 5-13.</b> Relación entre el costo de las fibras para reforzar el UHPFRC con 1% en volumen.....	125
<b>Ilustración 5-14.</b> Proporción y costo de los materiales para un metro cubico (1 m <sup>3</sup> ) de UHPC. ....	126



---

<b>Ilustración 5-15.</b> Relación costo beneficio a flexión para las probetas de UHPFRC con endurecimiento por deflexión. ....	129
<b>Ilustración 5-16.</b> Relación costo beneficio por tenacidad para las probetas de UHPFRC con endurecimiento por deflexión.....	131
<b>Ilustración 5-17.</b> Relación costo beneficio a compresión para las probetas de UHPFRC con mayor resistencia.....	132
<b>Ilustración 5-18.</b> Dosificación y costo de la mejor mezcla de UHPFRC reforzada con fibras poliméricas. Costo \$ <b>1.829.978</b> COP/m <sup>3</sup> . Contenido de macro-fibras de polipropileno al 2%. ....	133

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 2-1.</b> Resistencia a flexión en UHPFRC, estado del arte.....	43
<b>Tabla 2-2.</b> Resistencia a compresión en UHPFRC, estado del arte. ....	44
<b>Tabla 2-3.</b> Factores de transformación para convertir los resultados de la resistencia a compresión en una muestra de cubo de 100 mm de lado. ....	45
<b>Tabla 4-1.</b> Relación entre micro-fibras y macro-fibras poliméricas analizadas para reforzar el UHPFRC. ....	54
<b>Tabla 4-2.</b> Características de las fibras usadas en la investigación para reforzar UHPFRC .....	54
<b>Tabla 4-3.</b> Dosificación de fibras al 1% del volumen de la mezcla.....	55
<b>Tabla 4-4.</b> Dosificación de fibras al 2% del volumen de la mezcla.....	56
<b>Tabla 4-5.</b> Resumen de las características físicas y químicas de los materiales cementantes del UHPFRC, tomado de (Abellán et al., 2020). ....	59
<b>Tabla 4-6.</b> Propiedades físicas de la micro-fibra de nylon (mF1) de Agatex.....	62
<b>Tabla 4-7.</b> Propiedades físicas de la micro-fibra de polivinilo de alcohol (mF2) de Agatex. ....	63
<b>Tabla 4-8.</b> Propiedades físicas de la macro-fibra de polipropileno y polietileno (MF1) de (Euclid - Toxement, 2011). ....	64
<b>Tabla 4-9.</b> Propiedades físicas de la macro-fibra de polipropileno (MF2) de (Elasto Plastic Concrete, 2010). ....	65
<b>Tabla 4-10.</b> Propiedades físicas de la micro-fibra metálica (mFOL) de (Bekaert, 2019)..	66
<b>Tabla 4-11.</b> Resultados de la medición del flujo estático en mezclas de UHPC, para determinar la relación de agua y superplastificante. ....	68
<b>Tabla 4-12.</b> Dosificación matriz cementante de la mezcla N0 para 1 m <sup>3</sup> y para 3 probetas (40 x 40 x 160 mm), con un desperdicio del 10%. ....	69
<b>Tabla 5-1.</b> Resultados del flujo estático promedio en mezcla de UHPC. ....	81

<b>Tabla 5-2.</b> Resultados del flujo estático promedio en mezclas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 1% en volumen.....	81
<b>Tabla 5-3.</b> Resultados del flujo estático promedio en mezclas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 2% en volumen.....	82
<b>Tabla 5-4.</b> Resultados de la resistencia a flexión en las probetas de UHPC, mezcla N0.88	
<b>Tabla 5-5.</b> Resultados de la resistencia a flexión en probetas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 1% en volumen.....	90
<b>Tabla 5-6.</b> Resultados de la resistencia a flexión en probetas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 2% en volumen.....	97
<b>Tabla 5-7.</b> Comparación de resultados a flexión entre probetas de UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas .....	105
<b>Tabla 5-8.</b> Resumen de comparación de resultados a flexión entre probetas de UHPC y UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas .....	106
<b>Tabla 5-9.</b> Resultados de ductilidad y tenacidad en las probetas de UHPFRC que presentan endurecimiento por deflexión. ....	107
<b>Tabla 5-10.</b> Resultados de los índices de ductilidad en las probetas de UHPFRC que presentaron endurecimiento por deflexión. ....	110
<b>Tabla 5-11.</b> Resultado de la resistencia a la compresión en probetas de UHPC. ....	113
<b>Tabla 5-12.</b> Resultados de la resistencia a la compresión en probetas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 1% en volumen.....	114
<b>Tabla 5-13.</b> Resultados de la resistencia a la compresión en probetas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 2% en volumen.....	116
<b>Tabla 5-14.</b> Comparación de resultados a compresión entre probetas de UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas.....	119
<b>Tabla 5-15.</b> Resumen de la comparación de resultados a compresión entre probetas de UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas.....	120
<b>Tabla 5-16.</b> Constante k para UHPC.....	121
<b>Tabla 5-17.</b> Constante k para UHPFRC reforzado fibras al 1% en volumen.....	121
<b>Tabla 5-18.</b> Constante k para UHPFRC reforzado fibras al 2% en volumen.....	122
<b>Tabla 5-19.</b> Promedio de constante k para UHPFRC.....	122
<b>Tabla 5-20.</b> Costo de las fibras por metro cubico (m <sup>3</sup> ) dosificadas al 1% en volumen, y relación entre la masa y el costo de las fibras para reforzar UHPFRC. ....	124
<b>Tabla 5-21.</b> Proporción y costo de los materiales para un metro cubico (1 m <sup>3</sup> ) de UHPC. ....	125
<b>Tabla 5-22.</b> Costo de la mezcla base de UHPC.....	126

<b>Tabla 5-23.</b> Costo de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 1% en volumen. ....	127
<b>Tabla 5-24.</b> Costo de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 2% en volumen. ....	127
<b>Tabla 5-25.</b> Evaluación de costos de las mejores mezclas de UHPFRC a flexión. ....	128
<b>Tabla 5-26.</b> Evaluación de costos de las mejores mezclas de UHPFRC por tenacidad.	130
<b>Tabla 5-27.</b> Evaluación de costos de las mejores mezclas de UHPFRC a compresión.	132

# Lista de símbolos y abreviaturas

## Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
$A$	Área	mm <sup>2</sup>
$D$	Representa el tamaño de la partícula	µm
$D_{Max}$	Tamaño máximo de la partícula	µm
$D_{Min}$	Tamaño mínimo de la partícula	µm
$I_{MOR}$	Índice de tenacidad, hasta una deflexión igual $\delta_{MOR}$	1
$L$	Distancia entre apoyos de la probeta	mm
$M_f$	Masa de fibras	kg
$P_{LOP}$	Carga asociada al límite de proporcionalidad	kN
$P$	Carga asociada a la máxima resistencia a compresión	MPa
$P_{MOR}$	Carga asociada al módulo de rotura	kN
$P_{tar}(D)$	Fracción en peso de sólidos totales con tamaño inferior a $D$	1
$R$	Reducción del flujo estático	mm
$R\%$	Reducción del flujo estático en porcentaje	%
$SD_M$	Desviación estándar de la muestra	%
$V_f$	Volumen de fibras	%

Símbolo	Término	Unidad SI
$b$	Ancho de la probeta	mm
$d$	Altura de la probeta	mm
$d_f$	Diámetro de la fibra	mm
$d_{50}$	Diámetro medio de la partícula	µm
$d_{max}$	Diámetro máximo de la partícula	µm
$f'_c$	Resistencia a la compresión	MPa
$f_{LOP}$	Límite de proporcionalidad	MPa
$f_{MOR}$	Módulo de rotura	MPa
$f_r$	Módulo de rotura del concreto convencional, NSR-10	MPa
$g$	Tenacidad o energía absorbida	J
$g_{LOP}$	Resiliencia, hasta una deflexión igual a $\delta_{LOP}$	J
$g_{MOR}$	Tenacidad, hasta una deflexión igual a $\delta_{MOR}$	J
$k$	Correlación entre la resistencia a flexión y compresión	1
$l_f$	Longitud de la fibra	mm
$q$	Representa el exponente de Fuller	1
$r$	Relación de resultados de UHPFRC	%
$rpm$	Revoluciones por minuto	r/min
$w/b$	Relación agua conglomerante o binder	1

$w/c$	Relación agua cemento	1
-------	-----------------------	---

## Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
$\varnothing_m$	Diámetro promedio, asociado al flujo estático	mm
$\delta_{LOP}$	Deflexión asociada a la carga $P_{LOP}$	mm
$\delta_{MOR}$	Deflexión asociada a la carga $P_{MOR}$	mm
$\sigma_{cc}$	Esfuerzo de fisuración a tracción directa	MPa
$\sigma_{pc}$	Esfuerzo de tensión máximo a tracción directa	MPa

## Composición química de los materiales

Fórmula	Término
$Al_2O_3$	Alúmina
$C_3A$	Aluminato Tricálcico
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de Calcio
$CaO$	Cal
CH	Portlandita
CSH	Silicato de Calcio Hidratado
$Fe_2O_3$	Óxido de Hierro
$K_2O$	Óxido de Potasio
$MgO$	Óxido de Magnesio
$Mn_3O_4$	Óxido de Manganeso
$Na_2O$	Óxido de Sodio
$SiO_2$	Sílice
$SO_3$	Óxido de Azufre
$TiO_2$	Óxido de Titanio

## Abreviaturas

Abreviatura	Término
A&A	Andreasen and Andersen
$A\&A_{mod}$	Modelo de empaquetamiento de Andreasen and Andersen modificado
a.C	Antes de Cristo
ACI	American Concrete Institute – (Instituto Americano del Concreto)
AFT	Atlantic Fiber Technologies Limited – (Tecnología de Fibras Atlánticas Limitadas)
ASTM	American Society for Testing and Materials – (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales)
Cant	Cantidad de material
CH	Portlandita
COP	Peso Colombiano
D	Densidad

**Abreviatura Término**


---

DTP	Distribución de Tamaño de Partículas
EHE	Institución Española del Hormigón Estructural
EN	Norma Europea
FA	Fly Ash – Ceniza Volante
FRC	Fiber Reinforced Concrete – (Concreto Reforzado con Fibras)
FRX	Técnica espectroscópica de fluorescencia de rayos X
GGBSF	Ground-Granulate Blast-Slag Furnace – (Escoria Granulada de Alto Horno)
GP	Glass Powder – (Polvo de Vidrio)
H-FRC	Hybrid Fiber Reinforced Concrete – (Concreto Reforzado con Fibras Híbridas)
HPC	High-Performance Concrete – (Concreto de Altas Prestaciones)
HPFRCC	High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites – (Compuestos Cementicos de Altas Prestaciones Reforzados con Fibras)
HRWR	High Range Water Reducers – (Reductores de Agua de Alto Rango)
ID	Identificación
ITZ	Interfacial Transition Zone – (Zona de Transición Intersticial)
LOP	Limit of Proportionality – (Límite de Proporcionalidad)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer – (Transformador Diferencial de Variación Lineal)
mF	Micro-fibra
mF1	Micro-fibra de Nylon
mF2	Micro-fibra de Polivinilo de alcohol (PVA)
mFOL	Micro-fibra Metálica OL13/.2
MF	Macro-fibra
MF1	Macro-fibra de Polipropileno y Polietileno
MF2	Macro-fibra de Polipropileno
MOR	Modulus of Rupture – Módulo de Rotura
NTC	Norma Técnica Colombiana
PCE	Polycarboxylate ether – (Policarboxilato)
PP	Polipropileno
PP/PE	Polipropileno y Polietileno
Prec. Unit	Precio unitario
PVA	Polivinilo de alcohol
RHA	Rice Husk Ash – (Ceniza de Cascara de Arroz)
SF	Silica Fume – (Humo de Sílice)
SS	Silicon Sand – (Arena Silíceas)
UHPC	Ultra-High-Performance Concrete – (Concreto de Ultra Altas Prestaciones)
UHPRFC	Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Concrete – (Concreto de Ultra Altas Prestaciones Reforzado con Fibras)
V	Volumen
VHPRFC	Very-High-Performance Fiber Reinforced Concrete – (Concreto de Muy Altas Prestaciones Reforzado con Fibras)
W	Water – (Agua)





## Introducción

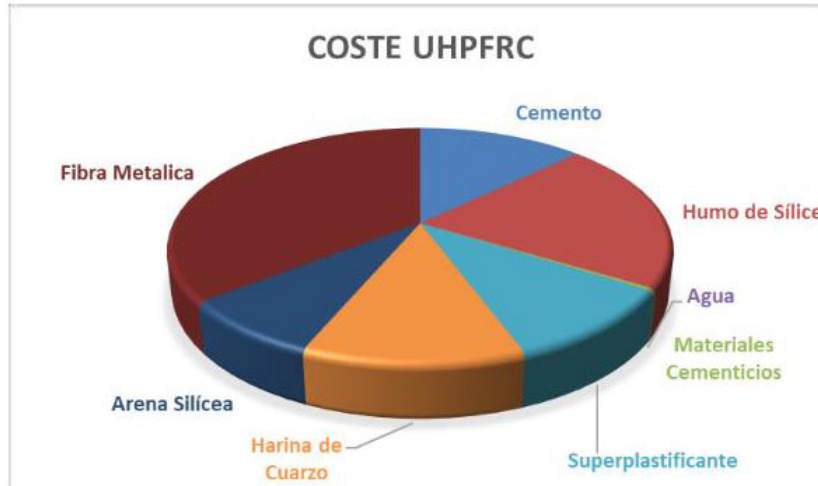
La resistencia a compresión en los concretos depende en gran medida de la relación agua cemento ( $a/c$ ), entre menor sea la relación de estos materiales la resistencia aumenta. No obstante, la reducción de agua o el aumento en la dosificación cemento para obtener mayores resistencias a compresión, generan problemas de manejabilidad y colocación. Debido a estas dificultades fueron desarrollados aditivos reductores de agua de alto rango o superplastificantes que permiten dar manejabilidad al concreto en estado fresco a muy bajas relaciones ( $a/c$ ). Posteriormente, mediante el uso de adiciones de componentes puzolánicos a las mezclas de concreto se observó que la resistencia mejora dependiendo del tamaño de las partículas adicionadas, pero a su vez reducen la manejabilidad (Abellán et al., 2018c).

Para mediados de la década de 1990 Richard y Cheyrezy lograron desarrollar por primera vez un concreto de ultra altas prestaciones (UHPC, por sus siglas en inglés), mediante el uso de teorías de empaquetamiento de partículas y el uso de superplastificantes, llegando a establecer las proporciones de componentes que producían la mayor compacidad del concreto, logrando un incremento significativo en la resistencia a compresión (Richard & Cheyrezy, 1995). Posteriormente, para obtener un concreto con excelente comportamiento a la tracción y a la flexión, (Behloul et al., 1996) decidieron incorporar 2.4% de micro-fibras metálicas rectas de 12 mm de longitud, en fracción de volumen a la mezcla de UHPC, con lo cual dieron origen a los concretos de ultra altas prestaciones reforzados con fibras (UHPRFC, por sus siglas en inglés). Desde entonces se han desarrollado varios tipos de UHPRFC en diferentes países; donde el objetivo perseguido con estos desarrollos ha consistido en mejorar las propiedades de tracción y flexión más allá del esfuerzo de fisuración del material, con el fin de obtener un material dúctil, al menor costo, utilizando materiales accesibles en el mercado local.

Por otro lado, investigadores como (Markovic, 2006), (Sahmaran & Yaman, 2007), (Kim et al., 2011), (S. H. Park et al., 2012) y (Yoo et al., 2017) han desarrollado mezclas híbridas de micro y macro fibras metálicas para UHPFRC, en las cuales han evidenciado una sinergia entre las fibras, donde las micro-fibras controlan las micro fisuras y retrasan su evolución a macro fisura. Una vez desarrollada la macro fisura, las macro-fibras se activan para controlar los esfuerzos de tensión a los que está siendo sometido el concreto.

Con relación al costo por metro cubico del UHPFRC, investigaciones desarrolladas en Corea mostraron que las fibras representan el rubro más alto en los componentes de la mezcla, siendo superior el costo del 1% de las fibras metálicas respecto al de toda la matriz (Kim, Naaman, et al., 2008a). Además, las mejoras de rendimiento en el UHPFRC que se obtienen al utilizar dosificaciones con contenidos en fibras metálicas superiores al 2% no justifican el incremento en precio (Serna et al., 2012). Investigaciones desarrolladas por (Abellán et al., 2018a), referentes a la viabilidad económica del material en el mercado Latinoamericano coinciden en que la fibra metálica constituye el elemento que más sobresale del costo total. En la **Ilustración 6-1**, se presenta la composición y costo de los materiales típicos para obtener un metro cubico de UHPFRC en Colombia. Se puede apreciar que el contenido de fibras metálicas es 1.84% del volumen total de la mezcla, pero su incidencia en el costo total es mayor al 37%. Por lo tanto, para permitir la viabilidad del uso de este tipo de concretos en el medio latinoamericano, es necesario disminuir el costo del material compuesto con miras a incrementar y expandir las aplicaciones prácticas del UHPFRC (Kim, Naaman, et al., 2008a).





**Ilustración 6-1.** Composición y costo de mezcla media de UHPFRC. Número de dosificaciones observadas 128. Costo medio: 2.236.265 COP/m<sup>3</sup>. Contenido de fibras metálicas: 1.84%.

Fuente: Tomado de (Abellán et al., 2018a).

Como ya se indicó, el UHPFRC no ha tenido gran desarrollo y aplicaciones en Latinoamérica debido a su alto costo inicial, a la reciente incursión del material y a la falta de normativa que proporcione al ingeniero las directrices suficientes para diseñar una estructura con UHPFRC, como actualmente existe para el concreto convencional. Hoy en día para aplicaciones estructurales con este material, se requiere que los ingenieros estructurales usen códigos existentes en su país o guías de otros países, luego aplicar factores de seguridad conservadores y en algunos casos se realizan pruebas de carga para validar las dimensiones de los elementos antes de proceder con la construcción. Este proceso incrementa los costos asociados al uso del material y los tiempos de ejecución, razón por la cual el UHPFRC pierde aplicabilidad frente a los usos convencionales del concreto, a pesar de que todas las investigaciones desarrolladas hasta el momento reconocen que la solución con UHPFRC es superior al status quo (Perry et al., 2016). Además, la necesidad de utilizar materiales seleccionados y algunos importados, es otra limitación para elaborar mezclas de UHPFRC a costo razonable.

Por las razones expuestas anteriormente, se desarrolló la presente investigación enfocada en determinar el efecto de la mezcla de micro-fibras y macro-fibras poliméricas, en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC. Además, se buscó establecer la incidencia técnico-económica de la combinación híbrida de fibras poliméricas en el costo por metro cubico de UHPFRC. Para ello se desarrolló un programa experimental, donde

se elaboraron especímenes reforzados con fibras poliméricas y micro-fibras metálicas para ser sometidos a esfuerzos de flexión y compresión. Los resultados obtenidos por los especímenes reforzados con fibras poliméricas fueron comparados con los resultados de los especímenes que contenían micro-fibras metálicas rectas en la misma proporción en volumen (1% o 2%). Finalmente, después de analizar los resultados se evaluó el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC reforzado con fibras poliméricas.

El comportamiento a flexión fue sobresaliente para las probetas de UHPFRC reforzadas con 1.5 o 2% de macro-fibras poliméricas en volumen. En cuanto al comportamiento a compresión fue sobresaliente para las probetas de UHPFRC reforzadas con 0.75 o 1% de micro-fibras poliméricas en volumen. Estos resultados podrían servir para analizar la futura aplicabilidad del UHPFRC polimérico en la construcción de nuevas edificaciones, así como en la rehabilitación y/o reforzamiento de estructuras debido a su excelente comportamiento relacionado con la tenacidad, ductilidad y resistencia a compresión.

La metodología que se utilizó para llevar a cabo el presente proyecto de investigación constó de tres partes: la primera consistió en una búsqueda bibliográfica, la segunda en la realización de un programa experimental y la última en el análisis de resultados. El documento se compone de 6 capítulos.

En el capítulo 1 se presenta el marco teórico donde se ilustran los conceptos básicos relacionados directamente con el UHPFRC, algunas de las propiedades mecánicas del material y la descripción de los ensayos a flexión y compresión que se han usado para evaluar las propiedades de este material. Luego, en el estado del arte, capítulo 2, se presentan los principales aportes realizados por diferentes autores en Colombia, Estados Unidos, Europa y Asia, en lo relacionado con el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC. Posteriormente, en el capítulo 3 se plantea el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación.

En la segunda etapa del proyecto, descrito en el capítulo 4, se presenta el programa experimental de la investigación, desarrollado en el laboratorio de ensayo de materiales y estructuras Alejandro Sandino Pardo de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Gravito. En esta etapa se describen las variables del programa experimental, se presentan los

materiales utilizados en la investigación, se describe el diseño de mezcla y la distribución del tamaño de partículas para UHPC determinadas por el ingeniero Joaquín Abellán en investigaciones desarrolladas en UHPC. Posteriormente, se describe el protocolo de amasado de los materiales, la medición del flujo estático, el vaciado y curado llevado a cabo en las mezclas de UHPFRC y finalmente, se describen los protocolos llevados a cabo en los ensayos a flexión y compresión de las probetas de UHPFRC.

En el capítulo 5, se presentan y analizan los resultados obtenidos del programa experimental. Inicialmente se exponen los resultados de la medición del flujo estático de cada mezcla de UHPFRC; posteriormente, se presentan los resultados de los ensayos a flexión de cada probeta junto con las curvas de esfuerzo versus deformación. Estas curvas se analizaron para determinar las resistencias y deflexiones asociadas al límite de proporcionalidad y el módulo de rotura y, para determinar la capacidad de absorción de energía. Luego, se presentan los resultados de la resistencia a compresión del UHPFRC reforzado con fibras poliméricas. Adicionalmente, para poder analizar y evaluar el comportamiento a flexión de las probetas de UHPFRC reforzadas con fibras poliméricas, se presentan a la par los resultados obtenidos por las mezclas y probetas de UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas dosificadas al 1 o 2% en volumen. Finalmente, este capítulo exhibe una comparativa técnico-económica de la tenacidad, la resistencia a flexión y compresión entre las mejores probetas de UHPFRC reforzadas con fibras poliméricas y las probetas de UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas.

Por último, el capítulo 6 se presentan las conclusiones obtenidas del desarrollo de la investigación y se plantean recomendaciones para futuras líneas de investigación relacionadas con el tema en estudio.

# 1.Marco teórico

Las mezclas cementantes datan de los años 7000 y 6000 a. C. En regiones como Israel y la antigua Yugoslavia se han encontrado restos de pisos elaborados a partir de calizas calcinadas. Hacia el 2500 a. C. se encontraron hallazgos del uso de mezclas de calizas y yesos calcinados empleadas para pegar bloques de piedra como se ha observado en las pirámides de Giza en Egipto. Posteriormente, el apogeo del concreto se dio a principios del siglo XVIII; cuando Joseph Aspdin patentó el primer cemento portland en Inglaterra en 1824, durante los años posteriores hasta hoy en día el concreto ha permitido el desarrollo de la construcción en el mundo debido al avance en su tecnología, su versatilidad y economía (Osorio, 2010).

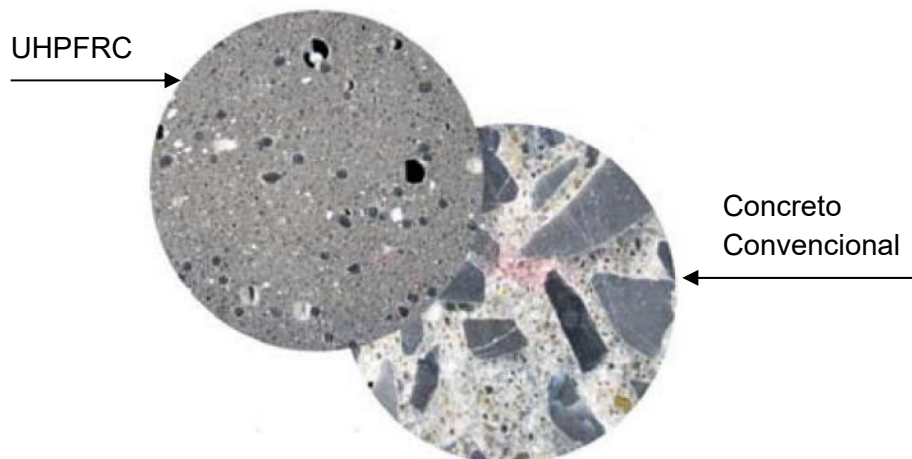
Desde su desarrollo en el siglo XVIII, el concreto se ha posicionado como el material de mayor demanda en la industria de la construcción debido a sus características mecánicas y reológicas capaces de resistir la compresión, el fuego y asegurar la durabilidad de las estructuras (Pérez, 2014). El concreto es una mezcla de materiales compuesto de cemento, grava, arena, agua y para condiciones especiales se agregan aditivos y adiciones cementicias. Es maleable en su estado líquido y de gran resistencia a la compresión en estado sólido, pero no tiene un buen comportamiento frente a otro tipo de esfuerzos como la tracción, flexión y cortante. Es por tanto un material frágil y con baja absorción de energía. Por el contrario, los concretos reforzados con fibras (FRC) y en especial los concretos de ultra altas prestaciones reforzados con fibras (UHPFRC) tienen un comportamiento adecuado frente a este tipo de esfuerzos. Incluso en algunos casos presentan fallas dúctiles y pueden absorber energía dependiendo de la dosificación de fibras.

A continuación, se presentan los conceptos básicos, las propiedades en estado fresco y las propiedades mecánicas relacionadas directamente con el UHPFRC.

## 1.1 Conceptos básicos

### 1.1.1 Características del UHPFRC

El concreto de ultra altas prestaciones reforzado con fibras es un material que requiere componentes exclusivos y procesos de fabricación muy controlados (Serna et al., 2012). De acuerdo con lo especificado en el documento ACI 239 R-18 y NF P 18-470, el UHPFRC es un concreto reforzado con fibras metálicas con resistencia a la compresión igual o superior a los 150 MPa y con unas condiciones específicas en cuanto a durabilidad, ductilidad y tenacidad (ACI Committe 239R, 2018), (NF P 18-470, 2016). Para alcanzar estas condiciones específicas se incorporan fibras de diversos materiales a la matriz cementante conformada típicamente por cemento, humo de sílice, materiales cementantes suplementarios, arena fina silícea, aditivos superplastificantes y agua (Shi et al., 2015). La selección de los materiales constituyentes de la matriz cementante, se realiza con base en el tamaño de sus partículas, para lograr la mayor densidad de empaquetamiento posible, una porosidad reducida y una microestructura interna mejorada (Abellán et al., 2018b). En la **Figura 1-1** se presenta una comparación visual de la matriz cementante de un UHPFRC y un concreto convencional. En ella se puede apreciar la alta concentración de material cementicio y contenido mínimo de agregado fino para el UHPFRC. Por otro lado, el concreto convencional presenta menor volumen de pasta de cemento y mayor concentración de agregado fino y grueso.



**Figura 1-1.** Ejemplo de la matriz cementante de un UHPFRC y un concreto convencional.  
Fuente: Tomado de (Security, 2011).

El UHPFRC puede ofrecer grandes prestaciones para la industria de la construcción. En algunos casos, debido a su contenido de fibra puede reducirse o hasta eliminarse la armadura secundaria y transversal para la resistencia a cortante. Además, podría reducir la sección transversal de los elementos estructurales por sus favorables propiedades mecánicas y se podría reducir el recubrimiento del refuerzo de los elementos estructurales debido a la baja porosidad del concreto (Serna et al., 2012). La reducción en volumen de concreto necesario redundaría en la disminución de peso de las estructuras, cimentaciones menos robustas y menor cantidad de materiales a transportar al proyecto en construcción, lo que permite compensar en parte el alto costo inicial del UHPFRC. Finalmente, el UHPFRC tiene otras ventajas como una mayor durabilidad y estética que permiten excelentes acabados superficiales debido a la alta densidad de empaquetamiento de partículas. Estos beneficios, generan una fuerte motivación para implementar su uso con respecto al concreto convencional y permite desarrollar un amplio abanico de aplicaciones en elementos prefabricados (Serna et al., 2012).

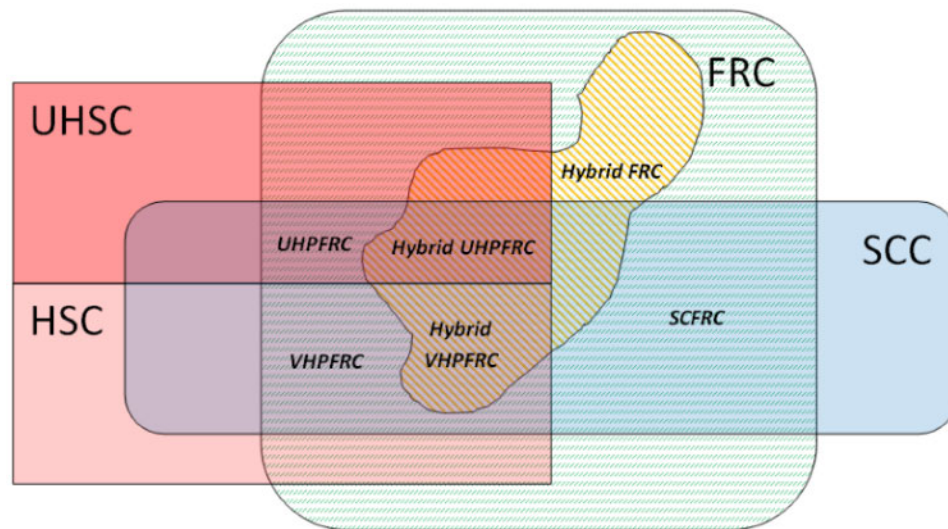
### **1.1.2 Familias de concretos en torno al UHPFRC**

El UHPFRC es el resultado del desarrollo de tres líneas de investigación en concretos especiales: los concretos autocompactantes, los concretos reforzados con fibras, y los concretos de muy alta resistencia (Serna et al., 2012). En consecuencia, se han desarrollado una gran variedad de familias de concretos con resistencias a la compresión entre 110 y 150 MPa; denominados como concretos de muy altas prestaciones reforzados con fibras (VHPFRC, por sus siglas en inglés) (Walraven, 2009).

No solo los concretos se han adaptado a las necesidades del mercado, las fibras también lo han hecho dependiendo del tipo de respuesta deseada. Las fibras cortas y esbeltas controlan la aparición de las primeras fisuras y las fibras largas garantizan la ductilidad para deformaciones altas (Kim et al., 2011). En algunos casos puede ser conveniente la combinación híbrida de tipos y/o dimensiones de fibras, a esta familia de concretos se les conoce como H-FRC (concretos reforzados con mezclas híbridas de fibras). Asimismo, cuando se requieren concretos que desarrollen endurecimiento por deformación, incluso a tracción directa se recurre a los conocidos como HPFRCC (compuestos cementicios de altas prestaciones reforzados con fibras) (Naaman & Reinhardt, 2006). En resumen, este



abánico de concretos de altas prestaciones tiene propiedades y comportamientos muy variados, como se ilustra en la **Figura 1-2**.



**UHP** - Ultra alto desempeño.

**SC** – Autocompactante.

**SCC** - Concreto con endurecimiento por deformación a tracción directa.

**VHP** – Muy alto desempeño.

**FRC** – Concreto reforzado con fibras.

**Figura 1-2.** Familia de concretos en torno al UHPFRC.

Fuente: Tomado de (Serna et al., 2012).

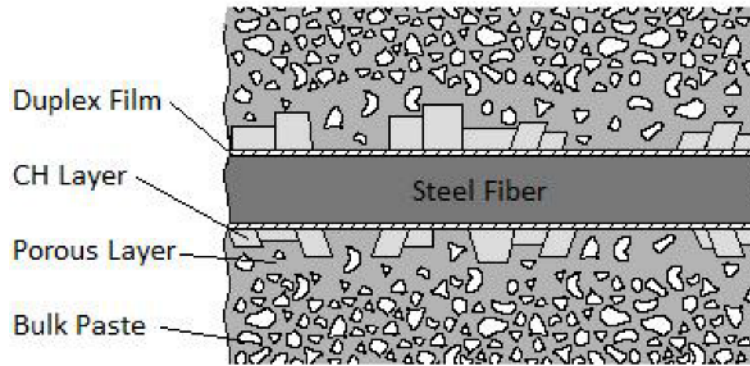
No obstante, durante los últimos años, los investigadores y el portafolio de empresas dedicadas a producir y comercializar concretos ha desarrollado sus propias dosificaciones de UHPFRC con materiales locales, adaptándolas a las necesidades del mercado.

### 1.1.3 Zona de transición intersticial

La capacidad de contribución de la fibra a las propiedades mecánicas del FRC es altamente dependiente de la capacidad que tiene la matriz para transferir carga a la fibra. Esta transferencia ocurre en la zona de transición intersticial (ITZ, por sus siglas en inglés), que corresponde al volumen de la matriz que rodea ya sea la fibra o el agregado (Scrivener et al., 2004).

La microestructura de la matriz en la ITZ depende del tamaño del agregado o fibra. Las partículas de cemento con un tamaño de 10  $\mu\text{m}$  presentes en la mezcla fresca, forman partículas de silicato de calcio hidratado (CSH) y cristales de hidróxido de calcio (CH) tras la hidratación. Estas dos capas formadas por partículas de CSH y CH forman una película,

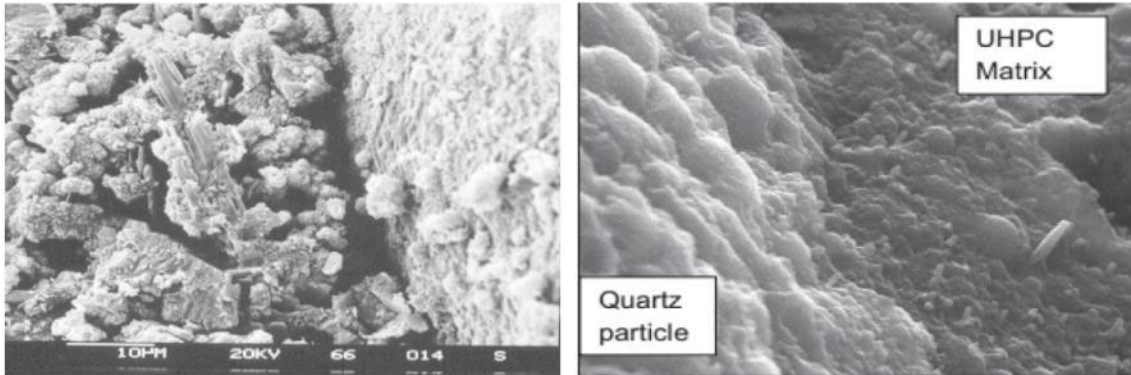
de aproximadamente 1  $\mu\text{m}$  de espesor, alrededor de la fibra (Geng & Leung, 1996). Esto, combinado con la segregación, la acumulación de agua y el empaquetamiento ineficiente de los granos de cemento en la mezcla, forman espacios llenos de agua alrededor la fibra, como se ilustra en la **Figura 1-3** (Bentur & Mindess, 1990).



**Figura 1-3.** Zona de transición intersticial alrededor de una fibra metálica.  
Fuente: Tomado del (Bentur & Mindess, 1990).

La formación de los cristales CH debilitan el ITZ perjudicando la adherencia matriz-fibra. Investigaciones desarrolladas por (Hu & Stroeven, 2004) referentes a las propiedades de la ITZ evidenciaron un fenómeno natural de segregación de partículas con mayor tamaño. Es decir, la ITZ presenta diferentes gradientes en porosidad en función del tamaño de las partículas que rodean al agregado o fibra. Por lo tanto, la microestructura de esta zona puede optimizarse reduciendo el tamaño de las partículas de los materiales cementantes, e incluso con la incorporación de granos minerales más finos. Los materiales cementantes suplementarios como las cenizas volantes y el humo de sílice pueden mejorar la resistencia de la unión matriz-fibra al optimizar la estructura de la matriz (Detwiler & Mehta, 1989).

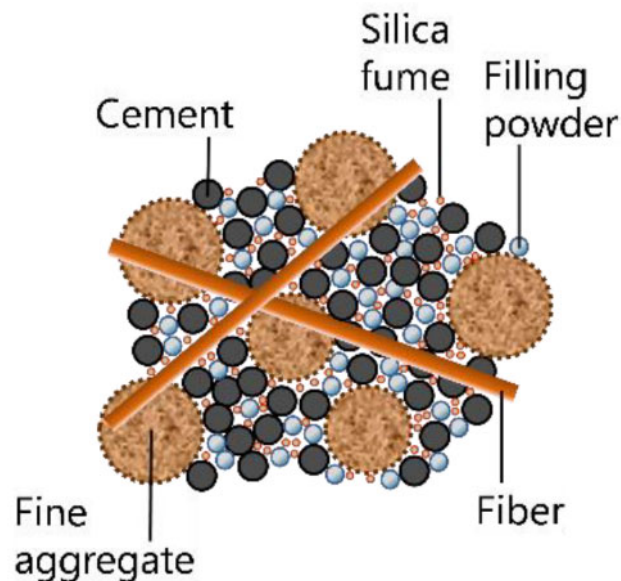
En consecuencia, el elevado empaquetamiento de partículas presente en el UHPFRC reduce el espacio para que puedan desarrollarse los cristales de CH, como se puede apreciar en la **Figura 1-4**. Entre menor sea el tamaño de los cristales CH la afectación de la adherencia matriz-fibras disminuye. Además, el empleo de materiales cementantes suplementarios, especialmente los ricos en sílice amorfa (como el humo de sílice y el polvo de vidrio reciclado) ayudan a disminuir la cantidad de CH, debido a la actividad puzolánica desarrollada por estos materiales. Todo esto conlleva a una mejora en el ITZ en el caso de los UHPFRC (Reda et al., 1999).



**Figura 1-4.** Comparación de observaciones de microscopía electrónica de barrido del ITZ de un concreto convencional y un UHPC.  
Fuente: Tomado de (D. Wang et al., 2015).

### 1.1.4 Componentes del UHPFRC

A continuación, se presenta una breve descripción de los componentes típicos del concreto de ultra altas prestaciones reforzado con fibras. Como se había indicado anteriormente los componentes son cemento, humo de sílice, materiales cementantes suplementarios, arena fina sílicea, agua, aditivos superplastificantes y fibras. En la **Figura 1-5** se ilustra la composición esquemática del UHPFRC.



**Figura 1-5.** Composición esquemática del UHPFRC.  
Fuente: Tomado del (J. S. Park et al., 2015).

## ▪ Cemento

El termino conglomerante se utiliza para definir un compuesto de una o varias sustancias capaces de endurecer al reaccionar con otros productos, a corto plazo, como el cemento Portland. El cemento Portland es un material que amasado con agua, fragua y endurece tanto en el aire como sumergido en el agua (Sanjuán & Chinchón, 2006). Los compuestos principales del cemento Portland son: cal ( $\text{CaO}$ ), sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). En cuanto al UHPFRC emplea aproximadamente el doble de la cantidad de cemento requerido para un concreto convencional. Varios autores coinciden que la cantidad de cemento varía entre 600 y 1000  $\text{kg/m}^3$  (Scheydt & Müller, 2012), (Shi et al., 2015), (Abellán, Torres, et al., 2019). Por otro lado, los cementos con bajo contenido de aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) son aconsejados para las mezclas de concretos de altas prestaciones debido a su baja demanda de agua y bajo calor de hidratación (Yu, Spiesz, et al., 2014). Con relación al tamaño de las partículas de cemento convencional, tienen un diámetro promedio ( $d_{50}$ ) aproximado de 15 a 20  $\mu\text{m}$  (0.015 a 0.020 mm). Esta condición requiere implementar en la matriz cementante materiales con partículas de menor tamaño para rellenar los espacios entre las partículas de cemento. En la **Figura 1-6** se puede apreciar una fotografía del cemento utilizado para UHPC con diámetro promedio de partículas  $d_{50} = 7\mu\text{m}$ .

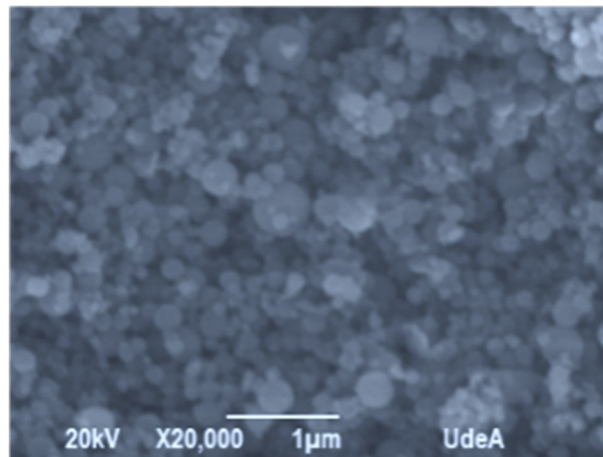


**Figura 1-6.** Fotografía del cemento ( $d_{50} = 8.0 \mu\text{m}$ ).  
Fuente: Tomado de (ASTM International, 2014).

### ▪ Humo de sílice

El humo de sílice (SF, por sus siglas en inglés) es un subproducto de la industria de las aleaciones de hierro, como el ferrosilíceo. En términos simples, es el hollín que queda adherido a los filtros de mangas cuando los gases pasan a través de éstos.

Durante el proceso de hidratación el cemento libera portlandita ( $\text{CH}$  o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), que en presencia de un material amorfo rico en sílice forma productos cementantes secundarios del tipo CSH que contribuyen a la resistencia del concreto. Además, los productos generados no liberan calor de hidratación. Por otra parte, el tamaño de las partículas promedio del SF está en el rango de los  $0.14 \mu\text{m}$  ( $0.00014 \text{ mm}$ ) y tienen forma esférica (Shi et al., 2015), como se pueden apreciar en la **Figura 1-7**.



**Figura 1-7.** Fotografía del humo de sílice visto desde el microscopio ( $d_{50} = 0.15 \mu\text{m}$ ).  
Fuente: Tomado de (Abellán, 2020).

El diseño del concreto de ultra altas prestaciones (UHPC) depende básicamente de la densidad de empaquetamiento y de la distribución del tamaño de partículas (DTP) de sus ingredientes. La DTP del cemento exhibe espacios entre sus partículas que deben llenarse con materiales más finos como el humo de sílice (SF). Llenar este espacio únicamente con SF requiere una gran cantidad de este material, entre un 25 a 30% del peso del cemento, debido a su extrema finura (Soliman & Tagnit-Hamou, 2017a). Este efecto de densificación, contribuye a la masa de concreto, a una menor porosidad, menor permeabilidad, mayor durabilidad y mayor resistencia (Shi et al., 2015). Sin embargo, el uso de un alto volumen de SF afecta negativamente a la reología del concreto. Además, los recursos limitados y

el alto costo de SF impiden el amplio uso de UHPC en el mercado del concreto (Soliman & Tagnit-Hamou, 2017a).

- **Harina de Cuarzo**

Este producto cristalino tiene la misma composición que la arena de sílice, pero con diámetros más pequeños, que usualmente oscilan entre el tamaño de las partículas de cemento y el de los agregados finos. Su incorporación a la mezcla se ajusta adecuadamente a la curva micro granulométrica, proporcionando mayor densidad de empaquetamiento de partículas, y restringiendo, por lo tanto, el espacio disponible para el crecimiento de los cristales de portlandita (CH) (Reda et al., 1999). Además, por sus características fisicoquímicas permite aumentar el tiempo de estabilización y proporciona una mejor estabilidad a la mezcla. En UHPFRC, el contenido de harina de cuarzo normalmente varía entre el 25 al 30% del volumen de la mezcla (Mazanec et al., 2010). En la **Figura 1-8** se puede apreciar una fotografía de la harina de cuarzo.



**Figura 1-8.** Fotografía de la harina de cuarzo ( $d_{50} = 15 \mu\text{m}$ ).  
Fuente: Tomado de (Abellán et al., 2018b).

- **Materiales cementantes suplementarios**

Los materiales cementantes suplementarios tienen el propósito de contribuir también con el empaquetamiento de partículas y a su vez aportar resistencia a la matriz cementante, gracias a las reacciones puzolánicas desarrolladas durante el curado del concreto.

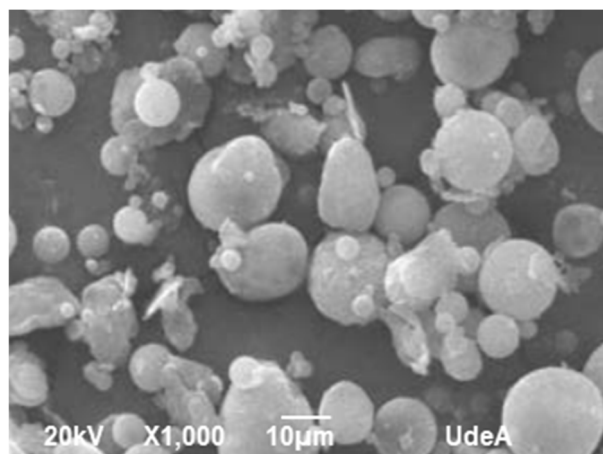


Además, debido al alto costo del UHPFRC, varios autores han optado por estudiar la sustitución parcial del contenido de cemento y humo de sílice, así como la sustitución total de la harina de cuarzo, por coproductos industriales como ceniza volante (Ferdosian et al., 2017), escoria granulada (Yazici et al., 2008), polvo de vidrio (Abellán et al., 2020) o ceniza de cascara de arroz (Van Tuan et al., 2012). Estos materiales son los más destacados como cementantes suplementarios y se han obtenido resultados positivos en los diferentes ensayos de caracterización realizados.

#### ▪ **Ceniza Volante**

La ceniza volante (FA, por sus siglas en inglés) es el residuo generado por la combustión en los quemadores de las centrales hidroeléctricas, alimentados a base de carbón pulverizado. En general, la FA se utiliza para remplazar una parte del contenido de cemento en las mezclas de concreto, hasta máximo un 10% del volumen. Estudios realizados han demostrado que porcentajes altos de esta adición, afectan la resistencia a compresión del concreto (Huaquisto & Belizario, 2018).

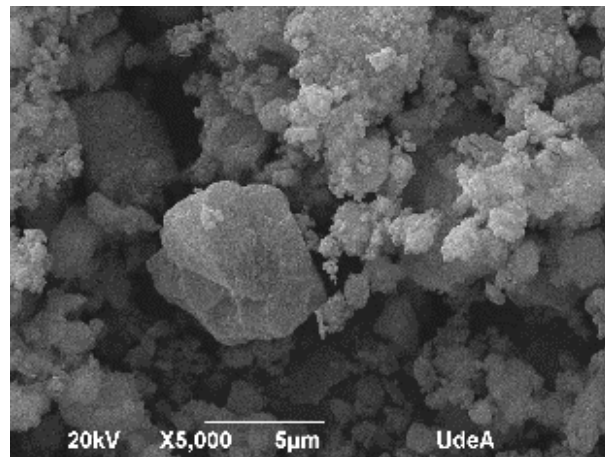
La incorporación adecuada de FA a las mezclas de UHPC reduce la porosidad, aumentan la fluidez y la resistencia. Además, las cenizas volantes ultrafinas con un  $d_{50}$  de 4,48  $\mu\text{m}$  pueden llegar a sustituir hasta el 20% del peso del cemento en mezclas de UHPC sin afectar la resistencia a compresión (Ferdosian et al., 2017). En la **Figura 1-9** se puede apreciar una fotografía de la ceniza volante vista al microscopio.



**Figura 1-9.** Fotografía de la ceniza volante vista desde el microscopio ( $d_{50} = 30 \mu\text{m}$ ).  
Fuente: Tomado de (Abellán, 2020).

### ▪ Escoria Granulada

Las escorias granuladas de alto horno o GGBSF (Ground-Granulate Blast-Slag Furnace) son conglomerantes puzolánicos. Se trata de residuos generados en el proceso de fusión de chatarras de hierro fundido en alto horno. Estudios demuestran que es viable sustituir hasta el 50% del volumen de cemento en las mezclas de concreto por GGBSF sin que se vea afectada la resistencia a compresión (Ceccato et al., 2009). En la **Figura 1-10** se puede apreciar una fotografía del GGBSF vista al microscopio.



**Figura 1-10.** Fotografía de la escoria granulada de alto horno vista desde el microscopio ( $d_{50} = 2.4 \mu\text{m}$ ).

Fuente: Tomado de (Abellán, 2020).

Las mezclas binarias de (SF – FA o SF – GGBSF) o ternarias (SF – FA – GGBSF) en alto volumen, tienen un rendimiento mecánico satisfactorio en UHPC. El contenido de cemento y humo de sílice puede ser disminuido hasta un 20% y ser reemplazado por FA y/o GGBFS, sin afectar la resistencia a compresión. La reducción en el contenido de SF reduce considerablemente la demanda de superplastificante, reduce el calor de hidratación y la contracción del UHPC (Yazici et al., 2008).

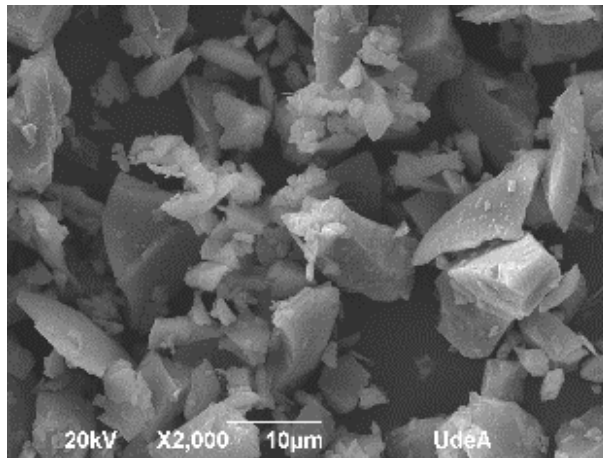
### ▪ Polvo de Vidrio

El vidrio tiene un alto contenido de sílice en su estado amorfo y puede comportarse como un material puzolánico cuando es molido finamente hasta su reducción a polvo (Vaitkevičius et al., 2014). El polvo de vidrio (GP, por sus siglas en inglés) mezclado con el cemento ejerce un efecto de retraso de las reacciones de hidratación, lo que permite



reducir la cantidad de calor liberado en el proceso de fraguado. Debido a sus propiedades puzolánicas puede utilizarse para reemplazar parcialmente el contenido de cemento (Trezza & Rahhal, 2018).

Investigaciones realizadas por (Soliman & Tagnit-Hamou, 2017a) indican que el GP se puede usar como reemplazo parcial del SF en UHPC. Dado que el polvo de vidrio con un tamaño medio de partículas ( $d_{50}$ ) de 3.8  $\mu\text{m}$ , presenta una distribución de tamaño de partículas (DTP) óptimo para llenar el espacio entre las partículas de cemento y las de humo de sílice, como se puede apreciar en la **Figura 1-11**. Los resultados de esta investigación demuestran que se pueden lograr valores de resistencia a la compresión de 235 y 220 MPa en 2 días de curado con vapor, respectivamente, al reemplazar entre el 30 y 50% de SF con GP, en comparación al UHPC de referencia que contenía 100% de SF y alcanzó una resistencia de 204 MPa. La reología del UHPC fresco se mejora al reemplazar las partículas de SF con partículas de vidrio con menor superficie específica y absorción de agua nula (Soliman & Tagnit-Hamou, 2017a).



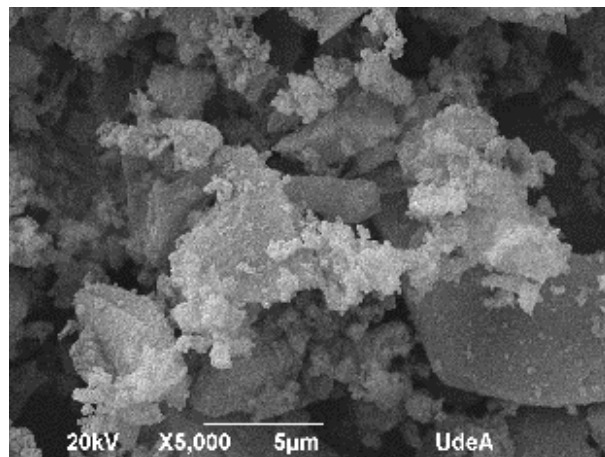
**Figura 1-11.** Fotografía del polvo de vidrio visto desde el microscopio ( $d_{50} = 7.0 \mu\text{m}$ ).  
Fuente: Tomado de (Abellán, 2020).

#### ▪ Ceniza de Cascara de Arroz

La cascara de arroz, corresponde a la parte dura que recubre los granos de arroz, y es un residuo habitual de la industria agrícola. La cascara de arroz se utiliza como combustible en la industria de la molienda o como combustible para generar energía (biomasa). Ahora bien, la ceniza de la cascara de arroz (RHA, por sus siglas en inglés) presenta un alto contenido de sílice amorfo (superior al 90%), siempre y cuando la temperatura de la

combustión sea controlada (Van Tuan et al., 2011). En consecuencia, el alto contenido de sílice en la RHA hace que sea un excelente material puzolánico y altamente reactivo al mezclarse con el cemento. Esta sinergia ayuda a la resistencia del concreto. Estudios desarrollados por (Camargo, 2015), indican que puede sustituirse hasta el 5% del contenido de cemento por ceniza de cascara de arroz, sin afectar la resistencia a compresión del concreto convencional.

Por otra parte, la incorporación de RHA, con un tamaño medio de partículas ( $d_{50}$ ) de 3.6 a 9.0  $\mu\text{m}$  a la mezcla de UHPC, permite incrementar la resistencia a compresión con dosificaciones del 10% en peso del cemento. Esto se debe a que el RHA absorbe agua durante la hidratación del concreto (debido en este caso a su alta porosidad) y la va expulsando durante el curado, optimizando de esta forma la hidratación del UHPFRC desde su interior (Van Tuan et al., 2012). En la **Figura 1-12** se puede apreciar una fotografía de la ceniza de la cascara de arroz vista desde el microscopio.



**Figura 1-12.** Fotografía de la ceniza de la cascara de arroz vista desde el microscopio ( $d_{50} = 7.5 \mu\text{m}$ ).

Fuente: Tomado de (Abellán, 2020).

#### ▪ Arena fina silícea

Como se ha indicado anteriormente uno de los factores más destacados para obtener altas resistencias en los UHPFRC se debe al empaquetamiento de partículas. Por lo cual, el agregado; en este caso agregado fino, debe ser homogéneo para optimizar el empaquetamiento de partículas, y debe ser de una gradación fina para optimizar la transferencia de esfuerzos de la matriz a la fibra. Las arenas utilizadas en estos concretos

son seleccionadas y con tamaño de partículas máximos entre 500 y 1000  $\mu\text{m}$  (0.5 y 1.0 mm). Es primordial que la resistencia mecánica del agregado fino sea elevada, para evitar fallas en el concreto debido a la debilidad del agregado (Yu, Spiesz, et al., 2014). En la **Figura 1-13** se puede apreciar una fotografía de la arena silícea.



**Figura 1-13.** Fotografía de la arena silícea ( $d_{max} = 600 \mu\text{m}$ ).  
Fuente: El autor.

Además, otros autores han estudiado la sustitución de la arena silícea por arena local e incluso por vidrio reciclado (Soliman & Tagnit-Hamou, 2017b).

#### ▪ Agua

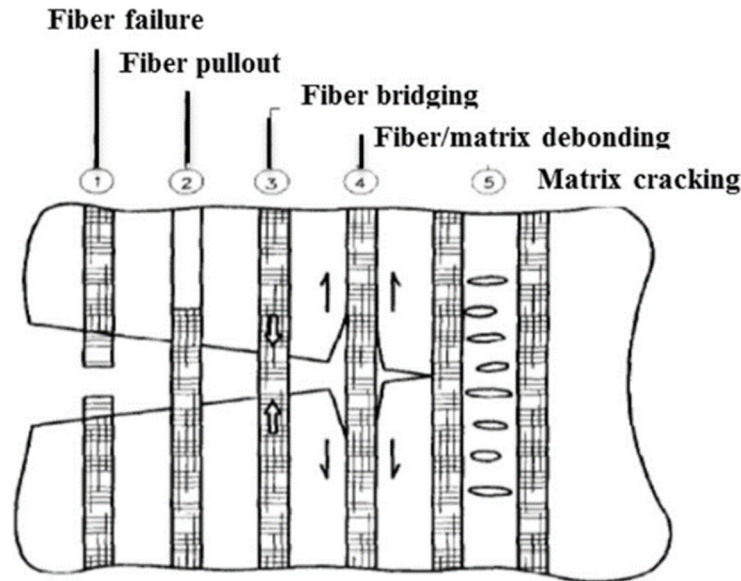
El agua es un componente esencial en las mezclas de mortero y concreto, dado que permite desarrollar la capacidad ligante del cemento. De la cantidad total de agua que el concreto requiere, una parte se necesita para la hidratación del cemento, mientras que el resto del líquido sólo sirve para aumentar la fluidez y para desarrollar la función de lubricante en los agregados. La dosificación adecuada de agua, proporciona manejabilidad en las mezclas frescas. Por el contrario, el agua adicional que pueda quedar dentro de la mezcla es una masa que al fraguar el concreto crea poros, reduciendo la resistencia. Razón por la cual, cuando se requiera una mezcla manejable para los procesos constructivos, debe obtenerse esta condición mediante el uso de aditivos superplastificantes de alto rango (Gutiérrez, 2003). En las mezclas de UHPFRC las relaciones habituales agua conglomerante o binder ( $w/b$ ) van de 0.14 a 0.20 en lugar de 0.4 a 0.5, como es el caso de los concretos convencionales. Debido a la baja relación  $w/b$  en la mezcla de UHPFRC, se estima que el 40% del cemento no se hidrata (Shi et al., 2015).

- **Aditivos superplastificantes**

El desarrollo de policarboxilatos (superplastificantes) ha permitido que se desarrollen concretos de mejores prestaciones. Los aditivos reductores de agua de alto rango, diseñados con policarboxilatos de última generación, permiten ofrecer tiempos adecuados de trabajabilidad en condiciones de bajas relaciones de agua cemento ( $w/c$ ), dispersando los flóculos de cemento y reduciendo los espacios vacíos (D. Wang et al., 2015). Para producir concretos convencionales autocompactantes normalmente se recurren a las especificaciones del producto donde la dosificación recomendada se encuentra entre 0.1 y 1.2% del peso del cemento (Euclid - Toxement, 2017). En cambio, para la producción de UHPFRC usualmente se suministran cantidades de aditivo superplastificante entre 1.7 a 2.7% del volumen de la mezcla debido a las altas concertaciones de cemento y humo de sílice (ACI Committe 239R, 2018), (Abellán et al., 2018b).

- **Fibras**

El concreto reforzado con fibras (FRC, por sus siglas en inglés) ha sido implementado en la construcción desde la década de 1980, aunque sus usos a menudo se limitan a aplicaciones no estructurales, en parte debido a limitaciones de desempeño y por la falta de pautas de diseño completas (Li et al., 2001). Por lo tanto, a pesar que las fibras aún no pueden reemplazar directamente las barras de refuerzo convencional, y solo causan un incremento modesto en la resistencia a compresión para FRC, pueden ser usadas para controlar el agrietamiento, mejorar la resistencia al impacto e incrementar la tenacidad del concreto, entre otras mejoras. Las fibras aumentan las propiedades mecánicas del FRC al coser las fisuras y al transferir la carga a la matriz a través del proceso de extracción de las mismas. La **Figura 1-14** muestra como las fibras absorben energía y controlan el crecimiento de las fisuras, comenzando desde la fibra a la izquierda y avanzando a lo largo de la fisura hacia la derecha. Esta figura representa la ruptura de la fibra, la extracción de la fibra, el puente por tensión a través de la fibra y la unión interfaz matriz-fibra (Shi et al., 2015).



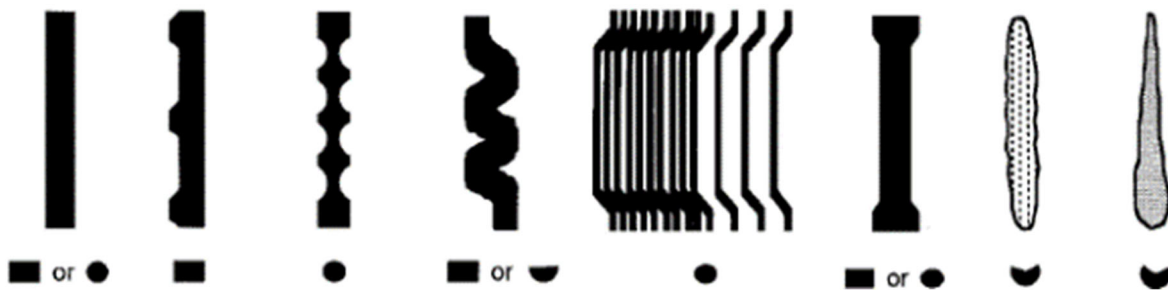
**Figura 1-14.** Mecanismo de absorción de energía en la interfaz matriz-fibra.  
Fuente: Tomado del (Shi et al., 2015).

La resistencia a la extracción es fundamental para el desempeño de la fibra en el FRC (O'Connell, 2011). Las fibras de metálicas usualmente tienen dobleces en los extremos que sirven de anclaje mecánico, para resistir la extracción, mientras que para las fibras poliméricas el enlace intersticial matriz-fibra se considera como el factor principal para mejorar las propiedades mecánicas del FRC. Los enlaces por tanto pueden ser por adherencia física o química, por fricción, mediante anclaje mecánico o entrelaces de fibra a fibra (Naaman & Najm, 1991). Algunas innovaciones en la fabricación de fibras sintéticas incluyen la fibrilación y superficies con relieve para mejorar la unión matriz-fibra (Kim, El-Tawil, et al., 2008).

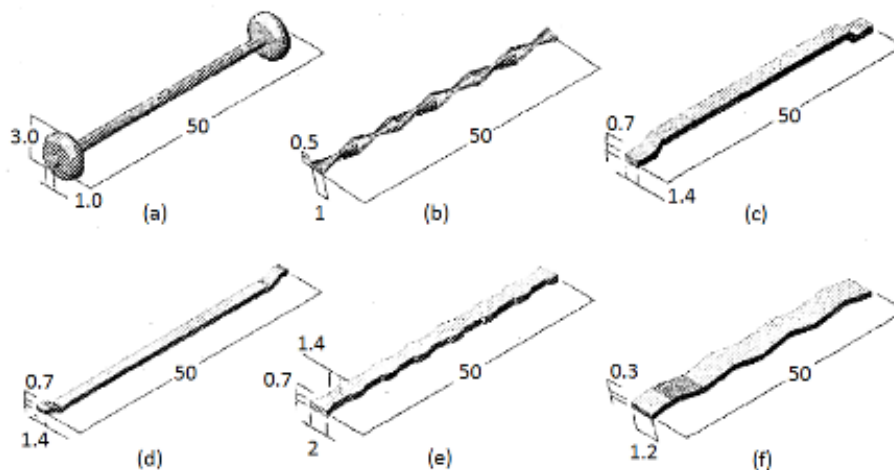
Las fibras usadas en el FRC son discretas y se distribuyen aleatoriamente; tienen una longitud ( $l_f$ ) que no excede los 76 mm y no superan 1 mm de diámetro ( $d_f$ ) (ACI Committe 544, 2002). La geometría de las fibras está determinada primordialmente por su esbeltez o relación de aspecto, correspondiente al cociente entre la longitud de la fibra y su diámetro equivalente ( $l_f/d_f$ ). Este factor tiene gran influencia en las características mecánicas de los FRC. El ACI 544, indica que una mayor relación de aspecto o esbeltez es ideal para mejorar el comportamiento del concreto después de presentar la primera fisura, momento en el cual las fibras inician su trabajo. Por lo tanto, la fibra con mayor esbeltez genera mayor resistencia a ser extraída de la matriz (ACI Committe 544, 2002). No obstante, una

fibra muy larga puede generar problemas al momento de elaborar la mezcla de concreto, generando nidos o aglomeraciones de fibras puntuales (Yoo et al., 2017). Por lo general, las dosificaciones de fibras en las mezclas son comúnmente expresadas en fracción de volumen ( $V_f$ ).

Las fibras a su vez han avanzado en dos grupos principalmente según su tamaño: macro-fibras de diámetro mayor a 0.30 mm y micro-fibras de diámetro menor a 0.30 mm (Ministerio de Fomento, 2010). Las fibras están disponibles en materiales como acero, fibra de vidrio, nylon, polietileno, polipropileno, polivinilo de alcohol, poliéster, acrílico, entre otras (Ministerio de Fomento, 2010). En la **Figura 1-15** y **Figura 1-16** se puede apreciar la geometría típica de las macro-fibras tanto metálicas como poliméricas utilizadas para reforzar el concreto.



**Figura 1-15.** Geometría de las macro-fibras metálicas más comunes.  
Fuente: Tomado del (ACI Committe 544, 2002).



**Figura 1-16.** Geometría de las macro-fibras poliméricas más comunes (dimensiones en mm): (a) botón en los extremos; (b) retorcida; (c) extremo enganchado; (d) extremos sinusoidales; (e) doble deformación; (f) rizada.

Fuente: Tomado del (Won et al., 2009).

Generalmente, las micro-fibras logran controlar y mitigar la fisuración por contracción plástica, reducen la segregación, el asentamiento plástico, la exudación del concreto y la permeabilidad y, proporcionan resistencia al impacto y a la abrasión de la superficie expuesta. Son además de fácil adición a la mezcla de concreto en cualquier momento del mezclado. En algunos casos, reducen el costo si se compara contra el uso de malla metálica destinada solamente al control de fisuras por temperatura o contracción (Markovic, 2006).

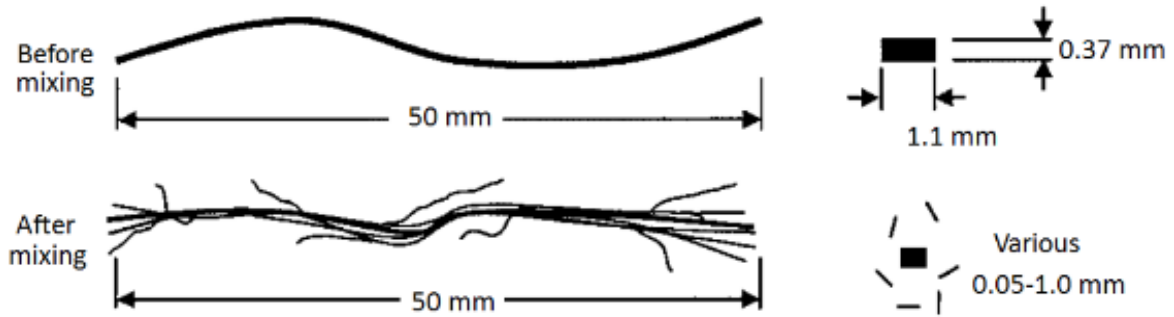
Las macro-fibras además de cumplir con la gran mayoría de ventajas de las micro-fibras, pueden ser utilizadas en algunos casos como refuerzo estructural permitiendo reemplazar la malla electrosoldada en algunos casos. Sin embargo, al comparar las macro-fibras poliméricas con las metálicas se pueden observar algunas ventajas, como la optimización del rebote para concretos lanzados y una excelente dispersión en el concreto. Además, las fibras poliméricas reducen el deterioro de los equipos, no se corroen, no son magnéticas y no constituyen un refuerzo estructural conductible (Acero, 2017). Entre las fibras poliméricas más usadas para reforzar el concreto se encuentran el nylon, el polivinilo de alcohol, el polipropileno o mezcla de polímeros como el polipropileno y el polietileno. Las características de estas fibras poliméricas se describen a continuación:

- La poliamida o más conocido como nylon es un material usado con frecuencia en la industria textil, y tiene un costo relativamente bajo. Las fibras de nylon tienen altas resistencias a la tracción. Además, son estables en ambientes alcalinos y calientes. Por su naturaleza de origen hidrofílica puede hincharse al entrar en contacto con el agua, esta condición aumenta ligeramente la fricción entre la fibra y la matriz, por lo cual se incrementa la resistencia a la extracción del concreto (Geng & Leung, 1996). Además, el nylon desarrolla descamación o virutas al momento de la extracción. Este efecto aumenta el esfuerzo de corte por fricción en la interfaz y por lo tanto, aumenta la adherencia de la matriz con la fibra (Geng & Leung, 1996). Sin embargo, las fibras de nylon han demostrado históricamente baja fuerza de unión (Y. Wang et al., 1988).
- El polivinilo de alcohol (PVA, por sus siglas en inglés) es un material utilizado con frecuencia para reforzar concretos con fibras poliméricas, debido a su alta resistencia a la tracción y alta fuerza de unión. También es resistente a los ambientes alcalinos y tiene un punto de fusión alto. El PVA es hidrofílico y crea un fuerte enlace químico entre

la fibra y la matriz circundante. Desafortunadamente, el enlace matriz-fibra es tan fuerte que la fibra a menudo se rompe antes de salir de la matriz (O'Connell, 2011). Además de esto, las fibras de PVA tienen baja resistencia lateral y, por lo tanto, es más probable que se fracturen durante la extracción inclinada (Li et al., 2001). Si bien esto mejora la ductilidad del material compuesto, reduce la dureza. Para disminuir el enlace matriz-fibra a una resistencia más adecuada, las fibras de PVA son recubiertas con un agente lubricante (Li et al., 2011), este proceso de lubricación, incrementan los costos de producción de la fibra en comparación con las demás fibras poliméricas.

- El polipropileno (PP) es un material que tiene un costo relativamente bajo y presenta altas propiedades de tracción cuando se produce mediante extrusión por fusión. También es resistente al calor, es hidrófobo y exhibe una excelente resistencia a la degradación en ambientes alcalinos. Las fibras de polipropileno tienden a desarrollar deformaciones en la superficie durante la extracción. Estos defectos pueden formar un enlace mecánico con la matriz al aumentar la resistencia a la fricción (Geng & Leung, 1996). Permitiendo que las fibras de polipropileno desarrollen un comportamiento exitoso en el FRC. Además, la superficie de la fibra presenta deformaciones inducidas mecánicamente en forma de rizado, estas deformaciones permiten aumentar la adherencia matriz-fibra (Won et al., 2006).
- Las fibras con mezclas de polímeros, como es el caso de la macro-fibra TUF Strand SF de Toxement, contienen por lo general, 77% de polipropileno (PP) y 23% de polietileno de alta densidad (PE), esta fibra fue desarrollado por (Trottier & Mahoney, 2001) para uso en el concreto reforzado. Esta fibra es auto-fibrilante, es decir, los extremos de la fibra se deshilachan durante la mezcla proporcionando un enlace mecánico significativo con la matriz de concreto. La fibrilación ocurre cuando los materiales se dividen parcialmente para formar fibrillas, como se puede observar en la **Figura 1-17**.



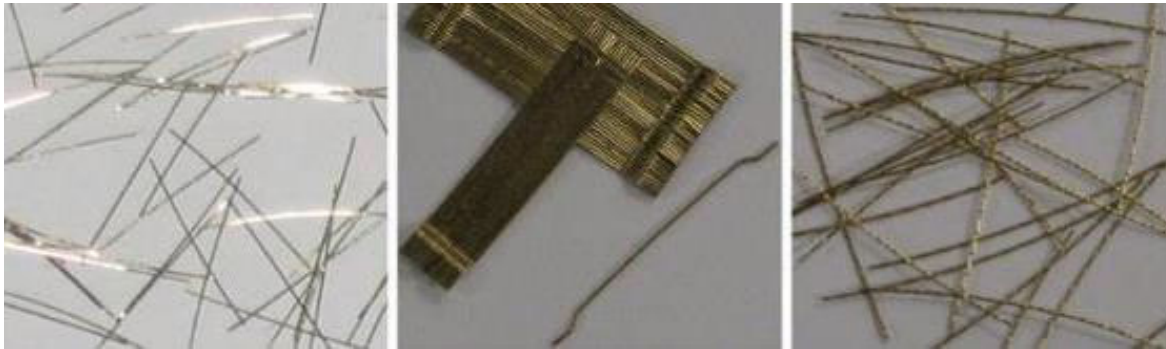


**Figura 1-17.** Fibrilación de una fibra y cambio de dimensiones antes y después de la mezcla.

Fuente: Tomado de (Trottier et al., 2002).

Las fibrillas incrementan el área de superficie expuesta a la matriz, esta condición genera mayor absorción de agua y por ende reduce el flujo en la mezcla (Trottier & Mahoney, 2001). Sin embargo, las fibrillas incrementan la fuerza de anclaje mecánico, haciendo que las fibras se agrupen. Esto reduce la dispersión de la macro-fibra en la mezcla, especialmente en altas dosificaciones (O'Connell, 2011). Por lo tanto, la cantidad de fibras individuales que interactúan directamente con la matriz se reduce (Li et al., 1990).

En el caso de las micro-fibras metálicas más usadas para reforzar UHPFRC a nivel mundial corresponden a la micro-fibras de acero de alta resistencia OL13/0.2 de Dramix. Estas fibras se caracterizan por un diámetro pequeño y una esbeltez relativamente alta ( $l_f/d_f = 13/.02 \text{ mm}$ ), que ofrece una buena compensación entre capacidad de absorción de energía y alta resistencia a la extracción (Wille et al., 2010). En cuanto a las macro-fibras metálicas deformadas más usadas para reforzar el UHPFRC se pueden clasificar en dos grupos: con deformación en el extremo de la fibra, que proporciona una unión mecánica en los extremos, y otra con deformación uniformemente distribuida, que proporciona una unión mecánica sobre toda la longitud de la fibra (Wille et al., 2010). En la **Figura 1-18** se puede apreciar una fotografía de las fibras metálicas más usadas en investigaciones para reforzar UHPFRC.



**Figura 1-18.** Fotografías de fibras metálicas típicas para UHPFRC. De izquierda a derecha se presenta la micro-fibra metálica recta y lisa, macro-fibra metálica con gancho y macro-fibra metálica altamente retorcida.

Fuente: Tomado de (Wille et al., 2010).

### 1.1.5 Dosificaciones del UHPFRC

Las altas resistencias y el rendimiento superior alcanzado por las mezclas de UHPFRC provienen de la reducción del espacio vacío en la matriz, la reducción de poros, la reducción de agua en la mezcla y la interacción matriz-fibra (Katrin, 2003), (ACI Committee 239R, 2018). En consecuencia, el diseño de mezcla del UHPFRC debe lograr una matriz con la mayor densidad de empaquetamiento posible, una porosidad reducida y una microestructura interna mejorada para lograr unas propiedades mecánicas y de durabilidad superiores (Scheydt & Müller, 2012).

En la década de 1930, Andreasen y Andersen (A&A) desarrollaron un estudio sobre el empaquetamiento de partículas de tamaño continuo, basado en la teoría de los fractales, que les permitió determinar la distribución del tamaño de partículas que proporcionaba la densidad de empaquetamiento más alta (Andreasen & Andersen, 1930). Sin embargo, años después Funk y Dinger modifican el modelo para tener en cuenta el tamaño de las partículas más pequeñas, consideradas antes como cero. Este nuevo modelo se conoce como A&A modificado, el cual constituye uno de los criterios principales para determinar la granulometría del UHPFRC y además indica que cuanto mayor es la densidad de empaquetamiento de los componentes, mayor es la cantidad de agua libre en la mezcla que actúa como lubricante (Funk & Dinger, 1994). Este elevado empaquetamiento, junto con la incorporación de superplastificante en la mezcla, ayuda a reducir la relación agua conglomerante ( $w/b$ ) (Shi et al., 2015).

La ecuación de A&A modificada establece una relación entre los tamaños de partículas máximos y mínimos basados en los componente granulares, de acuerdo con la fórmula que se describe en la *Ecuación 1-1* (Funk & Dinger, 1994).

$$P_{tar}(D) = \frac{D^q - D_{Min}^q}{D_{Max}^q - D_{Min}^q}$$

**Ecuación 1-1**

Donde:

$D$  : representa el tamaño de la partícula.

$P_{tar}$  : es la fracción en peso de solidos totales con tamaño inferior a  $D$ .

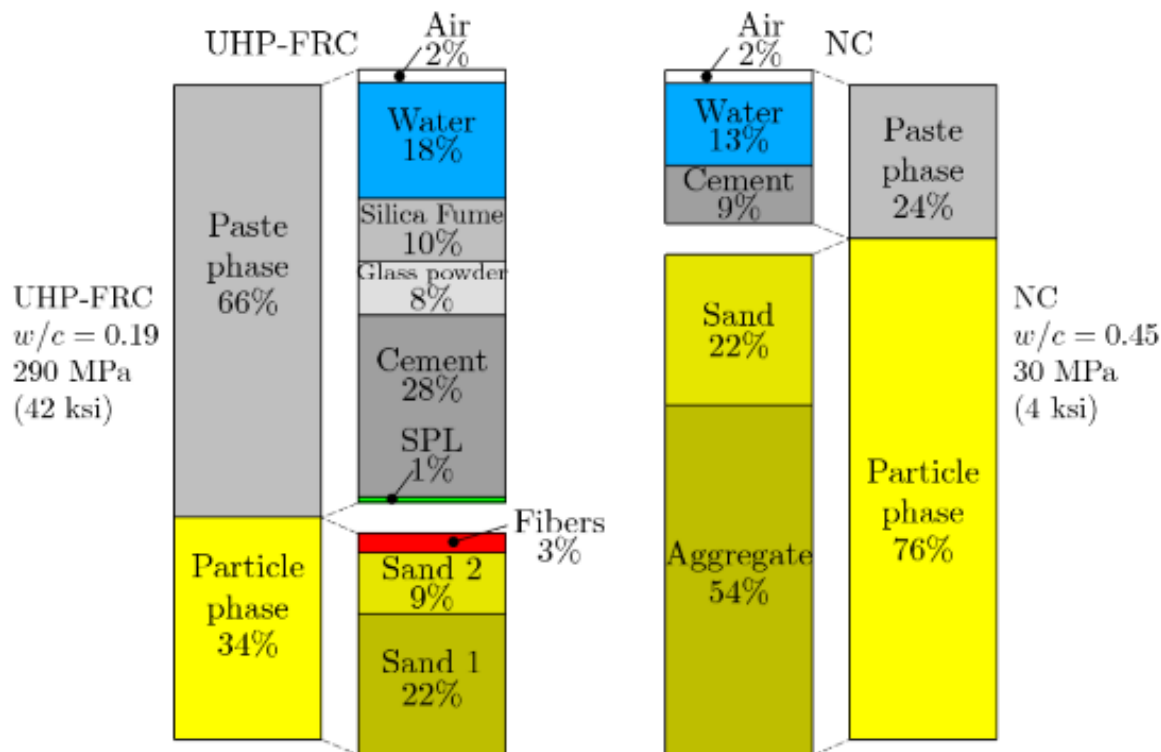
$D_{Max}$  : tamaño máximo de partícula.

$D_{Min}$  : tamaño mínimo de partícula.

$q$  : representa el exponente de Fuller. Este exponente determina la proporción de contenido de (pasta de cemento / agregados) necesarios para lograr la mayor densidad de empaquetamiento de partículas posible (Abellán et al., 2020).

Investigaciones desarrollas por (Abellán et al., 2018b), con respecto a la influencia del exponente de Fuller ( $q$ ), la relación agua conglomerante ( $w/b$ ) y el contenido en policarboxilato ( $PCE$ ) en las propiedades de concretos de muy altas prestaciones observaron que para lograr la resistencia a la compresión máxima, con economía, sostenibilidad y buena trabajabilidad, el diseño de mezcla debía cumplir con las siguientes relaciones:  $q$  de aproximadamente 0.275,  $w/b$  de aproximadamente 0.16 y un contenido de superplastificante de 1.8% en volumen.

De otro lado, la **Figura 1-19** presenta una comparativa entre una dosificación típica de UHPFRC y una dosificación de concreto convencional. En la cual se puede apreciar que el UHPFRC tiene un 66% de pasta cementante y solo un 34% de agregado fino. En cambio, el concreto convencional tiene 24% de pasta cementante y 76% agregados. Cabe resaltar que la relación agua cemento ( $w/c$ ) del concreto convencional es 2.4 veces mayor que la relación del UHPFRC y la resistencia a compresión es prácticamente la décima parte de la resistencia del UHPFRC.



**Figura 1-19.** Un ejemplo de dosificación de materiales en volumen, comparando UHPFRC con un concreto convencional.

Fuente: Tomado de (Naaman & Wille, 2012).

## 1.2 Propiedades en estado fresco del UHPFRC

El concreto autocompactante (SCC por sus siglas en inglés) es un concreto que en su estado fresco puede fluir lo suficiente para llenar todos los espacios y pasar obstáculos como las barras de refuerzo, así como consolidar bajo la acción de su propio peso, sin presentar segregación (Pereira et al., 2008). El desarrollo del SCC ha generado grandes aumentos en la productividad, ya que la mano de obra necesaria para vibrar el concreto se reduce o elimina.

El UHPFRC es un concreto autocompactante, razón por la cual el empleo de superplastificantes es fundamental para lograr un concreto con suficiente manejabilidad (Camacho, 2013). El objetivo principal de las mezclas de UHPFRC es alcanzar un alto empaquetamiento de partículas. No obstante, la relación agua conglomerante ( $w/b$ ) y el contenido en superplastificante ( $PCE$ ) son otros factores relevantes no solo para alcanzar

una alta resistencia a compresión, sino la viscosidad y fluidez de la mezcla en estado fresco, factores determinantes para la puesta en obra del material (Abellán et al., 2018b). Al diseñar una mezcla autocompactante con fibra polimérica, es importante proporcionar suficiente pasta de cemento para permitir el libre movimiento del agregado y las fibras, para que fluya la mezcla, mientras se mantiene una viscosidad adecuada para evitar segregación. El superplastificante es un aditivo comúnmente usado para aumentar la fluidez del concreto, sin embargo, una dosificación alta puede causar segregación y sangrado de la pasta de cemento, (Forgeron & Omer, 2010); por lo tanto, se requiere un equilibrio para mantener la estabilidad de la mezcla mientras aumenta la fluidez. Un aumento en el contenido de fibra requiere una reducción en el diámetro de las partículas del agregado o un aumento en el contenido de pasta para cubrir el área de superficie de fibra adicional.

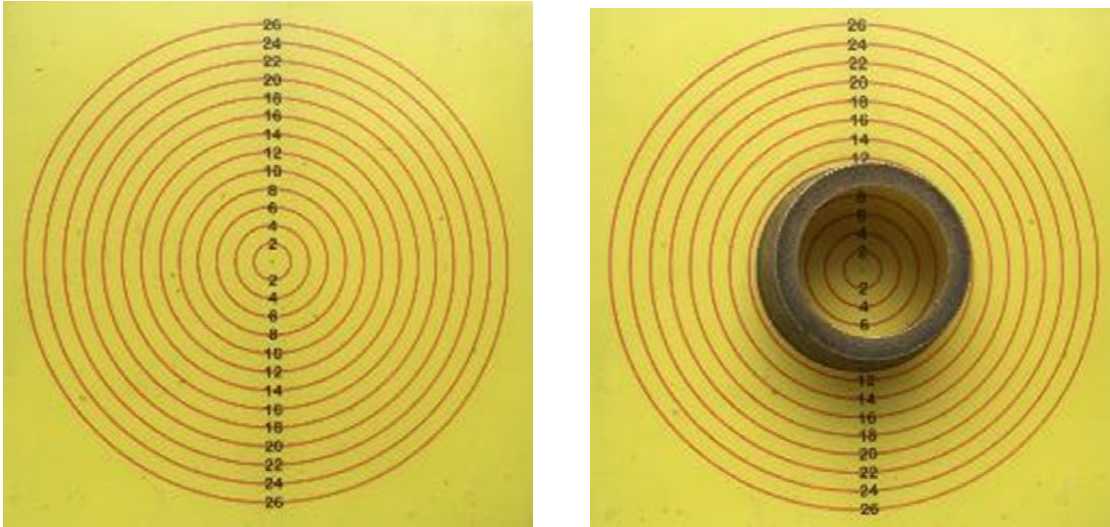
Existe una contradicción inherente entre la geometría de la fibra requerida para permitir un fácil manejo del FRC fresco, y la geometría requerida para alcanzar la máxima eficiencia en el compuesto endurecido. Dado que las fibras más largas y con un diámetro reducido, presentan un comportamiento más eficiente en el FRC endurecido, pero hacen que el FRC en estado fresco sea más difícil de manejar (Banthia & Mindess, 1995). Esto fue apoyado por (Grünewald & Walraven, 2001) quienes encontraron que dependiendo de cada concreto la mezcla tiene un "contenido máximo de fibra" más allá del cual se compromete la trabajabilidad de la mezcla.

### **1.2.1 Flujo estático**

Es necesario medir el flujo estático en los concretos autocompactantes como es el caso de los UHPFRC, para establecer la trabajabilidad y viscosidad de la mezcla. Las normas más utilizadas para determinar el flujo de la mezcla corresponden a la norma ASTM C1437 y la norma EFNARC. A continuación, se hace una breve descripción de las mismas:

La norma ASTM C1437 (ASTM International, 2013b) describe el proceso y parámetros de la prueba estándar para medir el flujo de un mortero de cemento hidráulico. Para obtener la medida del flujo se utiliza la tabla de flujo, donde se proyectan circunferencias con valores de diámetros cada 20 mm hasta alcanzar los 260 mm, todas las circunferencias comparten un centro en común; para tomar la medida se requiere de un calibrador con

capacidad de medir hasta 260 mm; también se requiere el molde de flujo que tiene forma de cono truncado. En la **Figura 1-20** se pueden apreciar los implementos para determinar el flujo estático en el laboratorio.



**Figura 1-20.** *Tabla de flujo y molde de ensayo.*  
*Fuente: El autor.*

Para iniciar la medición del flujo estático, los implementos deben estar limpios y ligeramente húmedos para evitar que absorban agua de la mezcla. La tabla y el molde de flujo deben estar alineados centro a centro, luego se incorpora la mezcla por la sección reducida del molde y se llena por completo. Antes de retirar el molde, se verifica que la tabla este limpia de residuos de concreto que puedan influir en dispersión de la mezcla. El molde se debe retirar de forma ascendente (perpendicular a la tabla) sin hacer pausas y debe sujetarse con ambas manos para obtener una dispersión de la mezcla uniforme.

El UHPFRC por su característica de ser autocompactante se extiende por lo general en forma circular a menos que la concentración de fibras lo impidan. Pasados 15 segundos se realiza la medición de los cuatro diámetros de la circunferencia de concreto. Los diámetros a medir corresponden a la proyección de dividir la circunferencia en 8 partes iguales. Es decir, el primer diámetro corresponde a la medida que se obtendría de dividir la circunferencia de arriba a abajo, el segundo diámetro corresponde a la medida que se obtendría de dividir la circunferencia de izquierda a derecha, el tercer diámetro corresponde a la medida que se obtendría de la división del cuadrante superior izquierdo a la división del cuadrante inferior derecho y el cuarto diámetro corresponde a la medida que se obtendría de la división del cuadrante inferior izquierdo a la división del cuadrante

superior derecho. Finalmente, estas medidas están asociadas a la forma de una cruz (+) y la forma de una equis (x), inscritas en la circunferencia. Para considerar una mezcla autocompactante el promedio de los diámetros debe ser  $250 \pm 5$  mm.

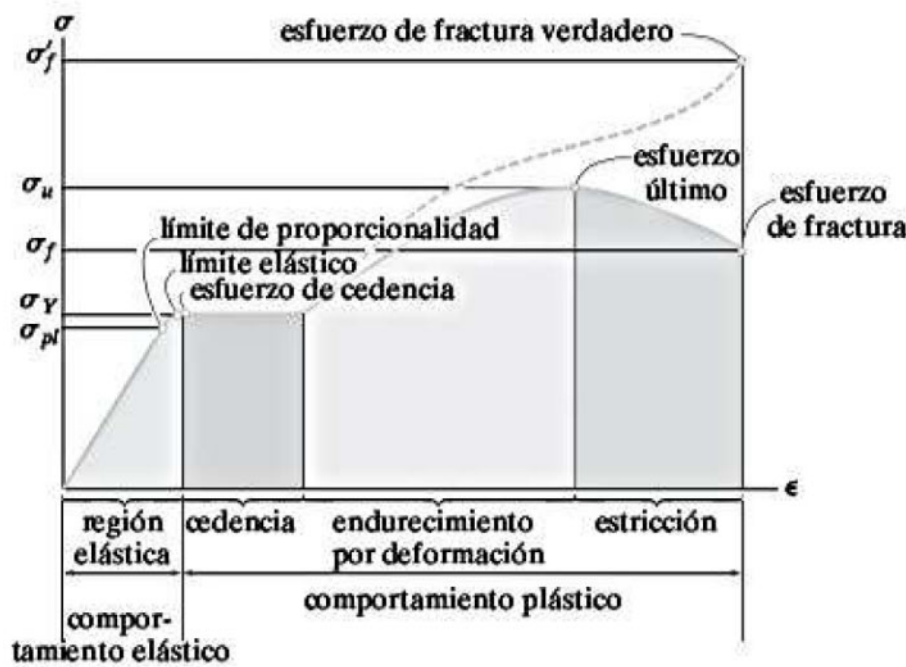
La norma EFNARC (The European Project Group, 2005) establece la relación óptima de agua / finos y la dosificación de superplastificante en el mortero. Para alcanzar una manejabilidad óptima establece que el flujo estático debe ser de 240 a 260 mm, en los ensayos con el cono de flujo como el propuesto por la norma ASTM C1437.

## 1.3 Propiedades mecánicas del UHPFRC

Como se había indicado anteriormente los UHPFRC tienen altas prestaciones mecánicas tanto a compresión, tracción y flexión. A continuación, se realiza una breve descripción de estas prestaciones:

### 1.3.1 Propiedades de los materiales dúctiles

Todos los materiales hasta cierto punto son elásticos, es decir, tienen la propiedad de recuperar prácticamente su estado inicial al retirar una fuerza que los deforma. Sin embargo, existe una fuerza, por encima de la cual no recupera su forma y genera una deformación permanente en el elemento. Los materiales que pueden desarrollar este tipo de deformaciones se denominan materiales dúctiles (Gutiérrez, 2003). En la **Figura 1-21** se puede apreciar las etapas del comportamiento elástico y plástico de un material dúctil como el acero.



**Figura 1-21.** Diagrama de esfuerzo – deformación convencional y verdadero para el acero (no se presenta a escala).

Fuente: Tomado de (Hibbeler, 2011).

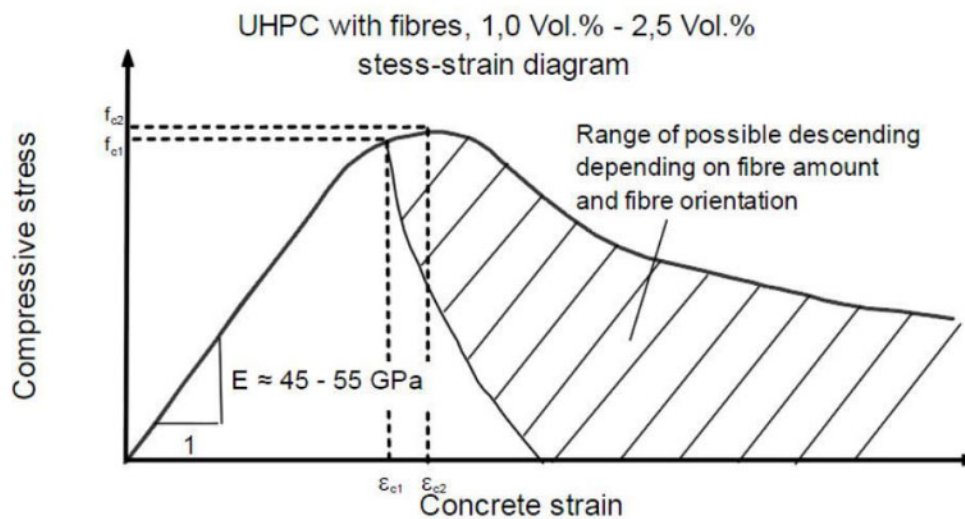
La ductilidad en los materiales permite que presenten deformaciones altas antes de que se produzca la falla. En consecuencia, gran parte de las investigaciones en materiales y estructuras se han enfocado en determinar la ductilidad y el comportamiento post-fisuración de los mismos. Los resultados obtenidos han permitido desarrollar los lineamientos de las normas sísmo resistentes para la construcción de estructuras con materiales o elementos dúctiles, como el concreto reforzado con acero, capaz de soportar adecuadamente las fuerzas sísmicas. Esta capacidad de soportar fuerzas está estrechamente ligada con la capacidad de absorción de energía o tenacidad del material. Es decir, que las estructuras conformadas en gran parte por materiales dúctiles, podrán absorber parte de la energía provocada por el sismo, presentando deformaciones altas, superiores a las asociadas al límite de proporcionalidad o límite elástico, pero sin que el material falle o colapse la estructura. De esta forma, la estructura presentará un nivel de daño aceptable para preservar la vida de las personas que se encuentren en ella (Machuca & Sarmiento, 2016).



### 1.3.2 Compresión

La resistencia a la compresión del concreto convencional se encuentra entre 21 y 55 MPa aproximadamente. Para concretos de altas resistencias (HPC) los valores oscilan entre 83 y 110 MPa y, para los concretos de muy altas prestaciones reforzados con fibras (VHPFRC) la resistencia esta entre 110 a 150 MPa. En el caso de concretos de ultra altas prestaciones reforzados con fibras (UHPFRC), la resistencia a compresión está en el rango de 150 y 220 MPa (Richard & Cheyrezy, 1995). Sin embargo, cuando los concretos son sometidos a un curado térmico, pueden alcanzar mayores resistencias, debido a que el tratamiento con calor inicia la formación de más hidratos, los cuales aportan parte de la alta resistencia a la mezcla (Shi et al., 2015).

El comportamiento elástico a compresión en los UHPFRC, se mantiene hasta un nivel del 70 al 80% de la carga máxima (Spasojevic, 2006). En la **Figura 1-22** se puede apreciar un diagrama a compresión típico de este tipo de concretos y su variación en ductilidad en función de la cantidad de fibras presentes. No obstante, el objetivo de este concreto no solo es tener una elevada resistencia a la compresión sino desarrollar un comportamiento dúctil (Abellán et al., 2018a). La exigencia de ductilidad conlleva a la capacidad de soportar esfuerzos a tracción y flexión, pero, sobre todo, que estos se mantengan cuando la matriz se fisura. Estos objetivos pueden lograrse gracias a la incorporación de fibras (Serna et al., 2012).



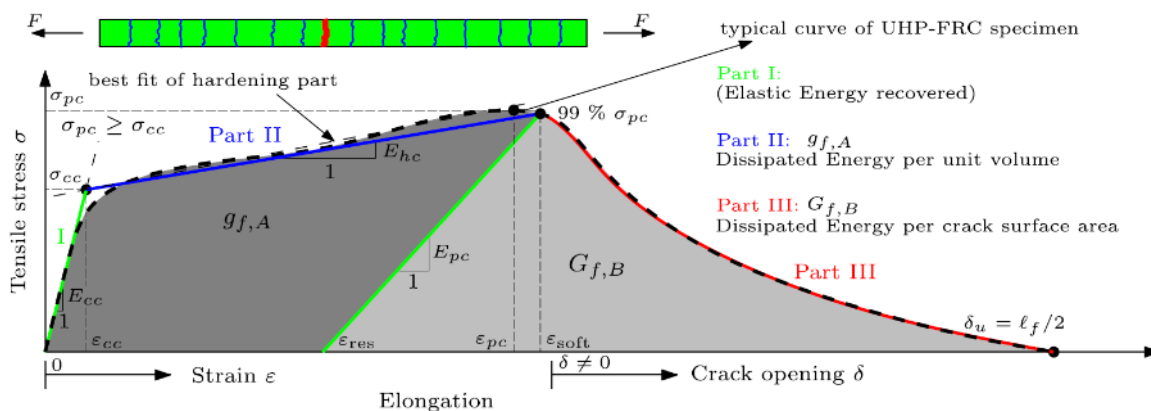
**Figura 1-22.** Gráfica esfuerzo vs deformación de UHPFRC a compresión, reforzado con diferentes porcentajes de fibras.

Fuente: Tomado de (Cordero, 2015).

### 1.3.3 Tracción

La dosificación de fibra en los concretos de ultra altas prestaciones juegan un papel esencial en la ductilidad y la absorción de energía, incluso en concretos que estén sometidos a esfuerzos de tracción directa. Si la dosificación de fibras es la adecuada, se desarrolla un fenómeno conocido como endurecimiento por deformación, en el cual la resistencia máxima a tracción soportada por el UHPFRC, es superior a la tensión que produce la fisuración del mismo. La resistencia a tracción en UHPFRC, por lo general suele ser superior a los 7.0 MPa. El incremento en la resistencia a tracción depende fundamentalmente de la cantidad, tipo y orientación de las fibras (Abellán et al., 2018a).

En la **Figura 1-23** se presenta la curva de tensión versus deformación para un UHPFRC típico, sometido a tracción directa. En el gráfico se puede apreciar el fenómeno de endurecimiento por deformación, este fenómeno se desarrolla cuando el esfuerzo a tensión máximo  $\sigma_{pc}$  excede el esfuerzo fisuración  $\sigma_{cc}$ . También se puede apreciar el comportamiento a tracción en este tipo de concretos, dividido en tres etapas: la primera etapa (I), comprende los esfuerzos de tensión desarrollados en la parte elástica, delimitada por el esfuerzo inicial hasta  $\sigma_{cc}$ , punto de transición entre el comportamiento ideal elástico al endurecimiento por deformación. En la segunda etapa (II), se presenta el endurecimiento por deformación, etapa en la cual se genera la disipación de energía hasta alcanzar el 99% del esfuerzo a tensión  $\sigma_{pc}$ . Finalmente la última etapa (III), las fisuras se abren y permiten de igual forma disipar energía, pero disminuye notablemente la capacidad a tensión (Wille et al., 2014).



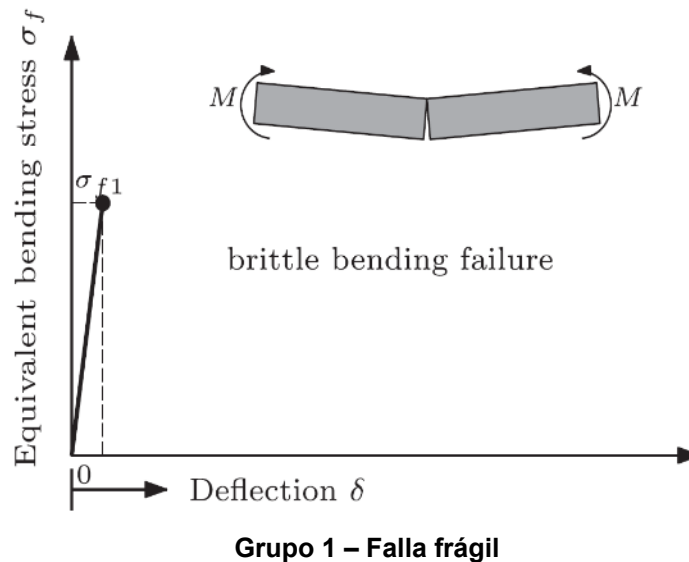
**Figura 1-23.** Grafica esfuerzo a tracción directa vs deformación de UHPFRC.

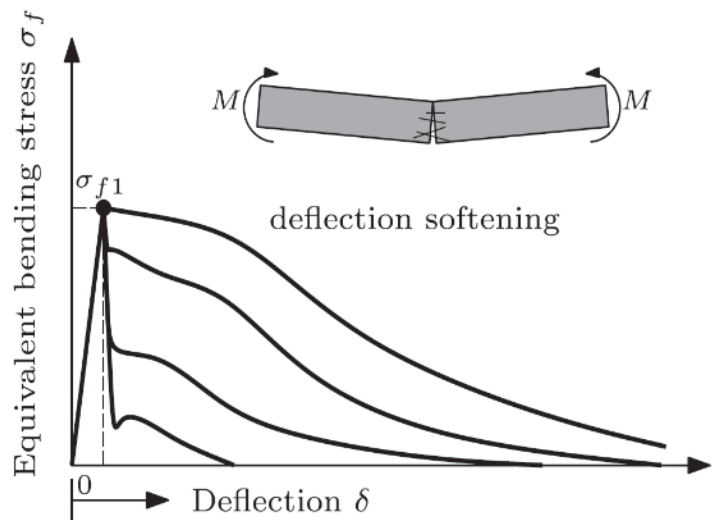
Fuente: Tomado de (Wille et al., 2014).

### 1.3.4 Flexión

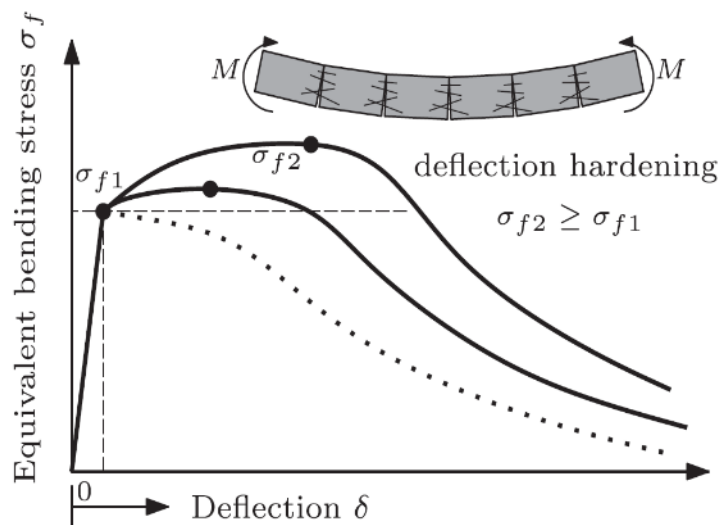
Generalmente, la resistencia a flexión del UHPFRC es superior a la resistencia a tracción. Para comprender y analizar el comportamiento a la flexión del UHPFRC autores como (Naaman & Reinhardt, 2003), (Kim, Naaman, et al., 2008b), (Wille et al., 2014) establecen que el comportamiento a flexión se puede dar de tres formas: como una falla frágil, como reblandecimiento por deflexión o como endurecimiento por deflexión, según la variación de carga después de la primera fisura, como se ilustra en la **Figura 1-24**.

El primer grupo, se caracteriza por tener una falla frágil. El segundo grupo, se le incorporan fibras, pero no son suficientes para absorber energía; al presentarse la primera fisura el esfuerzo disminuye en cuanto la fisura aumenta. Sin embargo, presenta mejoras mínimas en las propiedades mecánicas. Este comportamiento se conoce como reblandecimiento por deflexión. Al tercer grupo se le incorporan fibras y estas son adecuadas para absorber energía; el material sufre múltiples fisuras y es capaz de soportar tensiones por encima de la tensión de fisuración. Este comportamiento se denomina endurecimiento por deflexión (Wille et al., 2014).





**Grupo 2 – Reblandecimiento por deflexión**



**Grupo 3 – Endurecimiento por deflexión**

**Figura 1-24.** Ilustración del comportamiento a la flexión del UHPFRC.  
Fuente: Tomado de (Wille et al., 2014).

Son varios los parámetros que describen el comportamiento a flexión. El primer punto de quiebre del UHPFRC se define como límite de proporcionalidad ( $LOP$ , por sus siglas en inglés) y el punto de resistencia a la flexión equivalente al máximo se define como módulo de rotura ( $MOR$ , por sus siglas en inglés). Cuando se presenta el comportamiento de endurecimiento por deflexión, el valor del módulo de rotura,  $f_{MOR}$ , será siempre superior al valor del límite de proporcionalidad,  $f_{LOP}$ . Cuando no se presente endurecimiento por

deflexión, es decir, se produzca una única fisura el valor de  $f_{MOR}$  será igual al valor de  $f_{LOP}$ . Ahora el valor de carga asociado al módulo de rotura se establece como  $P_{MOR}$  y la deflexión correspondiente será  $\delta_{MOR}$ .

El comportamiento a la flexión del UHPFRC está relacionado con la tenacidad o capacidad de absorción de energía del material, que corresponde al área bajo la curva de carga deflexión. La resiliencia del material corresponde a la energía almacenada en el rango elástico del material; esta energía corresponde al área delimitada por la carga asociada al límite de proporcionalidad ( $P_{LOP}$ ) y la deflexión correspondiente ( $\delta_{LOP}$ ). La tenacidad es evaluada normalmente hasta la carga máxima a flexión ( $P_{MOR}$ ) y su deflexión correspondiente ( $\delta_{MOR}$ ). La relación entre la tenacidad y la ductilidad permite evaluar el comportamiento del material post-fisuración o en el rango inelástico, esta relación se conoce como índice de ductilidad. En general, cuanto mayor sea el índice de ductilidad, mayor será la capacidad de absorción de energía.

## 2. Estado del arte

En la historia general del concreto, el UHPFRC es un material joven, aunque ha sido investigado por más de 30 años y ha estado en desarrollo por más de 20 años. La aceptación e incorporación del material en el mercado de la construcción ha ido creciendo a un ritmo moderado. No obstante, las universidades e ingenieros muestran un desarrollo acelerado a nivel de investigación en UHPC y UHPFRC, principalmente por sus rendimientos y propiedades de durabilidad (Perry et al., 2016).

Aunque como ya se mencionó a nivel Latinoamérica la difusión y el uso de UHPFRC es incipiente por falta de investigación y por los costos asociados. A nivel mundial, los países que concentran el mayor número de obras en este campo son Estados Unidos, Japón, Francia, Alemania, Suiza y los Países Bajos. Las aplicaciones más destacables hasta la fecha son puentes peatonales, puentes viales, fachadas, balcones, mobiliario urbano, marquesinas, puntales, sistemas de revestimiento, productos para servicios subterráneos o para alta seguridad, canales de tratamiento de aguas residuales, aplicaciones arquitectónicas y estructurales prefabricadas, entre otros (Perry et al., 2016), (Abellán et al., 2018a).

Bajo este panorama, existen hoy cientos de proyectos terminados en todo el mundo que han usado UHPFRC y su comportamiento está de acuerdo con el esperado. El primer uso de UHPFRC en Norte América fue en 1997, para la construcción del puente peatonal de Sherbrooke **Figura 2-1** en Quebec, Canadá, (Perry & Seibert, 2013).



**Figura 2-1.** Puente peatonal Sherbrooke, Quebec, Canadá.  
Fuente: Tomado de (Perry & Seibert, 2013).

En cuanto a la aplicación de UHPFRC en Latinoamérica esta se dio en el año 2017, con la construcción del puente peatonal que comunica el campus con el edificio de Idiomas de la Universidad EAFIT en Medellín, Colombia (Abellán et al., 2018a). En la **Figura 2-2** se pueden apreciar fotografías del puente peatonal en Medellín.



**Figura 2-2.** Puente peatonal en Medellín, Colombia.  
Fuente: Tomado de (Abellán et al., 2018a).

## 2.1 Antecedentes del comportamiento a flexión del UHPFRC

Los estudios desarrollados con respecto al comportamiento y resistencia a flexión en UHPFRC, datan del año 1995 con Richard y Cheyrezy, los cuales lograron desarrollar por primera vez un concreto de ultra altas prestaciones (UHPC), debido a que determinaron las proporciones de la mezcla de concreto en función del empaquetamiento de partículas o teoría de la densidad de partículas, donde se logra establecer el tamaño óptimo del material granular (Richard & Cheyrezy, 1995). Además, para obtener un concreto con excelente comportamiento a la tracción y a la flexión después de la primera fisura, (Behloul et al., 1996), decidieron incorporar micro-fibras metálicas rectas de 12 mm de longitud en fracciones de volumen de 1.5 a 3.0%. Desde entonces se han desarrollado varios tipos de UHPFRC en diferentes países en donde se busca mejorar las propiedades de tracción y flexión después que el material fisura.

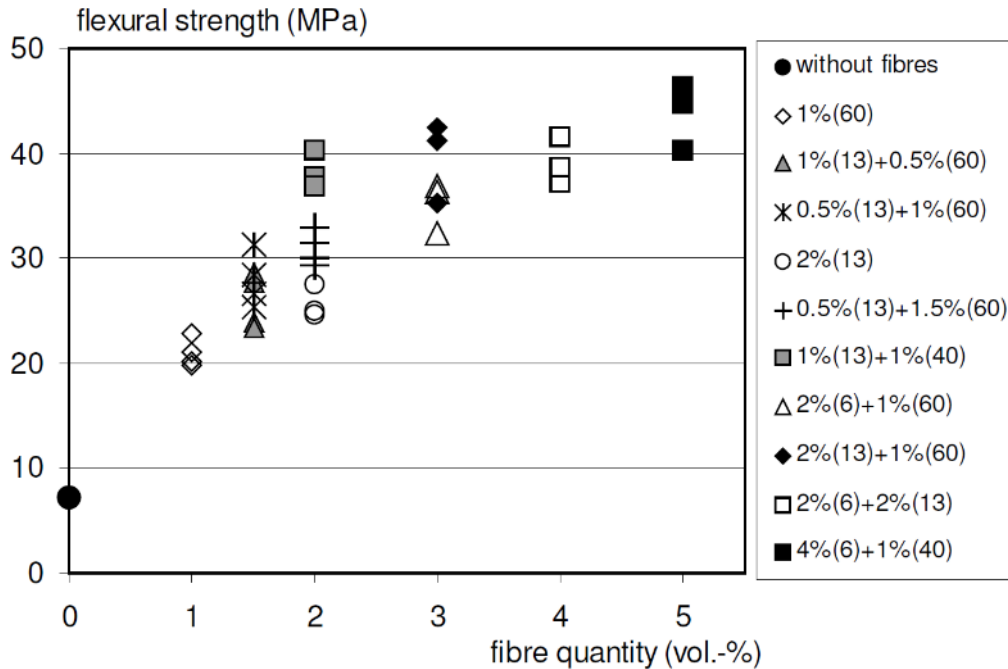
La mayoría de los investigadores han desarrollado mezclas híbridas de micro y macro fibras para UHPFRC, debido a que las micro-fibras resisten eficientemente la tracción, y las macro-fibras mejoran la ductilidad (Kim et al., 2011). Sin embargo, la mayoría de las investigaciones sobre UHPFRC con mezcla híbrida de fibras se ha centrado en determinar el volumen óptimo de micro-fibra mezclado con un tipo de macro-fibra que mejore la resistencia a la tracción y flexión (Wille et al., 2010). Por lo tanto, la información sobre la influencia de las macro-fibras en el rendimiento a flexión del UHPFRC es reducida.

Investigaciones desarrolladas por (Markovic, 2006) referentes al uso y desarrollo del concreto de muy altas prestaciones reforzado con fibras (VHPFRC), lograron evidenciar mediante ensayos a flexión en tres puntos, valores altos de resistencia a la flexión, llegando a alcanzar los 40 MPa en VHPFRC reforzados con una mezcla híbrida de fibras metálicas al 2% en volumen. En la

**Figura 2-3** se presenta una gráfica con el resumen de los valores de las resistencias a flexión, obtenidos en esta investigación, para diferentes combinaciones y dosificaciones de micro y macro fibras metálicas. El eje de las abscisas en la gráfica, corresponde al volumen de fibras estudiadas (1 a 5%) y, el eje de las ordenadas, corresponde a la resistencia a



flexión. La resistencia a flexión de estas dosificaciones varió entre 20 a 42 MPa, utilizando 4 tipos de fibras metálicas con diferentes relaciones de aspecto, como se puede observar en las convenciones.



**Convenciones:**

- (13) – Micro-fibra,  $l_f = 13$  mm y  $d_f = 0.20$  mm
- (60) – Macro-fibra,  $l_f = 60$  mm y  $d_f = 0.70$  mm
- (6) – Micro-fibra,  $l_f = 6$  mm y  $d_f = 0.16$  mm
- (40) – Macro-fibra,  $l_f = 40$  mm y  $d_f = 0.50$  mm

**Figura 2-3.** Resistencias a flexión en VHPFRC reforzado con uno o dos tipos de fibras metálicas, con contenidos de fibras del 1 al 5% en volumen.  
Fuente: Tomado de (Markovic, 2006).

En conclusión, de acuerdo con los resultados expuestos, se logra evidenciar que con dosificaciones híbridas de fibras superiores al 2% en volumen, la resistencia a la flexión, no mejora significativamente; teniendo mayor relevancia la combinación adecuada entre micro y macro fibras que un alto volumen de fibra dosificado en la mezcla.

Por otro lado, (Suter et al., 2011), observaron mediante ensayos a flexión en tres puntos que la resistencia a flexión en UHPFRC, era de 16,4 MPa cuando la mezcla contenía 1% de fibras metálicas cortas. Al incrementar el contenido de fibras hasta el 2% en volumen, donde 1/3 de las fibras eran cortas y el resto largas, la resistencia a la flexión se incrementó hasta los 23,1 MPa

En investigaciones realizadas por (Kim et al., 2011), referentes al comportamiento a flexión en UHPFRC reforzado con fibras metálicas híbridas, observaron que para dosificaciones de micro-fibras de (0.0, 0.5, 1.0 y 1.5%), donde el excedente para alcanzar un 2% fue completado con macro-fibras, los rendimientos a flexión del UHPFRC fueron significativamente mejores en comparación con UHPFRC reforzados solamente con micro-fibras. De igual forma, lograron observar que las mejoras en la resistencia a flexión, capacidad de deflexión y tenacidad son susceptibles a los tipos macro-fibras y al aumento de la cantidad de micro-fibras. En resumen, la dosificación con 1% de micro-fibras y 1% de macro-fibras metálicas, desarrolló mayor resistencia a flexión y tenacidad en comparación a una matriz reforzada con 2% de micro-fibras metálicas. Además, esta mezcla híbrida de micro y macro fibras presentó mejoras en el módulo de rotura (MOR), mayor deformación del elemento bajo la aplicación de carga (deflexión) y mayor capacidad de absorción de energía del UHPFRC.

A continuación, se presenta un compilado de algunos resultados a flexión y compresión respectivamente, obtenidos en investigaciones relacionadas con UHPFRC. Estos resultados han sido recopilados en una base de datos por el director de esta investigación, el ingeniero Joaquín Abellán.

En la **Tabla 2-1** se pueden observar los resultados de la resistencia a flexión en UHPFRC. La tabla se compone de 9 columnas en las cuales se describe de izquierda a derecha la fibra utilizada, el tipo de dosificación de fibras (mono – 1 fibra e híbrida – 2 fibras), el tipo de ensayo a flexión, el volumen de fibras ( $V_f$ ), la deflexión asociada al módulo de rotura ( $\delta_{MOR}$ ), el módulo de rotura ( $f_{MOR}$ ), las dimensiones de las probetas, el nombre del autor y el año de publicación de la investigación. Las resistencias a flexión varían entre 13 a 32 MPa y entre 19 a 43 MPa para dosificaciones con 1 y 2% de fibras en volumen, respectivamente.

**Tabla 2-1. Resistencia a flexión en UHPFRC, estado del arte.**  
Fuente: Tomado de (Abellán, 2019).

Fibra	Tipo	Ensayo a flexión	V <sub>f</sub> %	f <sub>MOR</sub> (MPa)	Probeta b x d x L (mm)	Referencia	Año
SS10	Mono	4 Puntos	1.0	20.3	100 x 100 x 300	Kim D. J. et al	2011
SS20	Mono	4 Puntos	2.0	37.1	100 x 100 x 300	Kim D. J. et al	2011
LS10SS15	Hibrida	4 Puntos	2.5	39.9	100 x 100 x 300	Kim D. J. et al	2011
HA10SS15	Hibrida	4 Puntos	2.5	34.4	100 x 100 x 300	Kim D. J. et al	2011
HB10SS15	Hibrida	4 Puntos	2.5	47.3	100 x 100 x 300	Kim D. J. et al	2011
T10SS15	Hibrida	4 Puntos	2.5	47.2	100 x 100 x 300	Kim D. J. et al	2011
-	Sin fibras	3 Puntos	0.0	11.6 - 14.3	40 x 40 x 160	Yu R. et al	2014
PP04	Mono	3 Puntos	0.4	10.8 - 17.6	40 x 40 x 160	Yu R. et al	2014
SS20	Mono	3 Puntos	2	18.8	40 x 40 x 160	Yu R. et al	2014
PP04SS20	Hibrida	3 Puntos	2.4	24.9 - 27.9	40 x 40 x 160	Yu R. et al	2014
PP03SS20	Hibrida	3 Puntos	2.3	31.7	40 x 40 x 160	Yu R. et al	2014
-	Sin fibras	3 Puntos	0.0	19.0	40 x 40 x 160	Wu, Z. et al	2016
SS10	Mono	3 Puntos	1.0	21.7 - 26.0	40 x 40 x 160	Wu, Z. et al	2016
SS20	Mono	3 Puntos	2.0	27.8 - 34.4	40 x 40 x 160	Wu, Z. et al	2016
SS30	Mono	3 Puntos	3.0	38.3 - 41.0	40 x 40 x 160	Wu, Z. et al	2016
-	Sin fibras	3 Puntos	0	27.8	40 x 40 x 160	Wu Z. et al	2017
SS20	Mono	3 Puntos	2	25.7 - 36.9	40 x 40 x 160	Wu Z. et al	2017
-	Sin fibras	3 Puntos	0	6.7	40 x 40 x 160	Vaitkevicius. V. et al	2016
SS10	Mono	3 Puntos	1	13.2	40 x 40 x 160	Vaitkevicius. V. et al	2016
SS13	Mono	3 Puntos	1.3	23.5	40 x 40 x 160	Vaitkevicius. V. et al	2016
SS19	Mono	3 Puntos	1.9	36.2	40 x 40 x 160	Vaitkevicius. V. et al	2016
SS20	Mono	4 Puntos	2.0	25.5 - 29.5	40 x 40 x 160	Kou, S.C. et al	2012
SF25	Mono	4 Puntos	2.5	31	40 x 40 x 160	Bornemann, et al	2004
SF10PVA20	Mono	4 Puntos	1.0	31.5	40 x 40 x 160	Bornemann, et al	2004
PVA40	Mono	4 Puntos	4.0	31 - 33	40 x 40 x 160	Bornemann, et al	2004
SF10PVA20	Hibrida	4 Puntos	3.0	42	40 x 40 x 160	Bornemann, et al	2004
SF20	Mono	4 Puntos	2.0	31	40 x 40 x 160	Bornemann, et al	2004
SS20	Mono	3 Puntos	2.0	34 - 43	40 x 40 x 160	Nguyen, E. et al	2004

### Convenciones de fibras:

Las dos primeras siglas de la columna “Fibras” indica el tipo de fibra y las siguientes siglas en números hacen referencia a la dosificación en volumen.

SS – Micro-fibra metálica lisa, OL13/.20	( $l_f = 13mm$ ; $d_f = 0.200mm$ ).
LS – Macro-fibra metálica lisa, OL30/.30	( $l_f = 30mm$ ; $d_f = 0.300mm$ ).
HA – Macro-fibra metálica enganchada,	( $l_f = 30mm$ ; $d_f = 0.375mm$ ).
HB – Macro-fibra metálica enganchada,	( $l_f = 62mm$ ; $d_f = 0.775mm$ ).
T – Macro-fibra metálica retorcida,	( $l_f = 30mm$ ; $d_f = 0.300mm$ ).
PP – Micro-fibra de polipropileno lisa,	( $l_f = 13mm$ ; $d_f = 0.015mm$ ).
SF – Micro-fibra metálica lisa, OL17/.15	( $l_f = 17mm$ ; $d_f = 0.150mm$ ).
PVA – Micro-fibra de PVA lisa,	( $l_f = 15mm$ ; $d_f = 0.310mm$ ).

Por otro lado, relacionar los resultados de las resistencias a flexión y a compresión es pertinente debido a las características especiales que debe cumplir este material, en particular la resistencia a compresión, la cual debe ser igual o superior a los 150 MPa, según lo indicado en reglamentos de UHPFRC como el ACI 239 R18 y el NF P18-470. Por lo tanto, en la **Tabla 2-2** se presentan los resultados de la resistencia a compresión en UHPFRC asociados a los resultados de la resistencia a la flexión expuestos anteriormente. La tabla se compone de 8 columnas con contenidos similares a los indicados en la **Tabla 2-1**, la diferencia radica en que no se presenta la deflexión y el módulo de rotura, se cambia por la resistencia a compresión ( $f'c$ ). Las resistencias a compresión para dosificaciones con 1 y 2% de fibras en volumen, varían entre 128 a 176 MPa y entre 100 a 172 MPa, respectivamente. Esto indica que no todas las probetas analizadas en las investigaciones lograron alcanzar la resistencia esperada para UHPFRC, pero estuvieron en el rango de VHPFRC (110 a 150 MPa).

**Tabla 2-2. Resistencia a compresión en UHPFRC, estado del arte.**  
Fuente: Tomado de (Abellán, 2019).

Fibra	Tipo	Ensayo a flexión	$V_f$ %	$f'c$ (MPa)	Probeta b x d x L (mm)	Referencia	Año
-	Sin fibras	3 Puntos	0.0	62 -110	40 x 40 x 40	Yu R. et al	2014
PP04	Mono	3 Puntos	0.4	72 - 110	40 x 40 x 40	Yu R. et al	2014
SS20	Mono	3 Puntos	2	104	40 x 40 x 40	Yu R. et al	2014
PP04SS20	Hibrida	3 Puntos	2.4	68	40 x 40 x 40	Yu R. et al	2014
PP03SS20	Hibrida	3 Puntos	2.3	116	40 x 40 x 40	Yu R. et al	2014
-	Sin fibras	3 Puntos	0.0	105	40 x 40 x 40	Wu, Z. et al	2016
SS10	Mono	3 Puntos	1.0	128 - 143	40 x 40 x 40	Wu, Z. et al	2016
SS20	Mono	3 Puntos	2.0	150 - 159	40 x 40 x 40	Wu, Z. et al	2016
SS30	Mono	3 Puntos	3.0	157 - 170	40 x 40 x 40	Wu, Z. et al	2016
-	Sin fibras	3 Puntos	0	150	40 x 40 x 40	Wu Z. et al	2017
SS20	Mono	3 Puntos	2	142.5 - 150	40 x 40 x 40	Wu Z. et al	2017
-	Sin fibras	3 Puntos	0	116	50 x 50 x 50	Vaitkevicius. V. et al	2016
SS10	Mono	3 Puntos	1	139	50 x 50 x 50	Vaitkevicius. V. et al	2016
SS13	Mono	3 Puntos	1.3	143	50 x 50 x 50	Vaitkevicius. V. et al	2016
SS19	Mono	3 Puntos	1.9	149	50 x 50 x 50	Vaitkevicius. V. et al	2016
SS20	Mono	4 Puntos	2.0	142.6 - 158.3	50 x 50 x 50	Kou, S.C. et al	2012
SF25	Mono	4 Puntos	2.5	180	R150 x 300	Bornemann, et al	2004
SF10PVA20	Mono	4 Puntos	1.0	175.6	R150 x 300	Bornemann, et al	2004
PVA40	Mono	4 Puntos	4.0	-	R150 x 300	Bornemann, et al	2004
SF10PVA20	Hibrida	4 Puntos	3.0	161	R150 x 300	Bornemann, et al	2004
SF20	Mono	4 Puntos	2.0	161	50 x 50 x 50	Bornemann, et al	2004
SS20	Mono	3 Puntos	2.0	151 - 172	40 x 40 x 40	Nguyen, E. et al	2004

Es importante resaltar que investigadores como (Skazlić et al., 2008), (Naaman & Wille, 2010), (Camacho, 2013) y (Graybeal & Davis, 2014) han desarrollado correlaciones de resistencia a la compresión entre probetas se sección cubica y cilíndrica, para comparar resultados entre diferentes normativas. A continuación, en la **Tabla 2-3** se presenta algunas de estas correlaciones.

**Tabla 2-3.** Factores de transformación para convertir los resultados de la resistencia a compresión en una muestra de cubo de 100 mm de lado.

Fuente: Tomado de (Abellán, 2020).

Tipo de Probeta	Cubo	Cubo	Cubo	Cubo	Cubo	Cilindro	Cilindro	Cilindro	Cilindro
Dimensión (mm)	150	100	70	50	40	50x100	75x100	100x200	150x300
Factor de conversión cubo de 100 mm	1.119	1.000	0.935	0.962	1.121	1.020	1.020	1.020	1.063

## 2.2 Antecedentes de concretos reforzados con fibras poliméricas

Los estudios desarrollados en FRC con respecto al comportamiento y resistencia a flexión, han evidenciado que la incorporación de fibras poliméricas mejora las propiedades mecánicas del concreto. No obstante, la incorporación de fibras sintéticas al FRC debe tener en cuenta variables como la relación de aspecto y el contenido máximo de fibras en la mezcla para mantener el equilibrio entre trabajabilidad y resistencia del concreto (Forgeron & Omer, 2010).

Las aglomeraciones de fibras poliméricas debilitan el concreto, dado que al disminuir la dispersión de fibras en la mezcla se introducen zonas débiles en la matriz, zonas donde las fibras están en contacto directo (Li et al., 1990). Se ha evidenciado que, durante el proceso de mezclado, los extremos de las fibras poliméricas fibriladas se deshilachan, formando fibrillas, estas generan enlaces que aumentan la fuerza de unión entre las fibras. La fuerza de unión entre las fibras hace que estas tiendan a agruparse, principalmente si su relación de aspecto es alta o cuando las dosificaciones de este tipo de fibras son altas (O'Connell, 2011).

En cuanto al comportamiento a flexión en FRC reforzado con fibras poliméricas se ha evidenciado que las macro-fibras mejoran el módulo de rotura y la tenacidad, mientras que

tienen poco o ninguna incidencia en el límite de proporcionalidad en comparación con el concreto sin fibras. En contraste, las micro-fibras comúnmente mejoran el límite de proporcionalidad, pero tienen poca incidencia sobre el módulo de rotura y tenacidad del concreto (O'Connell, 2011).

## 2.3 Contexto normativo del UHPFRC

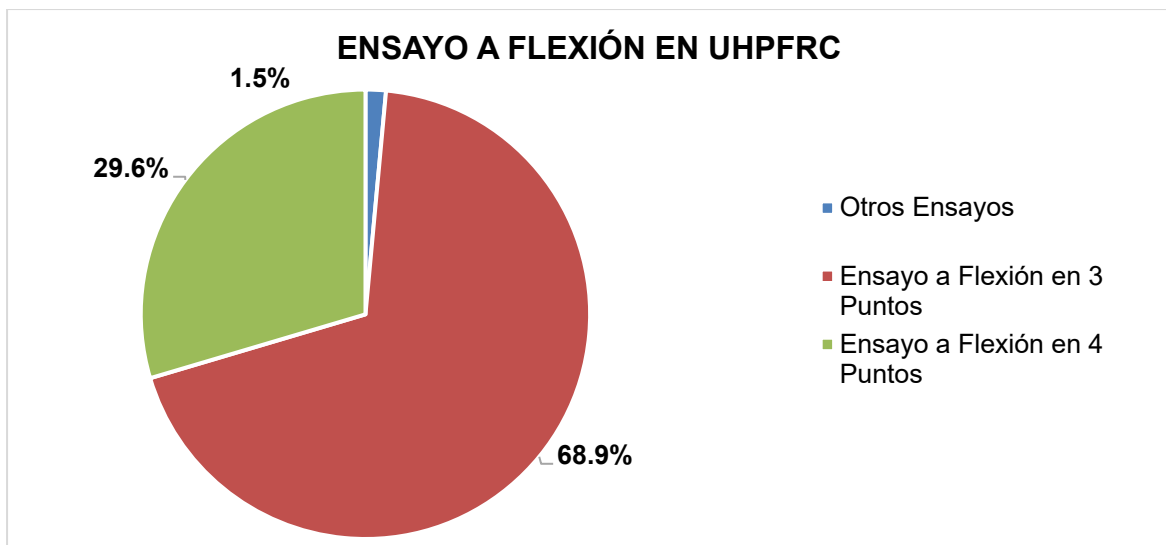
A finales de la década de 1990, países como Francia, Australia, Japón, Alemania, Corea, China, Estados Unidos y otros, comenzaron a escribir estándares, códigos y guías sobre UHPFRC. Francia presentó su primera guía de diseño de UHPC en 2001 y una versión actualizada posterior en 2013, titulada "Documento científico y técnico sobre el concreto de ultra altas prestaciones reforzado con fibras, recomendaciones" (AFGC, 2013). En 2016, Francia lanzó la norma NF P18-470 "Bétons fibrés à Ultra-Haute Performance (UHPC)" (NF P 18-470, 2016). Por su parte, la sociedad japonesa de ingenieros, lanzó en el 2006 el documento "Recomendaciones para diseño estructural y construcción en concreto de ultra altas prestaciones reforzado con fibras" (JSCE, 2006). Finalmente, el Instituto Americano del Concreto (ACI), lanzó en el 2018 el documento ACI 239 R18. Este documento ofrece una visión general del concreto de ultra altas prestaciones reforzado con fibras; presentando brevemente la producción de estos concretos, sus propiedades, principios de diseño para su uso y ejemplos de aplicaciones; este no pretende ser un documento exhaustivo, sino más bien servir como punto de partida para el profesional interesado en comprender las diferentes clases de concretos (ACI Committee 239R, 2018). En general, varios países están avanzando en la normalización del UHPFRC. Sin embargo, para Latinoamérica y Estados Unidos; aún no existe un reglamento exhaustivo sobre el diseño estructural con este material.

De otro lado, actualmente, los investigadores en el área de materiales recurren a las normas existentes ASTM y AASHTO para concretos convencionales, autocompactantes, reforzados con fibras y de alta resistencia para determinar las propiedades del UHPC o UHPFRC. En consecuencia, existe la necesidad de desarrollar estándares de prueba que proporcionen resultados significativos para una gama completa de las propiedades de estos materiales. Estas pruebas son necesarias para categorizar diferentes UHPFRC y

conocer las propiedades de un material de manera confiable y aplicable en el diseño de estructuras (Perry et al., 2016).

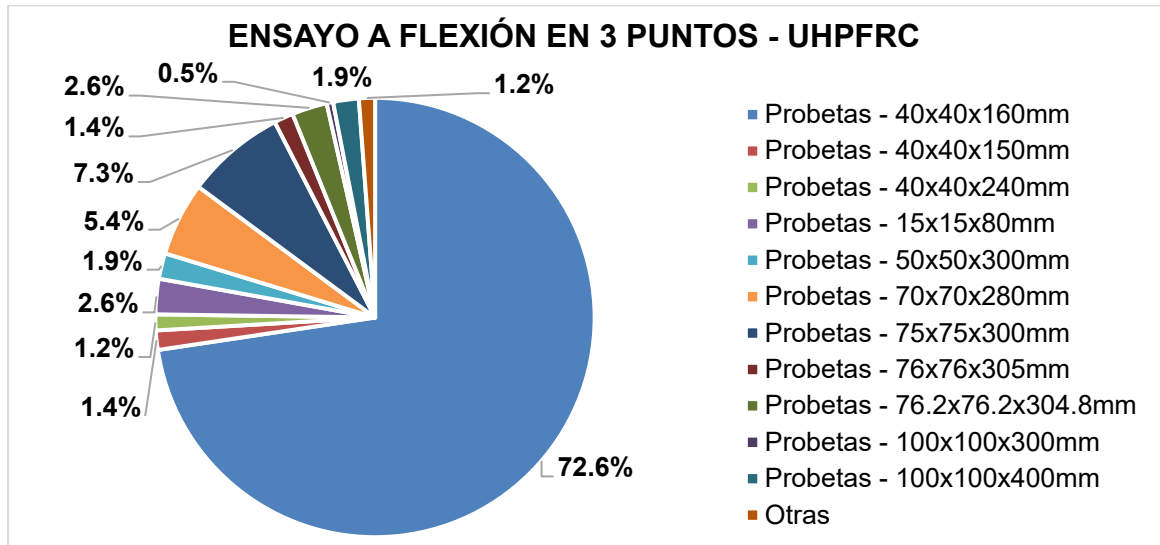
## 2.4 Ensayos para UHPFRC

Como ya se mencionó, gran parte de las investigaciones en el mundo han adoptado la normativa de pruebas de concretos convencionales y las han aplicado al UHPFRC como una manera preliminar para evaluar algunas propiedades. Para evaluar la resistencia y comportamiento a flexión, predomina el ensayo a tres puntos. (Abellán, 2019), elaboró una base de datos con 615 artículos y encontró que el 68.9% de las investigaciones en UHPFRC aplican el ensayo a flexión en tres puntos con respecto a otro tipo de ensayos, ver **Ilustración 2-1**.



**Ilustración 2-1.** Proporción de ensayos a flexión en UHPFRC.  
Fuente: Tomado de (Abellán, 2019).

En lo que respecta a las investigaciones en las que aplicaron el ensayo a tres puntos para determinar la resistencia a la flexión, se evidencia que el 72.6% de las probetas tienen la siguiente configuración geométrica: base 40 mm, altura 40 mm y largo 160 mm; este prisma predomina en la mayoría de las investigaciones consultadas por (Abellán, 2019), ver **Ilustración 2-2**.



**Ilustración 2-2.** Proporción de dimensiones de probetas en los ensayos a flexión en tres puntos para UHPFRC.

Fuente: Tomado de (Abellán, 2019).

A continuación, se realiza una breve descripción de una de las normas con mayor aplicación para determinar la resistencia a flexión del UHPFRC. La norma EN 196-1 describe el ensayo a flexión en tres puntos, utilizando probetas de 40 x 40 x 160 mm. Esta norma ha sido adoptada por investigadores en UHPFRC como (Dili & Sunthanam, 2004), (Bornemann & Faber, 2004), (Yu, Tang, et al., 2014), (Yu, Spiesz, et al., 2014), (Ghafari et al., 2014), (Yu et al., 2015), (Nguyen & Vidal, 2015), (Wu et al., 2016), entre otros.

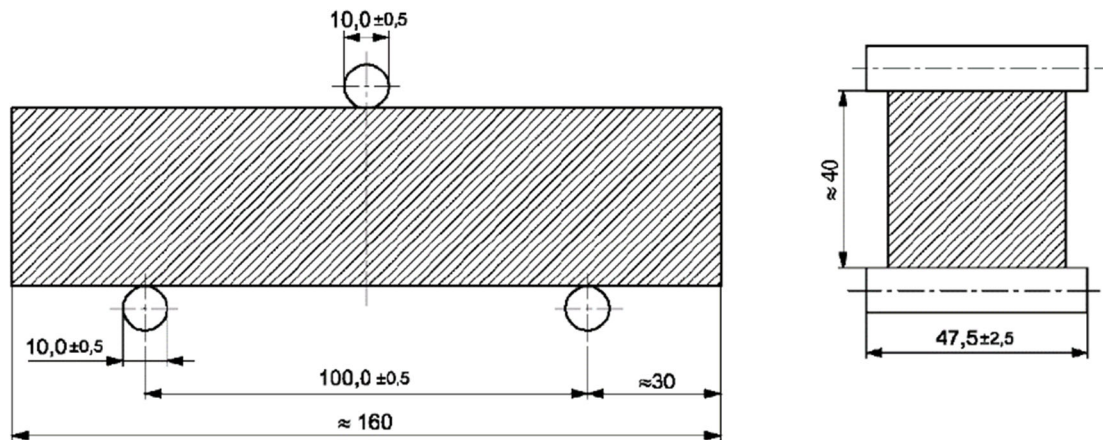
### 2.4.1 Norma EN 196-1

La norma europea EN 196-1 (Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias), existe en tres versiones oficiales (alemán, francés e inglés), fue desarrollada por el Comité Europeo de Normalización. Esta norma describe el método para la determinación de las resistencias mecánicas a compresión y, opcionalmente, a flexión del mortero de cemento. Este método se aplica para los cementos comunes y otros tipos de cementos. Para determinar las resistencias se requiere de 3 probetas prismáticas de dimensiones 40 x 40 x 160 mm. A la edad requerida, las probetas se retiran de su medio de conservación húmedo, se rompen a flexión, determinado la resistencia a flexión cuando se requiera, o se rompen mediante otros métodos adecuados que no sometan las mitades del prisma a esfuerzos dañinos, y cada mitad se somete al ensayo de resistencia a compresión.



### ▪ Ensayo a flexión

Para el ensayo a flexión se requiere una máquina capaz de aplicar carga controlada a una velocidad de 0.2 mm/min. La máquina debe estar provista de un dispositivo a flexión que incorpore dos rodillos de apoyo en acero de  $10 \pm 0.5$  mm de diámetro, distantes uno del otro  $100 \pm 0.5$  mm, y un tercer rodillo de aplicación de carga en acero del mismo diámetro que los demás y equidistante de los otros dos. La longitud de los rodillos debe estar comprendida entre 45 y 50 mm. El dispositivo de carga se puede apreciar en la **Figura 2-4**.



**Figura 2-4.** Dispositivo de carga para determinar la resistencia a flexión en tres puntos.  
Medidas en milímetros.

Fuente: Tomado de la (Asociación Española de Normalización, 2018).

Los planos verticales que pasan por los ejes de los rodillos deben ser y permanecer paralelos, equidistantes y perpendiculares a la dirección de la probeta durante el ensayo. Uno de los rodillos de apoyo y el rodillo de carga deben tener la libertad de oscilar ligeramente para permitir una distribución uniforme de la carga sobre el ancho de la probeta, sin someterla a esfuerzos de torsión, de forma tal que se cumpla la condición de un elemento simplemente apoyado.

El resultado del ensayo de resistencia a flexión corresponde a la media aritmética de los 3 resultados individuales, obtenidos de la determinación realizada sobre un conjunto de tres probetas.

### ▪ **Ensayo a compresión**

La máquina de ensayo para determinar la resistencia a la compresión debe tener la capacidad y regulación de carga adecuada para el ensayo. Adicionalmente debe estar equipada con un dispositivo que registre los incrementos de carga y especialmente el valor máximo, asociado a la falla del espécimen de prueba. La mitad de cada probeta es cortada de forma tal que se obtienen 6 cubos de 40 mm de lado, en caso que uno de los resultados de las 6 determinaciones varíe en más de  $\pm 10\%$  respecto a la media, se descarta este resultado y se calcula la media aritmética de los 5 resultados restantes.

Basado en el marco teórico y estado del arte consultado, se encuentra pertinencia en el desarrollo de un programa experimental para determinar el efecto de la combinación de micro-fibras y macro-fibras poliméricas, en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC, se decidió adoptar la norma EN 196-1 para determinar las propiedades mecánicas del UHPFRC, dado que esta norma cumple con las dimensiones de las probetas más utilizadas en otras investigaciones, para determinar la resistencia a flexión del UHPFRC y a la vez permite reutilizar los extremos de las probetas para determinar la resistencia a compresión del material, reduciendo a la vez el volumen de mezcla en el laboratorio, garantizando que las condiciones y propiedades del material sean idénticas para el ensayo a flexión y compresión.

Cabe resaltar que esta investigación hace parte del grupo de investigaciones en UHPFRC desarrolladas por el ingeniero Joaquín Abellán García para su tesis doctoral “Dosage optimization and seismic retrofitting of ultra-high-performance fiber reinforced concrete (UHPFRC)” para optar al título de doctor en ingeniería de la Universidad Politécnica de Madrid. Esta investigación también contribuyó al marco y objetivos de la maestría en ingeniería civil con énfasis en estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, donde los profesionales de la ingeniería civil profundizan en conocimientos científicos y tecnológicos que permiten encontrar soluciones novedosas a los problemas de infraestructura de la sociedad. Además, con este trabajo se buscó fortalecer la actividad investigativa de la escuela, dando cumplimiento a otro de los objetivos del programa; fortalecer los grupos y líneas de investigación que actualmente existen. Finalmente, este proyecto servirá de puente para nuevas líneas de investigación que incluyan el desarrollo de nuevos materiales de construcción.

## **3. Objetivos**

### **3.1 General**

Determinar el efecto de la combinación de micro-fibras y macro-fibras poliméricas en el comportamiento a flexión y compresión del concreto de ultra altas prestaciones reforzado con fibras (UHPFRC).

#### **3.1.1 Específicos**

- Analizar el efecto de la combinación híbrida de fibras poliméricas en el flujo estático del UHPFRC.
- Determinar la combinación de fibras poliméricas en UHPFRC que alcanza la máxima tensión (MOR) en el ensayo a flexión.
- Cuantificar la tenacidad en probetas de UHPFRC (reforzado con fibras poliméricas), sometidas a flexión.
- Analizar el efecto de la combinación de fibras poliméricas en la resistencia a la compresión de los UHPFRC.
- Realizar comparativa técnico-económica del comportamiento a flexión y compresión de los UHPFRC reforzados con fibras poliméricas y los reforzados con fibras metálicas.

## **4. Programa experimental**

En este capítulo, después de una exhaustiva revisión del estado del arte relacionado con el tema de estudio, se describe la fase experimental de la investigación, desarrollada en el laboratorio de ensayo de materiales y estructuras Alejandro Sandino Pardo de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Inicialmente se describe la metodología desarrollada, luego se presentan las variables del estudio experimental, seguido a esto se describen las características principales de los materiales usados en el proyecto y se presenta el diseño de mezcla. Posteriormente se establece el protocolo de amasado de los materiales, continuando con el proceso de curado y posteriormente se concluye con la descripción de los ensayos a flexión y a compresión realizados en las probetas.

### **4.1 Metodología**

Para alcanzar los objetivos propuestos y cubrir el alcance de la presente investigación fue necesario desarrollar un programa experimental que consistió en elaborar una mezcla base de UHPC constante para todas las mezclas de UHPFRC. La mezcla base debía tener una manejabilidad adecuada para concretos simples autocompactantes. Partiendo de esta dosificación base con una manejabilidad adecuada se adicionaron las micro y/o macro fibras variando su dosificación entre el 1 y 2% en volumen, como se describe en las variables del programa experimental. Por cada mezcla se fundieron 3 especímenes de prueba para establecer el efecto de las micro-fibras y/o macro-fibras poliméricas en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC.

Para determinar las propiedades en estado fresco y endurecido del UHPFRC se realizaron los siguientes ensayos:

- La fluidez de la mezcla se midió al finalizar el proceso de mezclado. El valor del flujo estático promedio se obtuvo de la medición de los cuatro diámetros de acuerdo con la norma ASTM C1437 sin golpes.
- La resistencia a flexión en el UHPFRC se midió a los 28 días después de haber fundido las probetas de 40 mm de ancho, 40 mm de alto y 160 mm de largo, siguiendo los parámetros descritos en la norma europea EN 196-1.
- La resistencia a compresión en el UHPFRC se midió después de culminar el ensayo a flexión. Al fallar cada probeta a flexión se obtuvieron dos semi-prismas, cada prisma se cortó para obtener un cubo de 40 mm de lado. La resistencia a compresión se midió en estos prismas, siguiendo los parámetros descritos en la norma europea EN 196-1. En el anexo D, se adjunta la norma EN 196-1.
- El comportamiento a flexión del UHPFRC se analizó y evaluó sobre las gráficas de esfuerzo-deflexión con base en los criterios descritos por Kay Wille, Sherif El-Tawil y Antoine Naaman en 2014, en la investigación “Propiedades del endurecimiento por deflexión del concreto de ultra altas prestaciones reforzados con fibras (UHPFRC)” (Wille et al., 2014).
- La resiliencia, tenacidad e índice de ductilidad se determinaron en las probetas de UHPFRC que presentaron endurecimiento por deflexión.

## 4.2 Variables del programa experimental

Las variables del programa se establecieron con base en las dosificaciones típicas de fibras metálicas observadas en varias investigaciones sobre UHPFRC, en las cuales se evidenció que el reforzamiento adecuado está en el rango entre 1 y 2% de fibras metálicas en volumen. Dado que estas dosificaciones presentan una relación eficiente costo beneficio, basado en los resultados previos consignados en la revisión del estado del arte. En cuanto a la relación entre las proporciones de micro y macro fibras se decidió evaluar para el 1% cinco (5) variaciones del 0.25% en volumen y, para el 2% cinco (5) variaciones del 0.5% en volumen de fibra ( $V_f$ ), como se puede apreciar en la **Tabla 4-1**.

**Tabla 4-1.** Relación entre micro-fibras y macro-fibras poliméricas analizadas para reforzar el UHPFRC.

RELACIÓN	Vf 1%		Vf 2%	
	MICRO-FIBRA	MACRO-FIBRA	MICRO-FIBRA	MACRO-FIBRA
1	1.00%	0.00%	2.00%	0.00%
2	0.75%	0.25%	1.50%	0.50%
3	0.50%	0.50%	1.00%	1.00%
4	0.25%	0.75%	0.50%	1.50%
5	0.00%	1.00%	0.00%	2.00%

Las fibras poliméricas y micro-fibras metálicas que se dosificaron para UHPFRC, corresponden a las más usadas y con mejores prestaciones para reforzar concreto. Las micro-fibras están identificadas con la sigla mFX y las macro-fibras están identificadas con la sigla MFX, donde X identifica la fibra. En la **Tabla 4-2** se puede apreciar la referencia comercial, la referencia para la investigación, el material y las características más representativas de cada fibra.

**Tabla 4-2.** Características de las fibras usadas en la investigación para reforzar UHPFRC

Ref. Comercial	Nylon	PVA	Tuf - Strand SF	BarChip 48	Dramix OL 13/20
Ref. Investigación	mF1	mF2	MF1	MF2	mFOL
Material	Nylon	Polivinilo de Alcohol	Polipropileno y Polietileno	Polipropileno	Acero de alta resistencia
Sigla	<b>Nylon</b>	<b>PVA</b>	<b>PP/PE</b>	<b>PP</b>	<b>MT</b>
Peso específico	1.16 g/cm <sup>3</sup>	1.25 g/cm <sup>3</sup>	0.91 g/cm <sup>3</sup>	0.90 g/cm <sup>3</sup>	7.85 g/cm <sup>3</sup>
Diámetro ( $d_f$ )	24 $\mu$ m	20 $\mu$ m	675 $\mu$ m	700 $\mu$ m	200 $\mu$ m
Longitud ( $l_f$ )	4.5 mm	6 mm	50 mm	48 mm	13 mm
Esbeltez ( $l_f / d_f$ )	188 : 1	300 : 1	74 : 1	69 : 1	65 : 1
Sección transversal	Circular	Circular	Circular	Rectangular	Circular
Resistencia a tensión	100 MPa	1600 MPa	625 MPa	640 MPa	2750 MPa
Textura	Lisa	Lisa	Fibrilada	Corrugada	Lisa
Presentación	Grupo	Grupo	Grupo	Individual	Individual

La fase experimental constó de 2 dosificaciones de UHPC y 34 de UHPFRC así:

- 2 mezclas sin fibras que permitieron establecer la manejabilidad adecuada de la mezcla y determinar la resistencia a flexión y compresión del UHPC; denominadas N0 y N00.

- 8 mezclas mono fibras,
- 24 mezclas híbridas de fibras poliméricas y
- 2 mezclas con micro-fibras metálicas.

La mitad de cada grupo de mezclas con fibras (UHPFRC), se estudió con un contenido del 1 y 2% de fibras en volumen.

A continuación, en la **Tabla 4-3** y **Tabla 4-4** se consignan las variables referentes a las dosificaciones de micro-fibras (mF) y macro-fibras (MF) utilizadas para reforzar el UHPC con 1 y 2% de fibras por volumen ( $V_f$ ), respectivamente. En las tablas se indica el material e identificación de las fibras utilizadas, la denominación de la mezcla y la proporción en volumen de micro y/o macro fibras.

**Tabla 4-3.** Dosificación de fibras al 1% del volumen de la mezcla.

MEZCLA	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - Vf				
	<i>Nylon</i>	<i>PVA</i>	<i>PP/PE</i>	<i>PP</i>	<i>MT</i>
ID	mF1	mF2	MF1	MF2	mFOL
<b>N1</b>	1.00%				
<b>N2</b>	0.75%		0.25%		
<b>N3</b>	0.50%		0.50%		
<b>N4</b>	0.25%		0.75%		
<b>N5</b>			1.00%		
<b>N6</b>	0.75%			0.25%	
<b>N7</b>	0.50%			0.50%	
<b>N8</b>	0.25%			0.75%	
<b>N9</b>				1.00%	
<b>N10</b>		1.00%			
<b>N11</b>		0.75%	0.25%		
<b>N12</b>		0.50%	0.50%		
<b>N13</b>		0.25%	0.75%		
<b>N14</b>		0.75%		0.25%	
<b>N15</b>		0.50%		0.50%	
<b>N16</b>		0.25%		0.75%	
<b>N17</b>					1.00%

**Tabla 4-4.** Dosificación de fibras al 2% del volumen de la mezcla.

MEZCLA ID	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - Vf				
	<i>Nylon</i> mF1	<i>PVA</i> mF2	<i>PP/PE</i> MF1	<i>PP</i> MF2	<i>MT</i> mFOL
N18	2.00%				
N19	1.50%		0.50%		
N20	1.00%		1.00%		
N21	0.50%		1.50%		
N22			2.00%		
N23	1.50%			0.50%	
N24	1.00%			1.00%	
N25	0.50%			1.50%	
N26				2.00%	
N27		2.00%			
N28		1.50%	0.50%		
N29		1.00%	1.00%		
N30		0.50%	1.50%		
N31		1.50%		0.50%	
N32		1.00%		1.00%	
N33		0.50%		1.50%	
N34					2.00%

## 4.3 Materiales

A continuación, se presenta una breve descripción de las características de los materiales que se utilizaron en la presente investigación para elaborar las mezclas de UHPFRC. Estos materiales incluyen al cemento, el humo de sílice, el polvo de vidrio, la arena de sílice, el superplastificante, el agua y las fibras. La mayor parte de estos materiales son de producción nacional y/o son comercializados en el país.

### 4.3.1 Cemento

El cemento Portland (CEM) utilizado en las mezclas de UHPFRC, fue el comercializado por la empresa Argos, denominado como cemento especializado para uso estructural, que cumple con la norma técnica colombiana NTC 121 (ICONTEC, 1982). El peso específico del CEM es 3.15 g/cm<sup>3</sup> y, tiene un diámetro medio de partículas ( $d_{50}$ ) de 8  $\mu$ m. En la **Figura 4-1** se puede apreciar una muestra de cemento.





**Figura 4-1.** Cemento - CEM.

Fuente: Tomado de (Abellán, Santofimio, et al., 2019).

### 4.3.2 Humo de sílice

El humo de sílice (SF) utilizado en las mezclas de UHPFRC, fue el comercializado por la empresa Euclid – Toxement, denominado como Eucon MSA – Microsilica, para producir concretos de altas resistencias, que cumple con los requerimientos de ASTM C-1240 (ASTM International, 2000). El peso específico del SF es  $2.2 \text{ g/m}^3$ , y tiene un diámetro medio de partículas ( $d_{50}$ ) de  $0.15 \text{ }\mu\text{m}$ . En la **Figura 4-2** se puede apreciar una muestra de humo de sílice.



**Figura 4-2.** Humo de sílice - SF.

Fuente: Tomado de (Abellán, Santofimio, et al., 2019).

### 4.3.3 Polvo de vidrio

El polvo de vidrio (GP) utilizado en las mezclas de UHPFRC, fue obtenido gracias a la investigación desarrollada por (Abellán et al., 2020), referente a la optimización estadística de la dosificación de polvo de vidrio en dos tamaños diferentes para UHPC. El peso específico del GP es  $2.55 \text{ g/cm}^3$ , y tiene un diámetro medio de partículas ( $d_{50}$ ) de  $28 \text{ }\mu\text{m}$ . El polvo de vidrio se obtuvo de la molienda de residuos de vidrio reciclado hasta alcanzar la condición de polvo, que se ajustara a la curva granulométrica típica de la harina de cuarzo para UHPC. Para la investigación será utilizado como material de relleno. En la **Figura 4-3** se puede apreciar una muestra de polvo de vidrio.



**Figura 4-3.** Polvo de vidrio - GP.

Fuente: Tomado de (Abellán, Santofimio, et al., 2019).

### 4.3.4 Arena de sílice

La arena de sílice (SS) utilizada en las mezclas de UHPFRC, fue la Arena Float, comercializada por la empresa Colombia Minerales Industriales S.A.S – COMIND. Se trata de una arena lavada y clasificada, utilizada normalmente para la elaboración de vidrio. El peso específico de SS es  $2.65 \text{ g/cm}^3$ , y tiene un diámetro medio de partículas ( $d_{50}$ ) de  $165 \text{ }\mu\text{m}$  y tamaño de partícula máximo ( $d_{max}$ ) de  $600 \text{ }\mu\text{m}$ . En la **Figura 4-4** se puede apreciar una muestra de arena de sílice.



**Figura 4-4.** Arena Float - SS.  
Fuente: Tomado de (Abellán, Santofimio, et al., 2019).

En la **Tabla 4-5** se presenta el resumen de las propiedades físicas y químicas de los materiales cementantes descritos anteriormente. La caracterización de estos materiales fue realizada por el ingeniero Joaquín Abellán, mediante la técnica espectroscópica de fluorescencia de rayos X (FRX) para su investigación en la “Statistical Optimization of Ultra-High-Performance Glass Concrete”, (Abellán et al., 2020).

**Tabla 4-5.** Resumen de las características físicas y químicas de los materiales cementantes del UHPFRC, tomado de (Abellán et al., 2020).

Material	Cemento	Humo de sílice	Polvo de vidrio	Arena silícea
<b>Sigla</b>	CEM	SF	GP	SS
<b>Peso Especifico (g/cm<sup>3</sup>)</b>	3.15	2.20	2.55	2.65
<b>Partícula Media (<math>d_{50}</math>)</b>	8 $\mu\text{m}$	0.15 $\mu\text{m}$	28 $\mu\text{m}$	165 $\mu\text{m}$
<b>Pérdida por Ignición %</b>	2.58	0.60	0.80	0.20
<b>SiO<sub>2</sub> %</b>	19.42	92.29	72.89	99.80
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %</b>	4.00	0.59	1.67	0.14
<b>CaO %</b>	64.42	3.89	9.73	0.17
<b>MgO %</b>	1.52	0.26	2.08	0.01
<b>SO<sub>3</sub> %</b>	1.93	0.07	0.01	-
<b>Na<sub>2</sub>O %</b>	0.19	0.31	12.54	-
<b>K<sub>2</sub>O %</b>	0.39	0.54	0.76	0.05
<b>TiO<sub>2</sub> %</b>	0.38	0.01	0.04	-
<b>Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> %</b>	0.05	0.01	0.01	-
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %</b>	3.61	0.24	0.81	0.04

### 4.3.5 Superplastificante

El aditivo reductor de agua de alto rango (HRWR) diseñado a base de policarboxilatos (PCE) de alta concentración y de última generación utilizado en las mezclas de UHPFRC, fue el comercializado por la empresa Euclid – Toxement, denominado como Plastol 7500 Ultra. Este producto cumple las especificaciones de la norma ASTM C-494 Tipo F (ASTM International, 2019) y la ASTM C 1017 Tipo 1 (ASTM International, 2013a). El peso específico del HRWR es 1.09 kg/l, y tiene un contenido de sólidos del 40% (Euclid - Toxement, 2017). En la **Figura 4-5** se puede apreciar la dosificación usada de aditivo para una mezcla de UHPFRC en el laboratorio.



**Figura 4-5.** Superplastificante – HRWR.  
Fuente: El autor.

### 4.3.6 Agua

El agua utilizada en las mezclas de UHPFRC, fue tomada de la red de suministro de agua potable que abastece a la Escuela Colombiana de Ingeniería y cumple con los requisitos de la norma NTC 3459 (ICONTEC, 2001). En la **Figura 4-6** se puede apreciar el pesaje del agua para una mezcla de UHPFRC en el laboratorio.



**Figura 4-6.** Agua potable - W.  
Fuente: El autor.

### 4.3.7 Fibras

Como ya se mencionó anteriormente en la investigación se utilizaron 5 tipos de fibras, 2 micro-fibras y 2 macro-fibras poliméricas y, una micro-fibra metálica. Las micro-fibras poliméricas de nylon o de polivinilo de alcohol, las macro-fibras poliméricas de polipropileno o de polipropileno y polietileno. La micro-fibra metálica utilizada es de acero de alta resistencia. El resumen de las características principales de estas fibras se presentó en la **Tabla 4-2**. A continuación, se hace una descripción de cada fibra.

- **Micro-fibras Poliméricas**

La micro-fibra 1 (**mF1**), corresponde a la micro-fibra de nylon de Agatex S.A. Se decidió incorporar esta micro-fibra polimérica a la investigación por la excelente adherencia que desarrolla con la matriz cementante. En la **Tabla 4-6** se indican las propiedades físicas más representativas de mF1 y en la **Figura 4-7** se presenta a la mF1.

**Tabla 4-6.** Propiedades físicas de la micro-fibra de nylon (mF1) de Agatex.

<b>Propiedades micro-fibra - mF1</b>	
Referencia comercial	Nylon
Material	Nylon monofilamento
Peso específico	1.16 g/cm <sup>3</sup>
Diámetro ( $d_f$ )	24 $\mu$ m
Longitud ( $l_f$ )	4.5 mm
Esbeltez ( $l_f / d_f$ )	188 : 1
Sección transversal	Circular
Resistencia a tensión	100 MPa
Textura	Lisa
Presentación	Grupo

**Figura 4-7.** Micro-fibra polimérica de Nylon.  
Fuente: El autor.

La micro-fibra 2 (**mF2**), corresponde a la micro-fibra de polivinilo de alcohol (PVA) de Agatex S.A. Se decidió incorporar esta micro-fibra polimérica a la investigación por la excelente adherencia que desarrolla con la matriz cementante y por su resistencia a la extracción. En la **Tabla 4-7** se indican las propiedades físicas más representativas de mF2 y en la **Figura 4-8** se presenta a la mF2.

**Tabla 4-7.** Propiedades físicas de la micro-fibra de polivinilo de alcohol (mF2) de Agatex.

<b>Propiedades micro-fibra - mF2</b>	
Referencia comercial	PVA
Material	Polivinilo de Alcohol
Peso específico	1.19 - 1.31 g/cm <sup>3</sup>
Diámetro ( $d_f$ )	20 $\mu$ m
Longitud ( $l_f$ )	6 mm
Esbeltez ( $l_f / d_f$ )	300 : 1
Sección transversal	Circular
Resistencia a tensión	1600 MPa
Textura	Lisa
Presentación	Grupo



**Figura 4-8.** Micro-fibra polimérica de polivinilo de alcohol (PVA).  
Fuente: El autor.

#### ▪ Macro-fibras poliméricas

La macro-fibra 1 (**MF1**), correspondiente a la fibra comercial TUF Strand SF de Toxement. Se decidió incorporar esta macro-fibra polimérica a la investigación por ser una de las fibras poliméricas más utilizadas para reforzar concreto a nivel mundial y por la adherencia que desarrolla con la matriz cementante. En la **Tabla 4-8** se indican las propiedades físicas más representativas de la MF1 y en la **Figura 4-9** se presenta a la MF1.



**Tabla 4-8.** Propiedades físicas de la macro-fibra de polipropileno y polietileno (MF1) de (Euclid - Toxement, 2011).

<b>Propiedades macro-fibra - MF1</b>	
Referencia comercial	TUF - STRAND SF
Material	Polietileno y polipropileno
Peso específico	0.91 g/cm <sup>3</sup>
Diámetro ( $d_f$ )	675 $\mu$ m
Longitud ( $l_f$ )	50 mm
Esbeltez ( $l_f / d_f$ )	74 : 1
Sección transversal	Circular
Resistencia a tensión	600 - 650 MPa
Textura	Lisa
Presentación	Grupo



**Figura 4-9.** Macro-fibra polimérica de polietileno y polipropileno (PP/PE).  
Fuente: El autor.

La macro-fibra 2 (**MF2**), correspondiente a la fibra comercial BarChip 48 de Elasto Plastic Concrete, es una fibra compuesta de 99% de polipropileno (PP). Se decidió incorporar esta macro-fibra polimérica a la investigación por ser una de las fibras poliméricas más reconocidas para reforzar concreto y por ser hidrófoba (no absorbe agua). En la **Tabla 4-9** se indican las propiedades físicas más representativas de MF2 y en la **Figura 4-10** se presenta a la MF2.



**Tabla 4-9.** *Propiedades físicas de la macro-fibra de polipropileno (MF2) de (Elasto Plastic Concrete, 2010).*

**Propiedades macro-fibra - MF2**

Referencia comercial	BarChip 48
Material	Polipropileno (98.0%)
Peso específico	0.89 - 0.91 g/cm <sup>3</sup>
Diámetro ( $d_f$ )	700 $\mu$ m
Longitud ( $l_f$ )	48 mm
Esbeltez ( $l_f / d_f$ )	69 : 1
Sección transversal	Rectangular
Resistencia a tensión	640 MPa
Textura	Corrugada
Presentación	Individual



**Figura 4-10.** *Macro-fibra polimérica de polipropileno (PP).*  
Fuente: El autor.

- **Microfibras metálicas**

Las micro-fibras metálicas utilizadas en las mezclas de UHPFRC de esta investigación estarán identificadas como **mFOL**. La micro-fibra mFOL corresponde a la fibra denominada comercialmente como OL13/0.2 de Dramix. Esta micro-fibra de acero de alta resistencia es recta y lisa, elaborada de alambre trefilado en frío con un baño en latón para proteger la fibra de la oxidación. Es comúnmente utilizada para uso estructural en concretos, mortero y lechadas. Además, la fibra Dramix OL13/0.20 es una de las micro-fibras metálicas más comercializadas para FRC e implementadas en investigaciones de UHPFRC, por esta razón se decidió utilizar en la investigación y, a su vez establecer un

patrón de comparación con las fibras poliméricas en cuanto al comportamiento a flexión y compresión. En la **Tabla 4-10** se indican las propiedades físicas más representativas de la mFOL y en la **Figura 4-11** se presenta a la mFOL.

**Tabla 4-10.** *Propiedades físicas de la micro-fibra metálica (mFOL) de (Bekaert, 2019).*

Propiedades micro-fibra - OL	
Referencia comercial	Dramix OL 1320
Material	Alambre alto en carbono
Peso específico	7.85 g/cm <sup>3</sup>
Diámetro ( $d_f$ )	200 $\mu$ m
Longitud ( $l_f$ )	13 mm
Esbeltez ( $l_f / d_f$ )	65 : 1
Sección transversal	Circular
Resistencia a tensión	2750 MPa
Textura	Lisa
Presentación	Individual



**Figura 4-11.** *Micro-fibra metálica Dramix OL 13/20.*  
Fuente: El autor.

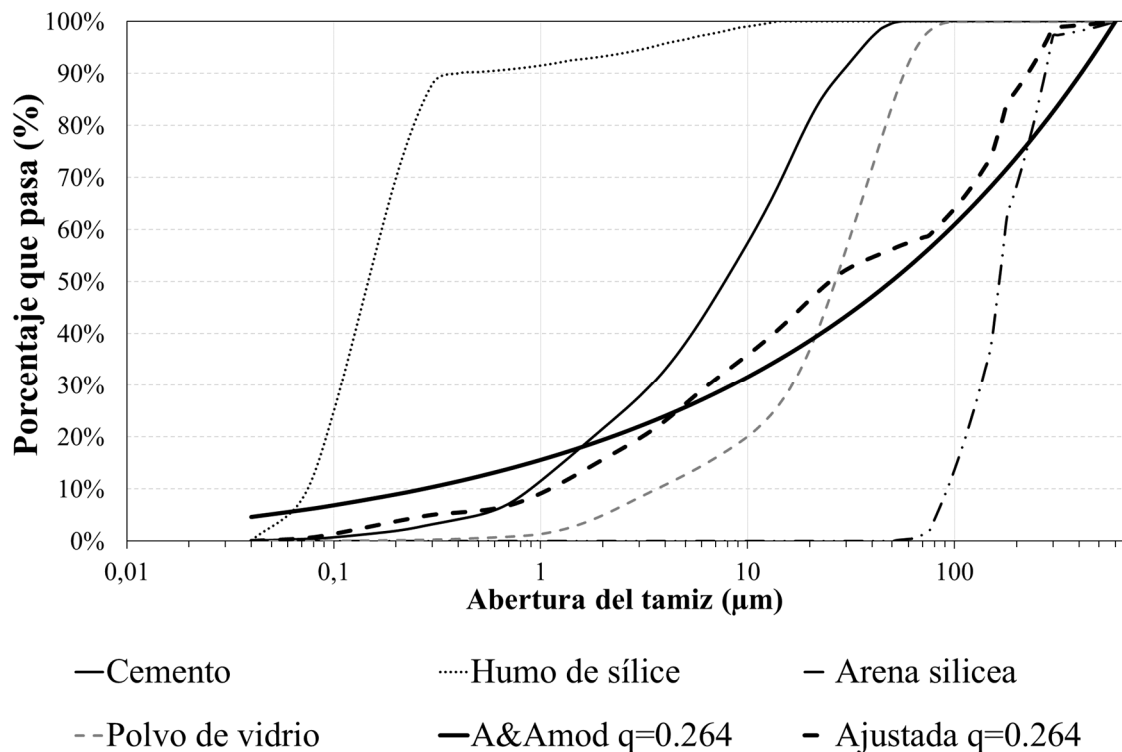
#### 4.4 Diseño de mezcla para UHPC

El diseño de la mezcla de UHPC se basó en la teoría de empaquetamiento de Andreassen y Andersen modificada (Funk & Dinger, 1994). El valor del exponente de Fuller ( $q = 0.264$ ), el diseño de mezcla, la relación agua conglomerante ( $w/b$ ) y dosificación del superplastificante, fue determinado por el director de la tesis, el ingeniero Joaquín Abellán,

con base en su experiencia en investigaciones relacionadas con las propiedades del concreto de ultra altas prestaciones (Abellán et al., 2018b).

### 4.4.1 Distribución de tamaño de partícula - DTP

La distribución de partículas se obtuvo gracias a las investigaciones desarrolladas por el director y codirectora de la tesis, relacionadas con la “optimización estadística de la harina y polvo de vidrio para UHPC” (Abellán et al., 2020). En la **Figura 4-12** se presenta el gráfico correspondiente a la distribución de tamaño de partículas (DTP) de cada material cementante y la arena silícea, que conforma la matriz del UHPC implementada en la investigación. En el gráfico se pueden apreciar las curvas granulométricas teóricas del CEM, SF, GP y SS. Además, se puede observar la curva teórica en función de la *Ecuación 1-1*,  $A \& A_{mod}$  de (Funk & Dinger, 1994), con  $q$  igual a 0.264. Para luego ajustar por mínimos cuadrados la curva real a la curva teórica, donde la curva real es la composición de las curvas de todos los componentes del UHPC.



**Figura 4-12.** Distribución del tamaño de partículas (DTP) usada en la mezcla de UHPC.  
Fuente: Tomado de (Abellán et al., 2018b).

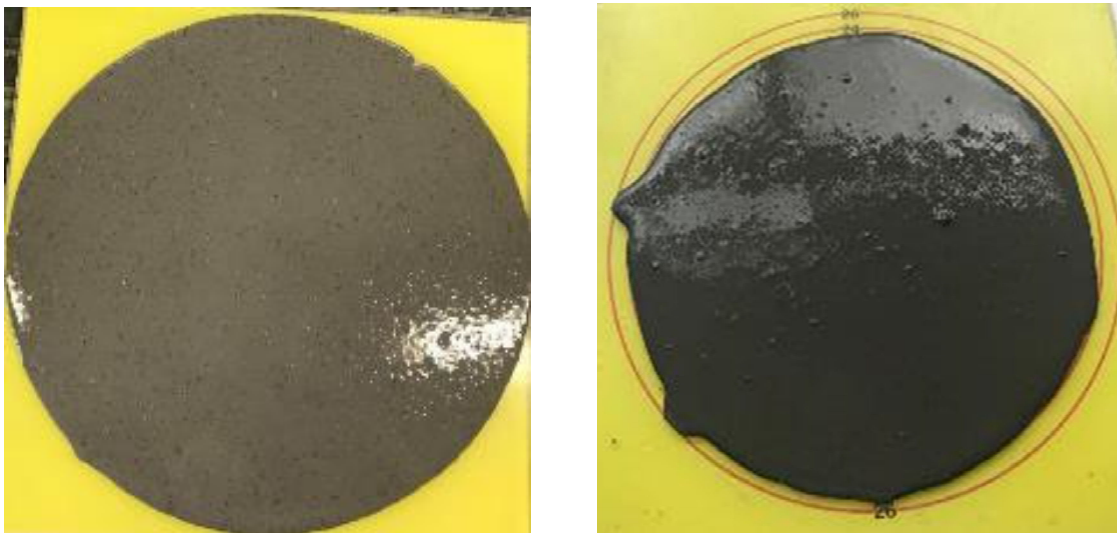
#### 4.4.2 Relación agua y superplastificante

Antes de incorporar fibras a la mezcla de UHPC se requiere conocer la cantidad de agua y superplastificante adecuado para garantizar la manejabilidad de la mezcla en estado fresco. El flujo estático requerido debe estar entre 240 y 260 mm, adecuado para mezclas simples de concreto autocompactante como es el caso del UHPC, según lo indicado en la norma EFNARC (The European Project Group, 2005).

La relación agua conglomerante ( $w/b$ ) se fijó en 0.16 y el contenido de superplastificante ( $PCE$ ) varió entre 1.7 y 1.8% del volumen de la mezcla. Para alcanzar el nivel de fluidez adecuado y requerido fue necesario elaborar dos dosificaciones. La primera denominada como N00, presentó un exceso de flujo, dado que el valor del flujo estático promedio ( $\varnothing_m$ ) fue de 300 mm. Para la segunda dosificación denominada como N0 el  $\varnothing_m$  fue de 245 mm, valor que se ajusta con indicado en la norma EFNARC, razón por la cual se adoptó esa relación de agua y superplastificante. En la **Tabla 4-11** y en la **Figura 4-13** se pueden apreciar los resultados del flujo estático promedio de las mezclas N00 y N0 de UHPC.

**Tabla 4-11.** Resultados de la medición del flujo estático en mezclas de UHPC, para determinar la relación de agua y superplastificante.

	N00	N0
$\varnothing_m$ (mm)	300	245



**Figura 4-13.** Flujo estático de la mezcla N00 y N0 de UHPC.

Fuente: El autor.

### 4.4.3 Proporción de materiales

En la **Tabla 4-12**, se presenta la proporción de los materiales que conforman la matriz cementante de la mezcla N0, para un metro cubico de UHPC del cual se puede extrapolar la dosificación para un volumen de mezcla de 0.85 litros, correspondiente a la suma del volumen de 3 probetas de 40 x 40 x 160 mm, más un desperdicio del 10%.

**Tabla 4-12.** Dosificación matriz cementante de la mezcla N0 para 1 m<sup>3</sup> y para 3 probetas (40 x 40 x 160 mm), con un desperdicio del 10%.

#### Dosificación matriz cementante

##### 1000 Litros - 1 m<sup>3</sup>

Material	Sigla	Cantidad	Unidad
Cemento	CEM	750.00	kg
Humo de sílice	SF	290.00	kg
Polvo de vidrio	GP	400.00	kg
Arena silícea	SS	530.29	kg
Superplastificante	HRWR	32.35	kg
Agua	W	215.29	kg

#### Dosificación matriz cementante

##### 0.85 Litros

Material	Sigla	Cantidad	Unidad
Cemento	CEM	637.50	g
Humo de sílice	SF	246.50	g
Polvo de vidrio	GP	340.00	g
Arena silícea	SS	450.75	g
Superplastificante	HRWR	27.50	g
Agua	W	183.00	g

### 4.5 Protocolo de amasado de los materiales

El protocolo de amasado de los materiales constó de 4 etapas: la primera consistió en el pesaje de materiales, la segunda en preparar los moldes o formaletas, la tercera en elaborar la mezcla y la cuarta en medir el flujo estático de la misma. A continuación, se presenta una breve descripción de cada etapa para obtener cada mezcla de UHPFRC.

### 4.5.1 Pesaje de materiales

El procedimiento para elaborar cada mezcla de UHPFRC, consistió en dosificar la cantidad de cada material mediante una balanza digital de precisión, los materiales en polvo se empaquetaron en bolsas transparentes y herméticas, como se observa en la **Figura 4-14**. La cantidad de agua y superplastificante para la mezcla se envasaron en vasos precipitados o breaker. La cantidad de micro-fibras se depositó en cucharas metálicas para concreto o capsulas de porcelana y las macro-fibras se empaquetaron de forma similar a los materiales cementantes, como se puede apreciar en la **Figura 4-15**.



**Figura 4-14.** Materiales cementantes y arena discriminados en laboratorio para elaborar UHPFRC.

Fuente: El autor.



**Figura 4-15.** Fibras discriminadas en laboratorio para elaborar UHPFRC.

Fuente: El autor.

### 4.5.2 Moldes

Como se indicó en la metodología, la norma europea EN 196-1, se toma como referente para desarrollar los ensayos a flexión y compresión de las probetas de UHPFRC. Por consiguiente, las dimensiones de las probetas prismáticas establecidas en la norma son: ancho 40 mm, alto 40 mm y largo 160 mm. En cuanto a la cantidad de probetas se estableció en 3 por mezcla, para obtener un promedio confiable de los datos obtenidos en los ensayos. Asimismo, los moldes triples existentes en el laboratorio, permitieron elaborar tres mezclas cada dos días. El material que reviste las caras perimetrales de los moldes son bloques de acero inoxidable, cortados con láser para obtener la mayor precisión en las medidas. Los moldes son soportados y atornillados a una platina de acero de  $\frac{1}{4}$ ". En la **Figura 4-16** se puede observar el juego de moldes usados para la elaboración de las diferentes muestras.

Los moldes fueron desarmados y limpiados muy bien después de haber sido utilizados en una mezcla previa. Al tener limpios y armados los moldes se humectan sutilmente las superficies que estarán en contacto con el concreto, con desmoldante. Esta lubricación se realizó momentos antes de iniciar con la mezcla y para facilitar el desencofrado de las probetas.



**Figura 4-16.** Moldes para probetas de UHPFRC.

*Fuente: El autor.*

### 4.5.3 Elaboración de mezcla

Para el procedimiento de mezcla se adoptaron dos procedimientos, el primero para UHPC descrito por (Shafieifar et al., 2017) en su artículo “Estudio experimental y numérico sobre las propiedades mecánicas del concreto de ultra altas prestaciones (UHPC)” y el segundo



para UHPFRC descrito por (Yu, Spiesz, et al., 2014) en su artículo “Diseño de mezcla y evaluación de propiedades del concreto de ultra altas prestaciones reforzado con fibras (UHPFRC)”. La compilación de estos procedimientos se describe a continuación:

Inicialmente se realiza el pesaje de los materiales, se alistan los moldes y luego se procede con elaboración de la mezcla de UHPFRC. Los materiales cementantes o conglomerantes (CEM, SF, GP) son premezclados en seco en una bolsa de plástico durante 5 minutos aproximadamente, hasta alcanzar un color gris uniforme. Mientras tanto el superplastificante (HRWR) y el agua (W) son premezclados en el recipiente de la amasadora por 1.5 minutos a velocidad 1 (velocidad lenta – 140 rpm). En la **Figura 4-17** se ilustra el proceso inicial del premezclado de los materiales para UHPFRC en el laboratorio. Luego se procede a incorporar la mezcla de los materiales cementantes gradualmente y sin interrupciones a la mezcla líquida, al incorporar todo el material cementante se cubre la boca del recipiente con un paño húmedo con el fin de evitar la pérdida de partículas y para mantener una humedad controlada, se procede a aumentar la velocidad a 2 (velocidad intermedia – 212 rpm), durante 1 minuto. Posteriormente se detiene la rotación de la pala y se remueven de los lados de la mezcladora con una espátula de caucho todos los residuos de material que están adheridos a las paredes del recipiente en especial la pasta de cemento, conformada por conglomerante más agua y aditivo. Culminada la limpieza se cubre nuevamente la boca del recipiente con el paño húmedo y se reinicia la mezcla en velocidad 3 (velocidad máxima – 285 rpm), durante 3 minutos.





**Figura 4-17.** Mezcla de materiales cementantes. A la izquierda amasadora con premezcla de agua y superplastificante, a la derecha premezcla de materiales cementantes para UHPFRC.

Fuente: El autor.

Una vez transcurrido los tres minutos a velocidad 3, se disminuye la velocidad de la amasadora a 1 y se incorpora paulatinamente la arena silíceo a la mezcla. De nuevo se cubre la boca del recipiente y se cambia la velocidad a 2, se deja mezclar durante 5 minutos. Pasado el tiempo se verifica que el flujo de la mezcla sea adecuado para incorporar las fibras. En el caso de las mezclas con fibras híbridas con diferentes tamaños, las micro-fibras se agregan primero y luego se incorporan las macro-fibras a la mezcla (Kim et al., 2011). La incorporación de las fibras se hace gradualmente a la mezcla a velocidad 1. En este momento es necesario limpiar nuevamente las paredes del recipiente donde hay pasta de cemento, partículas de arena y fibras sin mezclar. Se inicia nuevamente la mezcla a velocidad 2 durante 2 minutos. En este momento han transcurrido 15 minutos aproximadamente desde que inicio la mezcla de todos los materiales hasta obtener la mezcla de UHPFRC lista para realizar la medición del flujo y posteriormente el vaciado en los moldes. En la **Figura 4-18** se puede apreciar el proceso típico para elaborar las mezclas de UHPFRC en el laboratorio.



**Figura 4-18.** Mezcla de materiales. De izquierda a derecha: Incorporación de la arena silíceo, proceso de amasado típico e incorporación de fibras a la mezcla de UHPFRC.

Fuente: El autor.

## 4.6 Flujo estático del UHPFRC

Transcurrido el tiempo y proceso de mezclado indicado en la elaboración de la mezcla y antes de vaciar el UHPFRC en los moldes, se miden los cuatro diámetros descritos en la norma ASTM C1437 para determinar el diámetro promedio o flujo estático ( $\phi_m$ ). Por último, se realiza un registro fotográfico al culminar la medición. Los valores obtenidos permitieron evaluar la influencia de las fibras poliméricas en el UHPFRC en estado fresco. En la **Figura 4-19** se puede apreciar la toma del flujo estático en el laboratorio.



**Figura 4-19.** Toma del flujo estático mezcla de UHPFRC.  
Fuente: El autor.

## 4.7 Vaciado del UHPFRC

Finalmente, el vaciado del concreto en los moldes se realiza vertiendo el concreto en una capa por la parte central del molde de forma constante hasta que la mezcla llene por completo todo el espacio libre, las otras dos probetas se fundieron de la misma manera. Al culminar el llenado de los moldes se procedió a compactar el concreto, generando un golpeteo constante y sutil de 30 golpes por cada lado durante 2 minutos, con el fin de sacar al máximo, el contenido de aire del concreto. En la **Figura 4-21** se puede apreciar el vaciado del UHPFRC en las probetas.



**Figura 4-20.** Vaciado del UHPFRC en los moldes.  
Fuente: El autor.

## 4.8 Curado

Las probetas fundidas se cubren con plástico, el molde es rotulado con el número de mezcla correspondiente y se almacenan en el cuarto curado por 24 horas antes de desmoldarlas. Después de desmoldar las tres probetas, se rotula cada una con el número de la mezcla y un número consecutivo del 1 al 3, se procede al embalaje de las probetas con plástico para evitar al máximo la pérdida de humedad del concreto y nuevamente se rotulan. Finalmente, las probetas son almacenadas por 28 días (tiempo establecido para determinar la resistencia a flexión y compresión del UHPFRC) en el cuarto de curado, con humedad relativa de  $95 \pm 5\%$  y con una temperatura promedio de  $23 \pm 2^\circ \text{C}$ . En la **Figura 4-21** se puede apreciar el proceso de embalaje y rotulado de las probetas de UHPFRC.





**Figura 4-21.** *Proceso de embalaje y curado de las probetas.*  
*Fuente: El autor.*

Pasados los 28 días las probetas son retiradas del cuarto de curado, se procede a retirar el embalaje y a proyectar los 2 planos de apoyo y el plano central de aplicación de carga, para cada probeta. Esto se realizó para facilitar la ubicación de la probeta con respecto a los rodillos de apoyo para el ensayo a flexión en tres puntos.

## 4.9 Ensayos

Como ya se mencionó, los ensayos realizados a las probetas de UHPFRC siguieron las directrices de la norma EN 196-1 “Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias”, para determinar la resistencia a flexión y compresión (Asociación Española de Normalización, 2018).

### 4.9.1 Resistencia a flexión

Esta propiedad se evaluó sobre probetas de 40 mm alto, 40 mm de ancho y 160 mm de largo a los 28 días de haber sido fundidas. La resistencia a flexión del UHPFRC se determinó mediante ensayo a flexión en tres puntos. El montaje para el ensayo a flexión consistió en ubicar 2 bloques de acero equidistantes del centro de aplicación de carga, sobre la prensa de la máquina universal, los bloques fueron utilizados para distanciar la probeta de la prensa y permitir la instalación del LVTD (transductor de desplazamiento lineal variable), alineado al plano de carga del rodillo central y centrado en el ancho del espécimen sobre la cara inferior. Luego se ubicaron sobre los bloques de acero los rodillos de apoyo para las probetas. Uno de los rodillos de apoyo y el rodillo de aplicación de carga



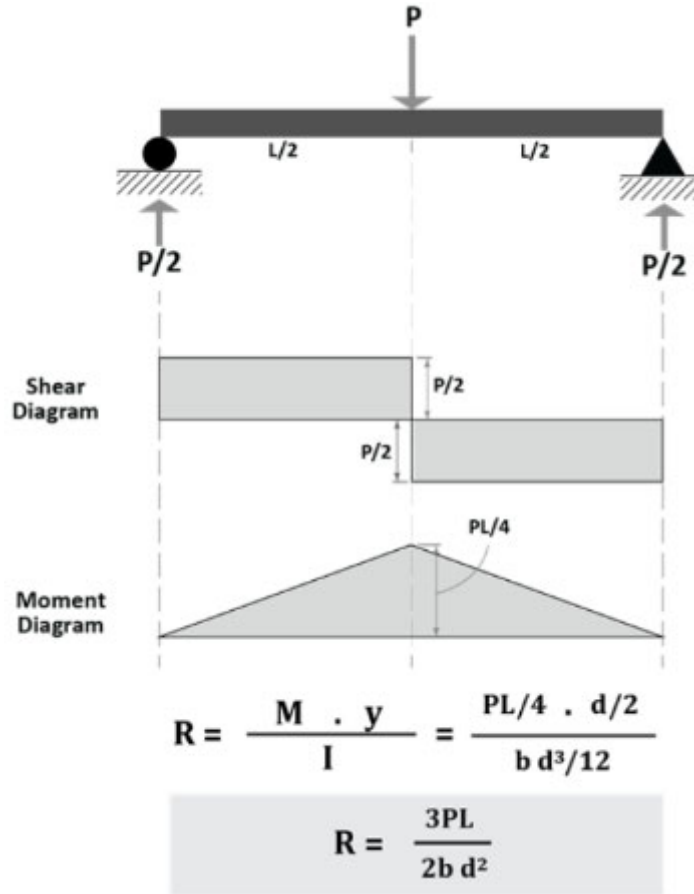
tienen la libertad de oscilar con el fin de evitar esfuerzos de torsión sobre la probeta. Luego se ubica la probeta por la cara lateral y lisa, sobre los rodillos y, sobre el centro de la probeta se coloca el rodillo de aplicación de carga. En la **Figura 4-22** se puede apreciar el montaje sobre la maquina universal del dispositivo de carga para ejecutar el ensayo a flexión.



**Figura 4-22.** Montaje de dispositivo de carga para ensayo a flexión en tres puntos.  
Fuente: El autor.

Una vez verificado que todos los elementos están posicionados y alineados respectivamente, se procede a programar el software de la maquina universal para que el incremento de carga sea constante, donde la prensa de la maquina se desplaza a 0.2 mm/min, luego se revisa que la lectura del LVTD inicie en cero y que este registrando los desplazamientos. Con el montaje listo y los equipos programados se da inicio al ensayo a flexión en tres puntos. Culminado el ensayo, se revisa el modo de falla, se guarda la información registrada por la maquina universal y por el LVDT. Además, se conservan los semi-prismas para luego determinar la resistencia a la compresión del UHPFRC, como se describe en el numeral 4.9.2.

La resistencia a la flexión asociada tanto al límite de proporcionalidad ( $f_{LOP}$ ), como al módulo de rotura ( $f_{MOR}$ ), para un ensayo a flexión en tres puntos, se calculó con la **Ecuación 4-1**. En la **Figura 4-23** se ilustra la deducción de la ecuación para determinar la resistencia a flexión en una viga simplemente apoyada con carga puntual en el centro de la luz.



**Figura 4-23.** Diagramas de corte y momento para flexión en 3 puntos.  
Fuente: Tomado de (Jihad et al., 2019).

$$f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

**Ecuación 4-1**

Donde:

- $L$  es la distancia entre apoyos en la disposición del ensayo;
- $b$  es el ancho de la probeta;
- $d$  es la altura de la probeta.

### 4.9.2 Resistencia a compresión

Esta propiedad se evaluó en sobre probetas cubicas de 40 mm de lado a los 28 días de haber sido fundidas. Los prismas fueron obtenidos de las probetas ensayadas a flexión, la falla en la probeta a flexión se presenta en el centro de la luz, lo que permite reutilizar los extremos de la probeta, los cuales no presentan fisuras y pueden ser ensayados a

compresión. Cada extremo se corta de forma tal que permita obtener un cubo de 40 mm de lado, luego se procede a medir las dimensiones del cubo con ayuda de un pie de rey para determinar la resistencia a compresión. Todo lo anterior se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma EN-196-1, para determinar la resistencia a compresión.

Los prismas se dispusieron de manera que la proyección del eje del cubo estuviera alineado con respecto al centro de la mesa y al centro del cabezal de la maquina universal. Se ensayó cada prisma cargando las caras laterales, lisas y que no fueron cortadas con ayuda de la maquina universal. En la **Figura 4-24** se pueden apreciar 18 cubos obtenidos de 9 probetas de 3 mezclas de UHPFRC y también se puede apreciar el montaje del dispositivo de carga para el ensayo a compresión. El procedimiento para obtener cada cubo y la configuración de carga fue constante para cada prisma.



**Figura 4-24.** Resistencia a compresión. A la izquierda muestra de cubos de UHPFRC y a la derecha montaje del dispositivo de carga para el ensayo a compresión.  
Fuente: El autor.

La resistencia a la compresión  $f'_c$  se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$f'_c = \frac{P}{A}$$

**Ecuación 4-2**

Donde:

$f'_c$  es la resistencia a compresión en MPa;

$P$  es la carga máxima en N;

$A$  es el área del prisma en mm<sup>2</sup>.

## 5. Resultados y análisis

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos del programa experimental. Inicialmente se exponen los resultados de la medición del flujo estático de cada mezcla de UHPFRC.

Posteriormente, se presentan los resultados de los ensayos a flexión de cada probeta junto con las curvas de esfuerzo versus deformación. Con estas curvas se determinó el límite de proporcionalidad (LOP), la resistencia a la flexión (MOR) y la tenacidad o capacidad de absorción de energía del material, para evaluar el comportamiento a flexión. Luego, se presentan los resultados del efecto de las fibras poliméricas en la resistencia a compresión del UHPFRC. Adicionalmente y a la par, se realiza una comparación de los resultados obtenidos con los resultados de las probetas reforzadas con micro-fibras metálicas al 1 y 2% en volumen. También se realiza una comparación de los resultados obtenidos con las probetas de UHPC y UHPFRC (reforzadas con micro-fibras metálicas) con los resultados obtenidos por otras investigaciones referentes al comportamiento a flexión y compresión de estos mismos concretos.

Finalmente, este capítulo exhibe un análisis técnico-económico de los costos por metro cubico para las dosificaciones con fibras poliméricas más representativas por su tenacidad y los compara con los costos de las mezclas con micro-fibras metálicas.

### 5.1 Flujo estático

El flujo estático ( $\emptyset_m$ ) se obtuvo del promedio de 4 diámetros medidos durante el programa experimental, para determinar la dispersión de los resultados se determinó la desviación estándar ( $SD_M$ ) de los 4 diámetros. Adicionalmente, para todos los resultados se determinó la reducción del flujo ( $R$ ) del UHPFRC con respecto al flujo de la muestra patrón de UHPC,



mezcla N0. Cabe recordar que la mezcla N00 presento exceso de flujo y no cumplió con los requisitos establecidos de manejabilidad óptima indicados en la norma EFNARC para concretos autocompactantes y, por lo tanto, fue descartada para realizar ensayos a flexión y compresión. En la **Tabla 5-1** se presenta el resultado del flujo estático asociado a la mezcla base N0 de UHPC y su fotografía se pudo observar en la **Figura 4-13**.

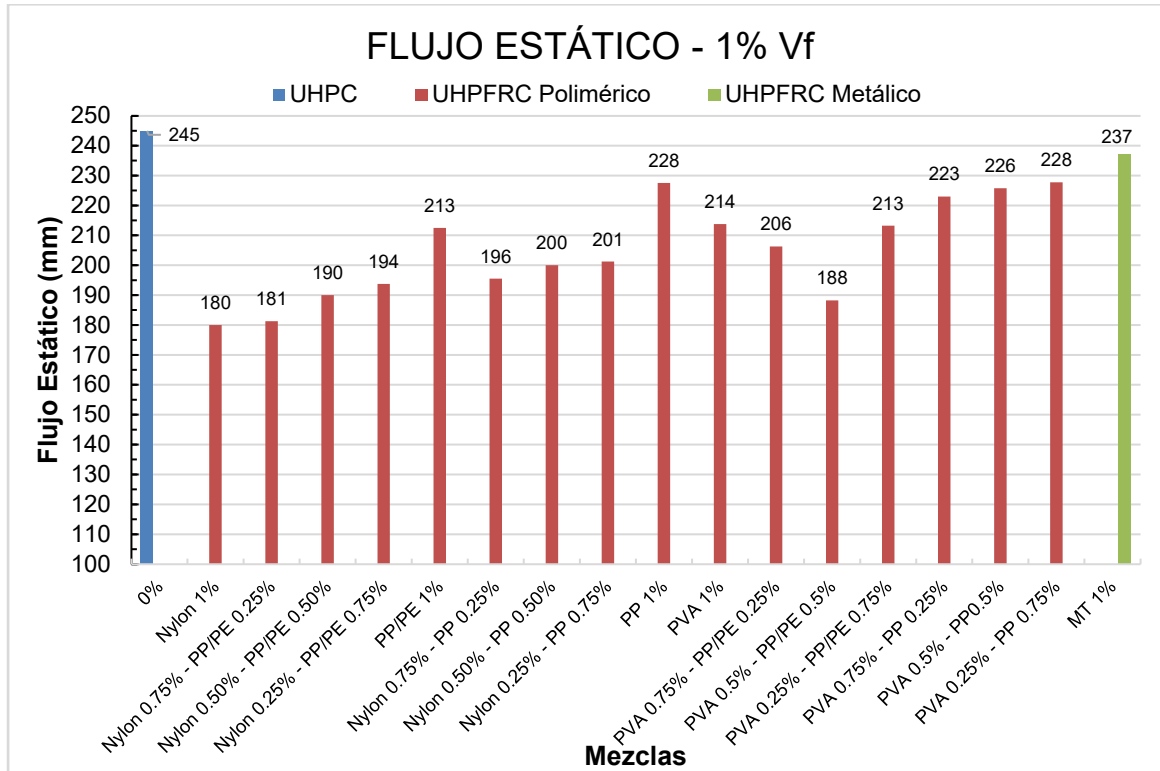
**Tabla 5-1. Resultados del flujo estático promedio en mezcla de UHPC.**

MEZCLA		FLUJO		REDUCCIÓN	
ID	V <sub>f</sub>	Ø <sub>m</sub>	SD <sub>M</sub>	R	R%
		(mm)	(%)	(mm)	(%)
N0	0%	245	1.7%	0	0%

En la **Tabla 5-2** e **Ilustración 5-1** se presentan los resultados del flujo estático de las mezclas de UHPFRC reforzadas con fibras al 1% en volumen y, en la **Tabla 5-3** e **Ilustración 5-2** se presentan los resultados para el 2%. En el anexo A se presentan los cálculos correspondientes y fotografías de la medición del flujo estático para cada mezcla.

**Tabla 5-2. Resultados del flujo estático promedio en mezclas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 1% en volumen.**

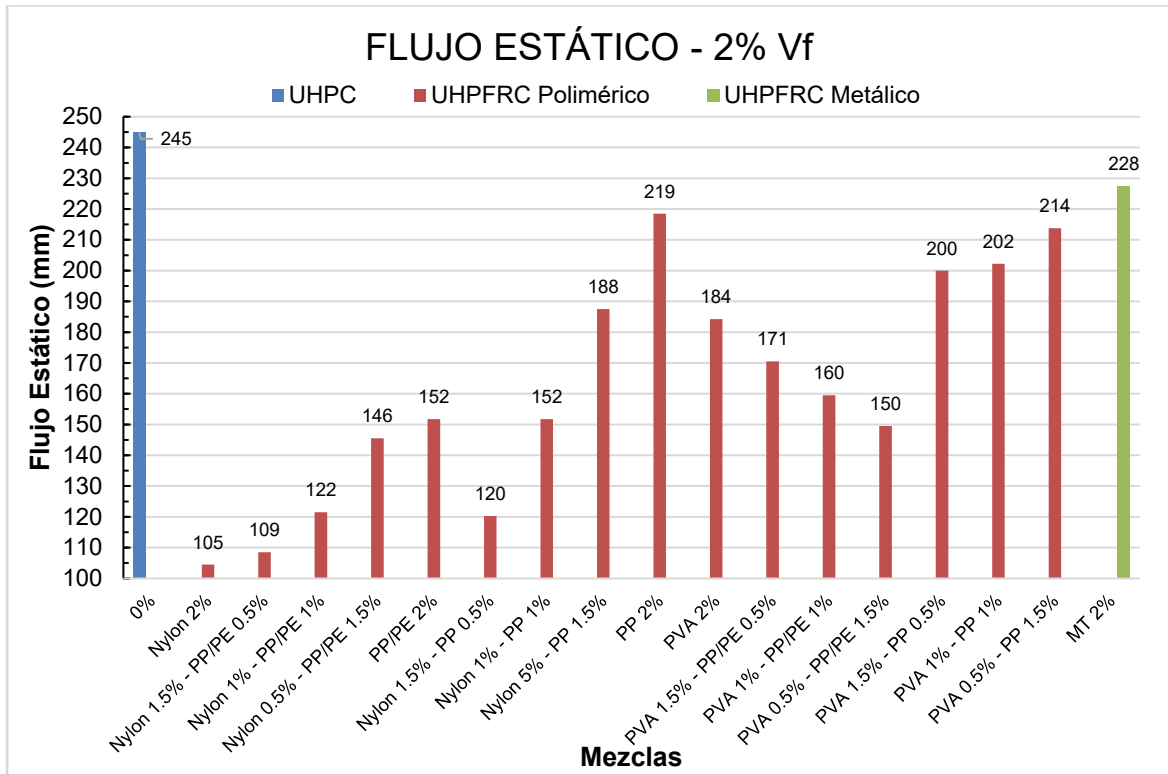
MEZCLA	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - V <sub>f</sub>					FLUJO		REDUCCIÓN	
ID	Nylon	PVA	PP/PE	PP	MT	Ø <sub>m</sub>	SD <sub>M</sub>	R	R%
	mF1	mF2	MF1	MF2	mFOL	(mm)	(%)	(mm)	(%)
N1	1.00%					180	6.0%	65	27%
N2	0.75%		0.25%			181	2.6%	64	26%
N3	0.50%		0.50%			190	8.6%	55	22%
N4	0.25%		0.75%			194	9.3%	51	21%
N5			1.00%			213	2.4%	33	13%
N6	0.75%			0.25%		196	8.9%	50	20%
N7	0.50%			0.50%		200	4.1%	45	18%
N8	0.25%			0.75%		201	4.2%	44	18%
N9				1.00%		228	2.8%	18	7%
N10		1.00%				214	8.0%	31	13%
N11		0.75%	0.25%			206	7.8%	39	16%
N12		0.50%	0.50%			188	6.8%	57	23%
N13		0.25%	0.75%			213	5.3%	32	13%
N14		0.75%		0.25%		223	6.5%	22	9%
N15		0.50%		0.50%		226	2.4%	19	8%
N16		0.25%		0.75%		228	5.7%	17	7%
N17					1.00%	237	2.3%	8	3%



**Ilustración 5-1.** Resultados del flujo estático promedio en mezclas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 1% en volumen.

**Tabla 5-3.** Resultados del flujo estático promedio en mezclas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 2% en volumen.

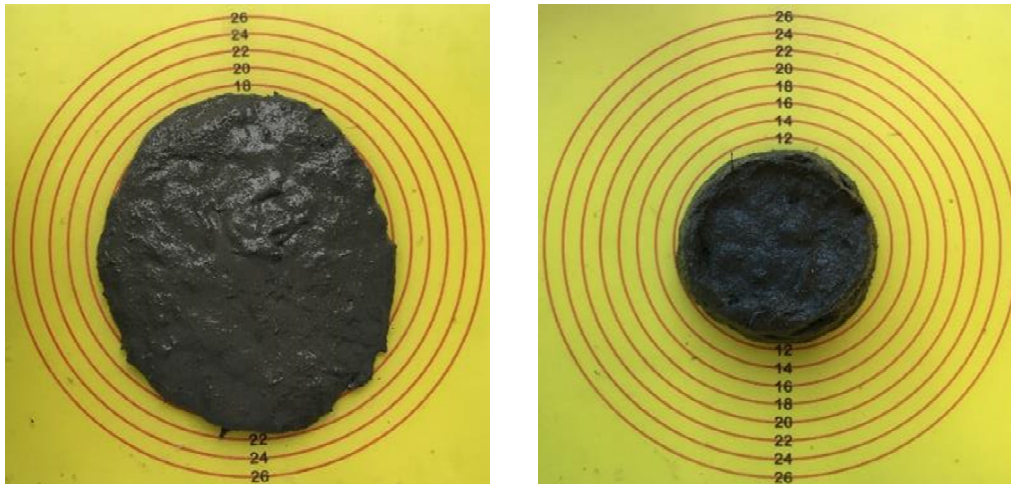
MEZCLA	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - Vf					FLUJO		REDUCCIÓN	
	Nylon	PVA	PP/PE	PP	MT	$\varnothing_m$	$SD_M$	R	R%
ID	mF1	mF2	MF1	MF2	mFOL	(mm)	(%)	(mm)	(%)
N18	2.00%					105	5.0%	141	57%
N19	1.50%		0.50%			109	1.8%	137	56%
N20	1.00%		1.00%			122	6.2%	124	50%
N21	0.50%		1.50%			146	4.1%	100	41%
N22			2.00%			152	3.9%	93	38%
N23	1.50%			0.50%		120	3.1%	125	51%
N24	1.00%			1.00%		152	7.1%	93	38%
N25	0.50%			1.50%		188	7.8%	58	23%
N26				2.00%		219	2.9%	27	11%
N27		2.00%				184	8.5%	61	25%
N28		1.50%	0.50%			171	2.6%	75	30%
N29		1.00%	1.00%			160	3.8%	86	35%
N30		0.50%	1.50%			150	3.0%	96	39%
N31		1.50%		0.50%		200	7.6%	45	18%
N32		1.00%		1.00%		202	5.5%	43	17%
N33		0.50%		1.50%		214	8.1%	31	13%
N34					2.00%	228	4.1%	18	7%



**Ilustración 5-2.** Resultados del flujo estático promedio en mezclas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 2% en volumen.

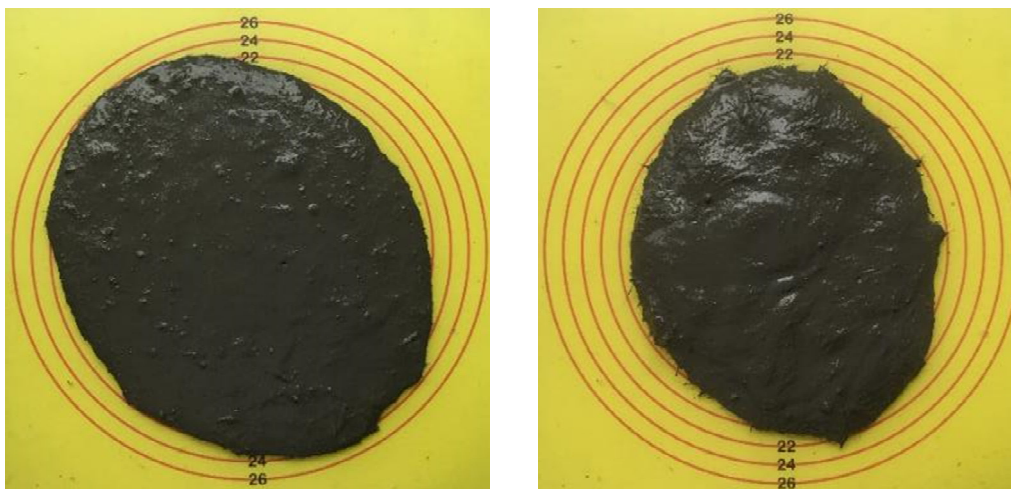
Los resultados permiten observar que la micro-fibra de nylon (mF1) presente en las mezclas de UHPFRC absorbe mayor cantidad de agua durante la mezcla comparada con todas las demás fibras. La reducción en el flujo para mezclas dosificadas con solo micro-fibras de nylon fue del 27 y 57%, para contenidos de fibras en volumen del 1 y 2% respectivamente, comparado con el flujo del UHPC.

Pese a que las dos micro-fibras poliméricas son de origen hidrofílico, el PVA está recubierto de un agente lubricante que se une fuertemente a la fibra, lo que dificulta que absorba agua, razón por la cual la reducción del flujo en las mezclas dosificadas con solo de micro-fibras de PVA fue del 13 y 25%, para contenidos de fibras en volumen del 1 y 2% respectivamente, comparado con el flujo del UHPC. En la **Figura 5-1** y **Figura 5-2** se puede apreciar la reducción del flujo en las mezclas reforzadas con 1 y 2% de micro-fibras de nylon (mF1) y PVA (mF2), respectivamente.



**Figura 5-1.** Flujo estático en mezclas de UHPFRC reforzadas con solo micro-fibras de nylon (mF1). A la izquierda mezcla (N1) con 1% de fibras y a la derecha mezcla (N18) con 2% de fibras en volumen.

Fuente: El autor.



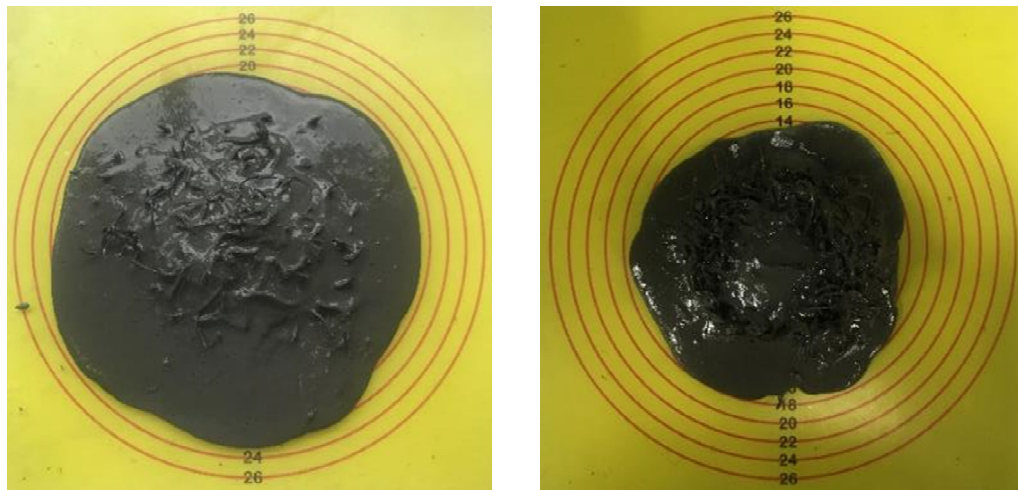
**Figura 5-2.** Flujo estático en mezclas de UHPFRC reforzadas con solo micro-fibras de PVA (mF2). A la izquierda mezcla (N10) con 1% de fibras y a la derecha mezcla (N27) con 2% de fibras en volumen.

Fuente: El autor.

Los resultados también permiten evidenciar que la macro-fibra de polipropileno y polietileno (MF1) presente en las mezclas N2 a N5 y N11 a N13 absorbe mayor cantidad de agua durante la mezcla, en comparación con la macro-fibra de polipropileno (MF2) presente en las mezclas N6 a N9 y N14 a N16.

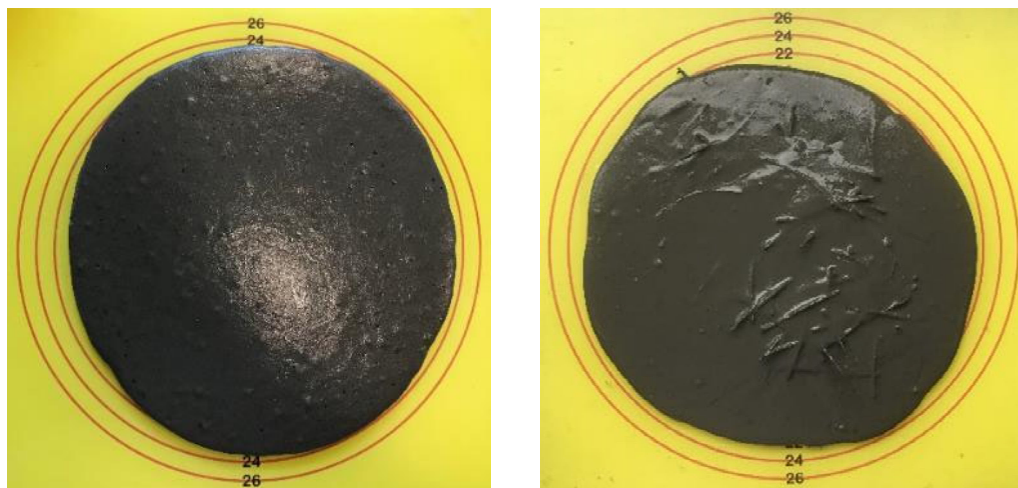
La reducción en el flujo para las mezclas dosificadas con solo macro-fibras Tuf Strand es del 13 y 38% y para las mezclas dosificadas con solo macro-fibras BarChip 48 es del 7 y

11% para contenidos de fibras del 1 y 2% en volumen respectivamente, comparado con el flujo del UHPC. Además, las fibras fibriladas como las Tuf Strand en altas dosificaciones tienden a desarrollar fibrillas que a su vez generan enlaces fuertes y reducen la dispersión, provocando segregación o sangrado en la mezcla, como se evidencia en la **Figura 5-3**. Por el contrario, las macro-fibras de polipropileno (MF2) la absorción de agua es mínima o nula debido a las características hidrófobas del material. Por lo tanto, la reducción del flujo es mínima a mayor dosificación de este tipo de macro-fibras, como se evidencia en la **Figura 5-4**.



**Figura 5-3.** Flujo estático en mezclas de UHPFRC reforzadas con solo macro-fibras de polipropileno y polietileno (MF1). A la izquierda mezcla (N5) con 1% de fibras y a la derecha mezcla (N22) con 2% de fibras en volumen.

Fuente: El autor.



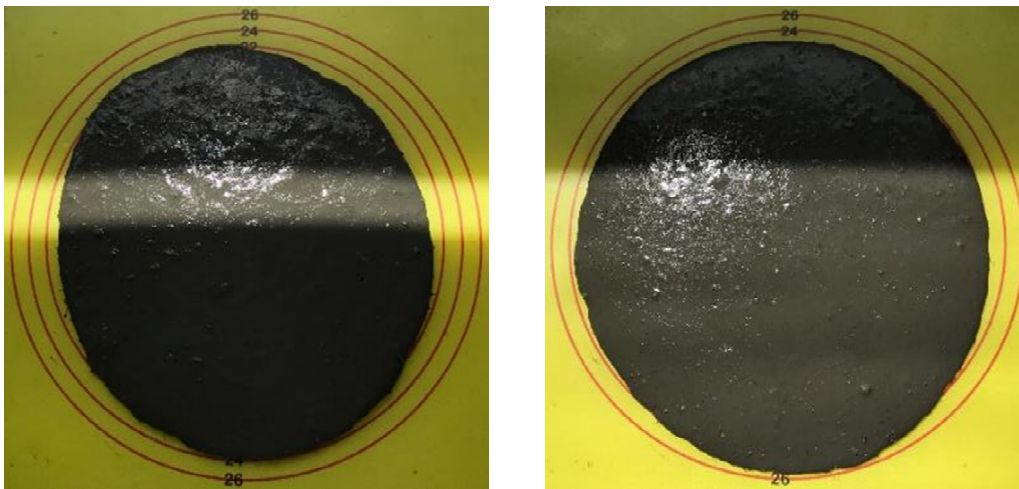
**Figura 5-4.** Flujo estático en mezclas de UHPFRC reforzadas con solo macro-fibras de polipropileno (MF2). A la izquierda mezcla (N9) con 1% de fibras y a la derecha mezcla (N26) con 2% de fibras en volumen.

Fuente: El autor.



Los resultados permitieron evidenciar que las micro-fibras poliméricas limitan o reducen el sagrado en las mezclas con macro-fibras fibriladas. Esto se debe a que las micro-fibras por un lado incrementan la viscosidad de la mezcla, y por otro crean una malla tridimensional que atrapa a la macro-fibra con la propia pasta, evitando segregaciones.

En cuanto a los resultados en la medición del flujo estático en la mezcla con dosificaciones del 1% en volumen de micro-fibras metálicas (mFOL), indican que la reducción del flujo es mínima (3%) y la trabajabilidad es similar comparada con los resultados obtenidos en la mezcla sin fibras (N0), debido a que las fibras metálicas no absorben agua. La dosificación al 2% de micro-fibras metálicas (mezcla N34), presenta una manejabilidad adecuada menor a la registrada en la mezcla con el 1%, debido a la densificación del contenido de fibras que limita el flujo en la mezcla. En la **Figura 5-5** se presenta el flujo estático con dosificaciones de micro-fibras metálicas del 1 y 2% en volumen.



**Figura 5-5.** Flujo estático en mezclas de UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas (mFOL). A la izquierda mezcla (N17) con 1% de fibras y a la derecha mezcla (N34) con 2% de fibras en volumen.

Fuente: El autor.

En resumen, el flujo en la mayoría de las mezclas con fibras poliméricas disminuye a medida que la cantidad de micro-fibras aumenta, debido a que las micro-fibras tienen mayor área expuesta, excelente dispersión en la mezcla y mayor absorción de agua por su origen hidrofílico. No obstante, en las mezclas que tienen macro-fibras fibriladas (MF2) la reducción de agua es notable, siendo en algunos casos superior al flujo de las mezclas con micro-fibras de PVA, debido a una mayor área expuesta a causa de la fibrilación de la fibra.

## 5.2 Comportamiento a flexión

Para analizar el comportamiento a flexión en el UHPFRC, como ya se mencionó, se ensayaron 3 probetas de 40 x 40 x 160 mm por cada mezcla, donde la distancia entre apoyos en la disposición del ensayo ( $L$ ) fue de 100 mm. En las probetas se determinó la resistencia a flexión de acuerdo con la norma EN-196-1. Con los resultados de los ensayos a flexión se determinó el comportamiento a flexión para todas las dosificaciones. Además, se calculó la ductilidad, tenacidad y el índice de tenacidad para las probetas que presentaron endurecimiento por deflexión. En el anexo B se presentan los resultados de cada probeta.

### 5.2.1 Resistencia a flexión

El módulo de rotura ( $f_{MOR}$ ) se determinó con la *Ecuación 4-1*, descrita en el numeral 4.9.1, donde  $P_{MOR}$  corresponde a la máxima carga aplicada a cada probeta, el valor de  $P_{MOR}$  se halla en los datos registrados por la maquina universal. La máquina asocia el desplazamiento de la prensa con los incrementos en carga; de forma análoga el LVDT localizado en la parte central de la probeta también registra la deflexión. En la **Figura 5-6** se pueden observar los dispositivos de control: el registro de la maquina universal y el LVDT.



**Figura 5-6.** Dispositivo de control y registro de la maquina universal y LVDT.  
Fuente: El autor.

Con los desplazamientos alineados se logra asociar la deflexión a cada valor de carga registrado. Luego para cada curva de carga-deflexión se procedió a interpolar linealmente

entre cada pareja de datos los resultados de la carga considerando discretizaciones en las deflexiones de 0.00001 mm. Una vez interpolados los datos de las tres probetas se calcula el promedio de los valores de carga correspondientes para cada 0.00001 mm de deflexión. El proceso de interpolación y el cálculo del promedio fue desarrollado mediante un algoritmo programado en RStudio para cada mezcla. Cabe resaltar que la deflexión asociada al límite de proporcionalidad, no siempre coincide en las tres probetas de cada mezcla, por ende, el valor de  $P_{LOP}$  o  $f_{LOP}$  indicado en la curva promedio, no corresponde al máximo en algunos casos. Esta variación puede estar asociada a movimientos o deformaciones de la máquina, a la posición de la probeta con respecto a los apoyos. También puede deberse a la orientación interna de las fibras, dado que entre mayor sea la proporción de fibras paralelas al sentido longitudinal de la probeta, la contribución a la resistencia a flexión será mayor.

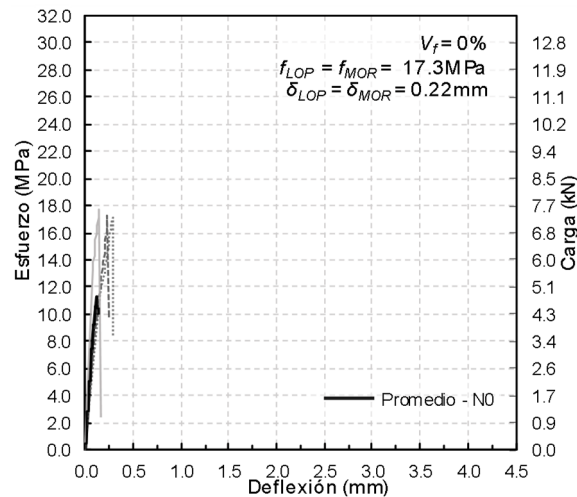
Por las razones expuestas anteriormente en cada grafica se indicó en la parte superior derecha el volumen de fibras ( $V_f$ ), la dosificación y tipo de micro-fibras (mF) y macro-fibras (MF), el promedio de límite de proporcionalidad y del módulo de rotura ( $f_{LOP}$  y  $f_{MOR}$ ) y, el promedio de las deflexiones asociadas a estas resistencias ( $\delta_{LOP}$  y  $\delta_{MOR}$ ).

Para comprender el comportamiento a flexión del UHPFRC es necesario observar el comportamiento de las probetas sin refuerzo. En la **Tabla 5-4**, se presentan los resultados de la resistencia flexión asociados al límite de proporcionalidad  $f_{LOP}$  y al módulo de rotura  $f_{MOR}$  para mezclas sin fibras (UHPC). Cabe resaltar que estas probetas presentaron falla frágil, como se podrá observar en las **Gráfica 0**, por lo tanto  $f_{LOP} = f_{MOR}$ . Para determinar la dispersión de los resultados se determinó la desviación estándar ( $SD_M$ ) de las 3 probetas. Adicionalmente, se presentan las relaciones ( $r$ ) entre los resultados obtenidos y los resultados de las probetas de UHPC.

**Tabla 5-4.** Resultados de la resistencia a flexión en las probetas de UHPC, mezcla N0.

MEZCLA		FLEXIÓN			DEFLEXIÓN		
ID	$V_f$	$f_{MOR}$ (MPa)	$SD_M$ (%)	$r$ (%)	$\delta_{MOR}$ (mm)	$SD_M$ (%)	$r$ (%)
N0	0%	17.33	1.7%	0%	0.22	30.8%	0%





**Gráfica 0.** Flexión en probetas N0.

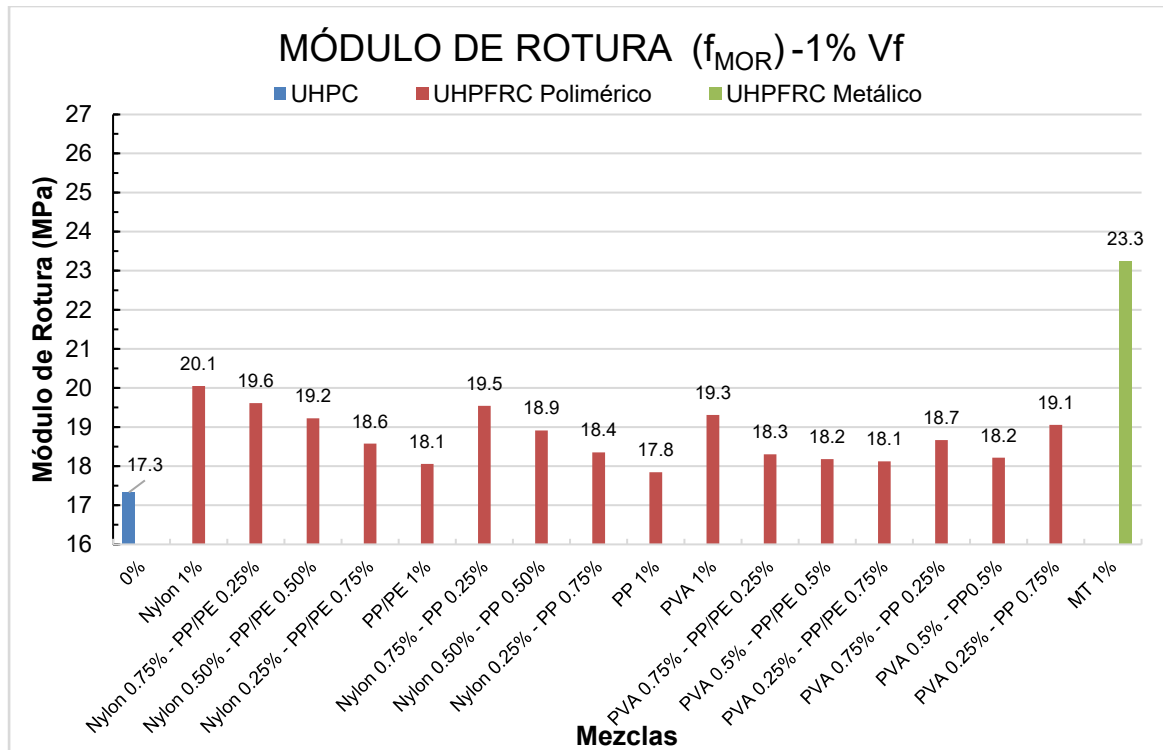
El comportamiento a flexión en las probetas sin refuerzo está asociado con fallas frágiles, como era de esperarse. El módulo de rotura de las probetas de UHPC ( $f_{MOR} = 18.2 \text{ MPa}$ ) está en el promedio de las resistencias evidenciadas por otros investigadores como (Vaitkevičius et al., 2014), (Yu et al., 2015), (Wu et al., 2016), entre otros, para especímenes con las mismas dimensiones y ensayados a flexión en 3 puntos, como se podrá observar en la **Tabla 5-7**. Además, el módulo de rotura del UHPC es 6 veces superior al de un concreto convencional con  $f'c = 21 \text{ MPa}$ , sabiendo que el módulo de rotura establecido por la NSR-10 para un concreto convencional y de peso normal es igual a  $f_r = 0.62\sqrt{f'c}$  (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 1997). El incremento en el módulo de rotura se debe al excelente empaquetamiento de partículas típico del UHPC y, a las reacciones puzolánicas del humo de sílice e incluso del polvo de vidrio que generan mayor cantidad de partículas de silicato de calcio hidratado (CSH), lo que permite que se incremente la densidad de la matriz y a su vez las propiedades mecánicas.

En la **Tabla 5-5**, **Ilustración 5-3** e **Ilustración 5-4**, se presentan los resultados de la resistencia a la flexión asociados al límite de proporcionalidad  $f_{LOP}$  y al módulo de rotura  $f_{MOR}$  para mezclas con contenidos del 1% en volumen de fibras. Cabe resaltar que las probetas reforzadas con fibras poliméricas no presentaron endurecimiento por deflexión, como se podrá observar en las **Gráficas N1 a N16**, por lo tanto  $f_{LOP} = f_{MOR}$ . En cambio, las probetas reforzadas con 1% de micro-fibras metálicas presentaron endurecimiento por deflexión, como se podrá observar en la **Gráfica N17**. Para determinar la dispersión de los resultados se determinó la desviación estándar ( $SD_M$ ) de las 3 probetas. Adicionalmente, se

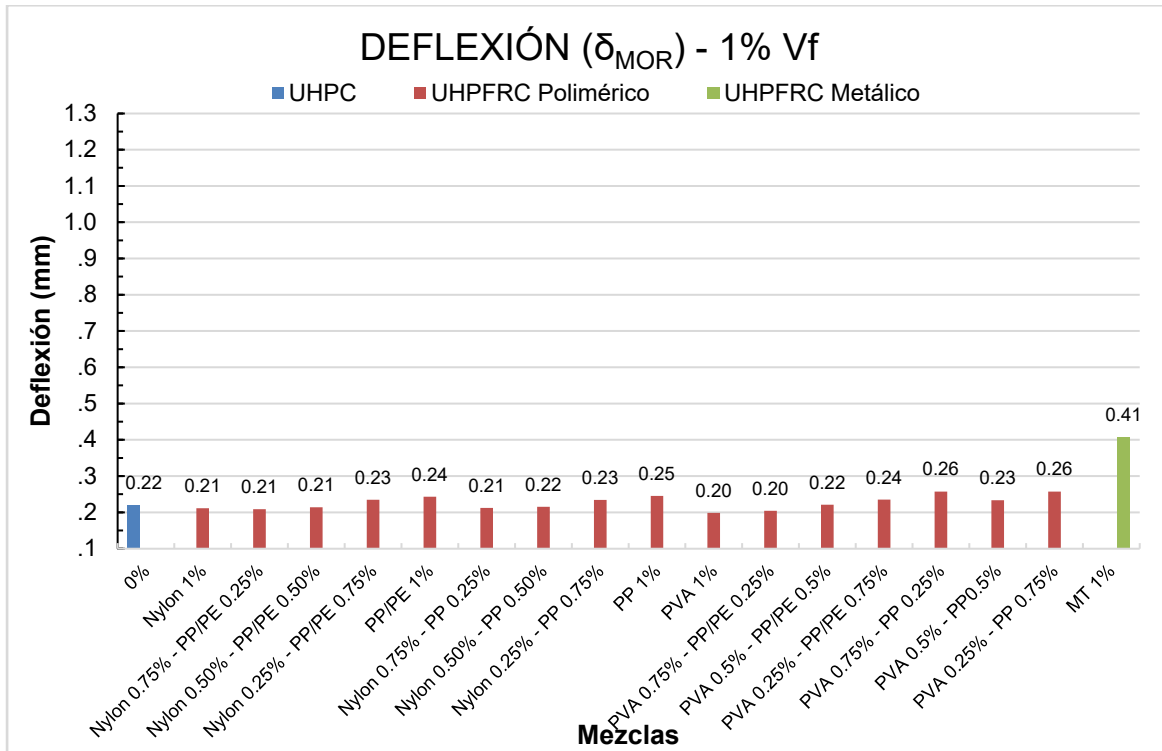
determinaron las relaciones ( $r$ ) entre los resultados obtenidos por las probetas de UHPFRC y los obtenidos por las probetas de UHPC.

**Tabla 5-5. Resultados de la resistencia a flexión en probetas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 1% en volumen.**

MEZCLA	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - Vf					LOP						LOP = MOR					
						FLEXIÓN			DEFLEXIÓN			FLEXIÓN			DEFLEXIÓN		
	Nylon	PVA	PP/PE	PP	MT	$f_{LOP}$	$SD_M$	$r$	$\delta_{LOP}$	$SD_M$	$r$	$f_{MOR}$	$SD_M$	$r$	$\delta_{MOR}$	$SD_M$	$r$
mF1	mF2	MF1	MF2	mFOL	(MPa)	(%)	(%)	(mm)	(%)	(%)	(MPa)	(%)	(%)	(mm)	(%)	(%)	
N1	1.00%											20.1	4.2%	16%	0.21	8.7%	-4%
N2	0.75%		0.25%									19.6	7.5%	13%	0.21	2.2%	-5%
N3	0.50%		0.50%									19.2	1.2%	11%	0.21	6.0%	-3%
N4	0.25%		0.75%									18.6	2.4%	7%	0.23	4.3%	6%
N5			1.00%									18.1	3.8%	4%	0.24	19.5%	10%
N6	0.75%			0.25%								19.5	4.4%	13%	0.21	9.6%	-4%
N7	0.50%			0.50%								18.9	11.8%	9%	0.22	2.7%	-2%
N8	0.25%			0.75%								18.4	2.5%	6%	0.23	4.0%	6%
N9				1.00%								17.8	8.8%	3%	0.25	21.6%	11%
N10		1.00%										19.3	7.8%	11%	0.20	23.1%	-10%
N11		0.75%	0.25%									18.3	1.1%	6%	0.20	1.7%	-7%
N12		0.50%	0.50%									18.2	1.2%	5%	0.22	7.4%	0%
N13		0.25%	0.75%									18.1	1.7%	5%	0.24	5.8%	7%
N14		0.75%		0.25%								18.7	4.5%	8%	0.26	4.3%	17%
N15		0.50%		0.50%								18.2	4.8%	5%	0.23	18.2%	6%
N16		0.25%		0.75%								19.1	4.2%	10%	0.26	8.9%	17%
N17					1.00%	20.4	5.1%	18%	0.25	9.7%	11%	23.3	3.7%	34%	0.4	27.5%	84%



**Ilustración 5-3. Resultados del módulo de rotura en las probetas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 1% en volumen.**



**Ilustración 5-4.** Resultados de la deflexión asociada al módulo de rotura en las probetas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 1% en volumen.

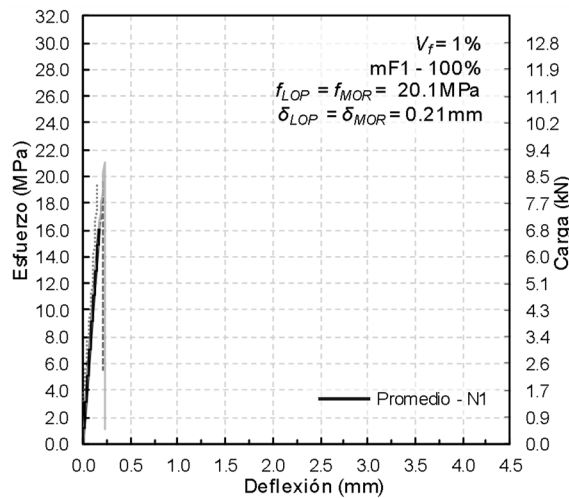
En general las probetas reforzadas con 1% de fibras poliméricas por volumen son un 3 a 16% más dúctiles que las probetas de UHPC. En general el módulo de rotura aumenta en las probetas con altas dosificaciones de micro-fibras y disminuye en las probetas con altas dosificaciones de macro-fibras. Este comportamiento en los resultados es similares a los evidenciados por (O’Connell, 2011) en FRC para el módulo de rotura.

Sin embargo, la deflexión asociada al módulo de rotura ( $\delta_{MOR}$ ) no aumenta en todas las probetas reforzadas fibras poliméricas. La deflexión aumenta en las probetas reforzadas con altas dosificaciones de macro-fibras, el incremento fue hasta en un 17%. En sentido contrario, las deflexiones disminuyen en las dosificaciones con altos contenidos de micro-fibras, incluso en algunos casos disminuyen hasta en un 10% con respecto a la deflexión máxima del UHPC. Este comportamiento podría indicar que las micro-fibras poliméricas aumentan la rigidez del UHPFRC cuando son dosificadas en altas proporciones.

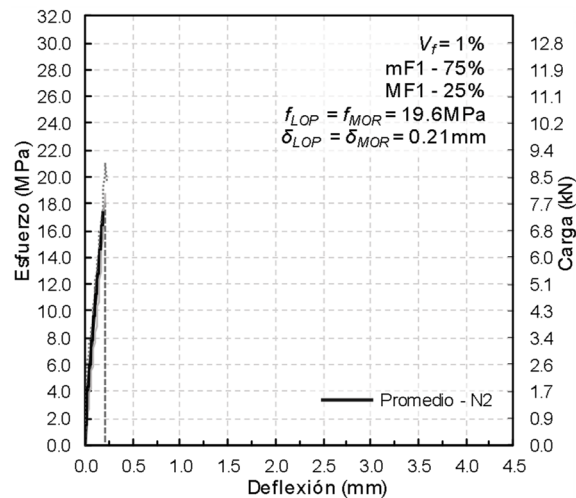
Los resultados también indican que la resistencia a flexión en todas las probetas reforzadas con 1% de fibras poliméricas en volumen, presentan falla frágil o reblandecimiento por

deflexión, es decir, no pueden soportar un esfuerzo mayor al esfuerzo de fisuración. Esto debido a que la probeta libera la carga y la absorbe como una gran deflexión repentina (el pistón de la maquina universal libera igualmente la carga), pero la probeta no colapsa, continúa soportando cada vez menos carga a medida que la deflexión aumenta. El nivel de carga no se puede elevar porque se transforma principalmente en deformación hasta que la probeta colapsa. Por ende, el  $f_{LOP}$  y  $f_{MOR}$  son iguales, como se puede apreciar en las **Gráficas 1 a 16**.

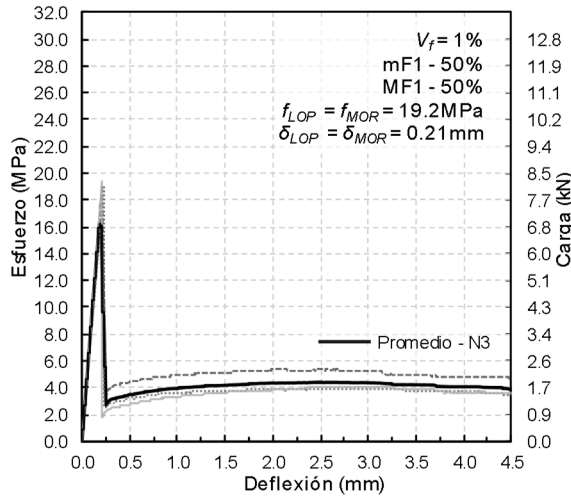
La falla frágil en las probetas tiende a presentarse con dosificaciones del 0.75 al 1% de micro-fibras en volumen como se ilustra en las **Gráficas 1, 2, 6, 10, 11 y 14**. Las demás graficas con volumen de fibras poliméricas del 1% desarrollan reblandecimiento por deflexión. En la **Gráfica 17** se puede apreciar el comportamiento a flexión denominado endurecimiento por deflexión desarrollado por las probetas de UHPFRC reforzadas con 1% de micro-fibras metálicas en volumen.



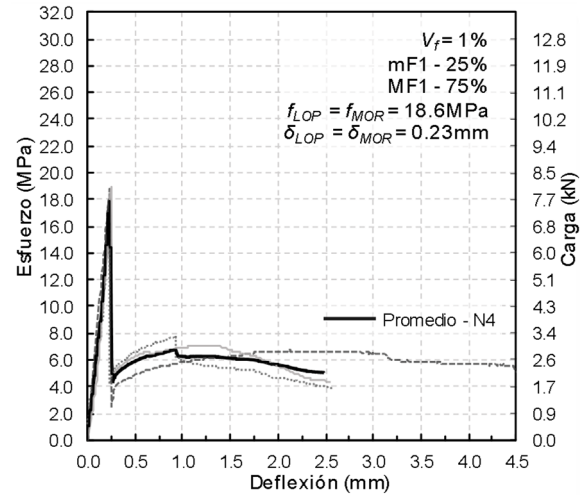
**Gráfica 1.** Flexión en probetas N1.



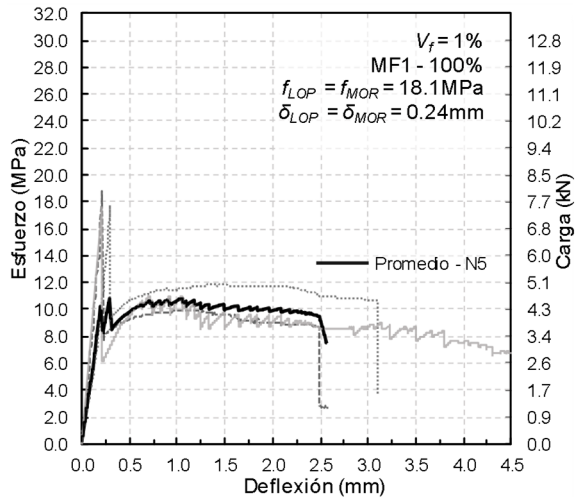
**Gráfica 2.** Flexión en probetas N2.



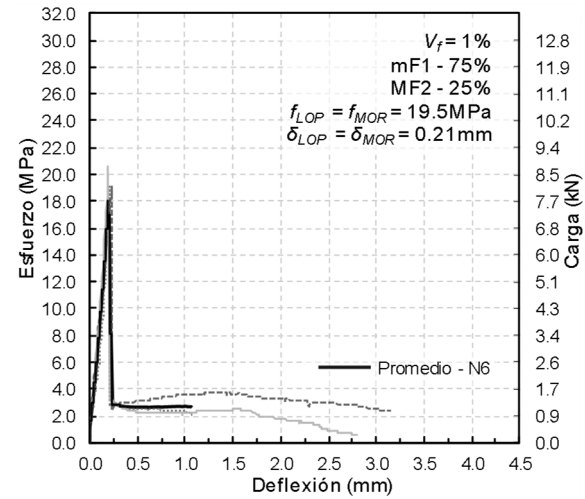
Gráfica 3. Flexión en probetas N3.



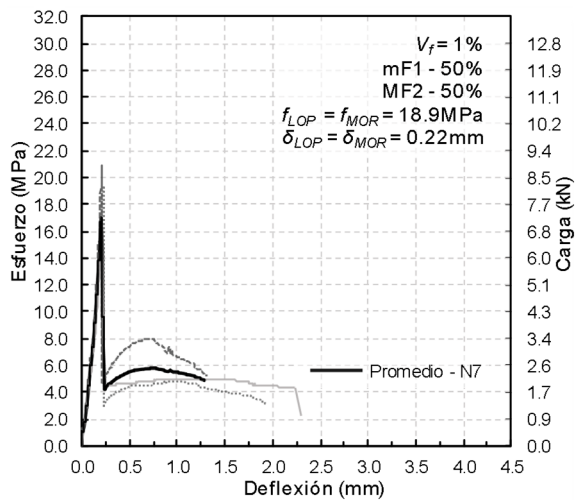
Gráfica 4. Flexión en probetas N4.



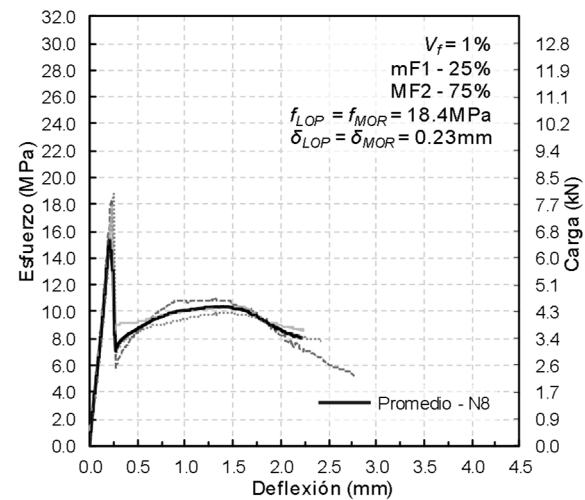
Gráfica 5. Flexión en probetas N5.



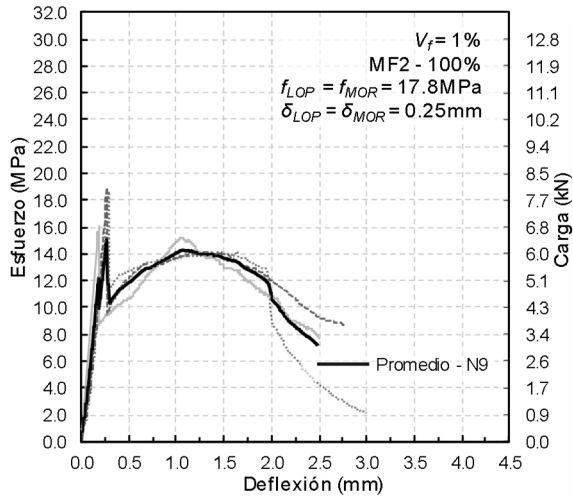
Gráfica 6. Flexión en probetas N6.



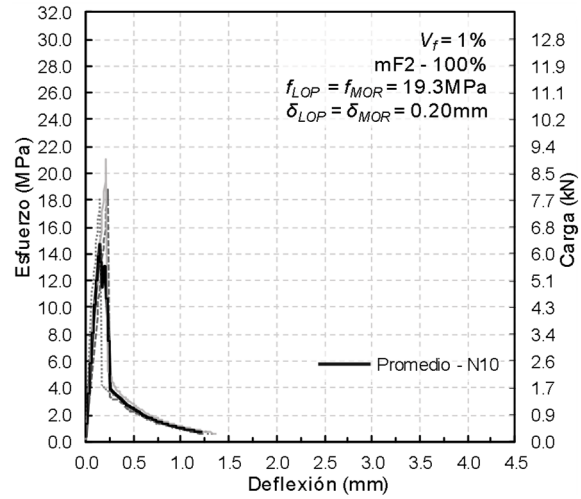
Gráfica 7. Flexión en probetas N7.



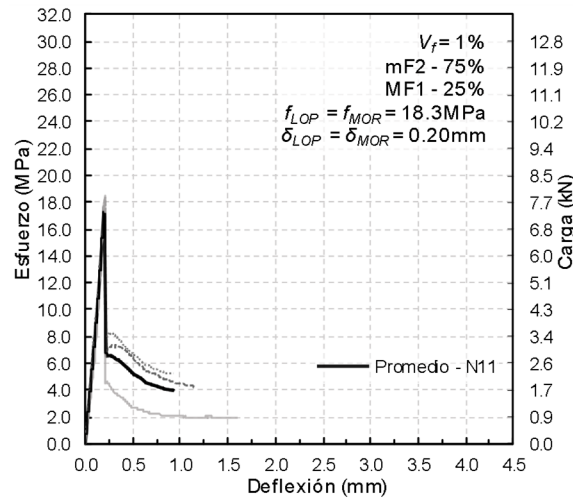
Gráfica 8. Flexión en probetas N8.



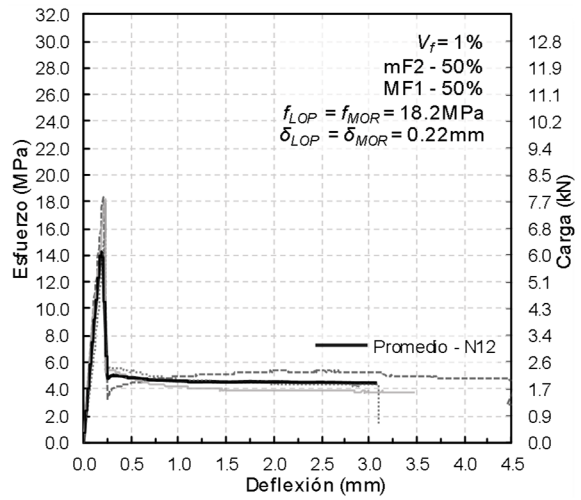
Gráfica 9. Flexión en probetas N9.



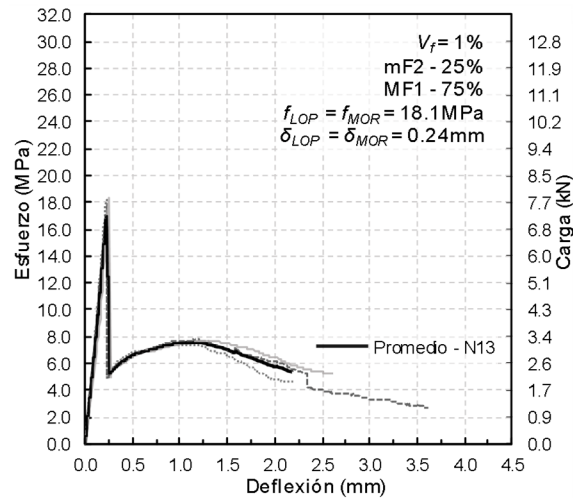
Gráfica 10. Flexión en probetas N10.



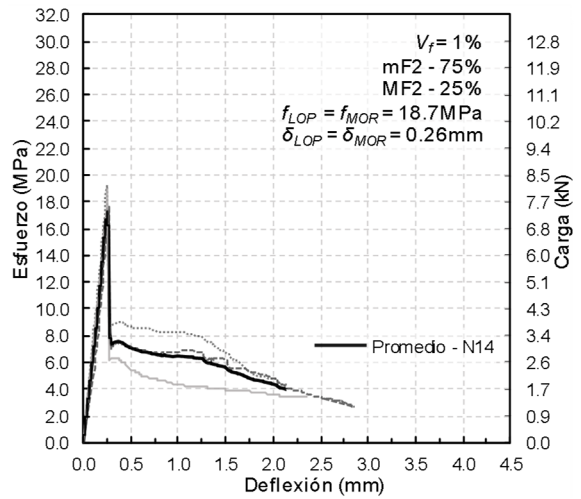
Gráfica 11. Flexión en probetas N11.



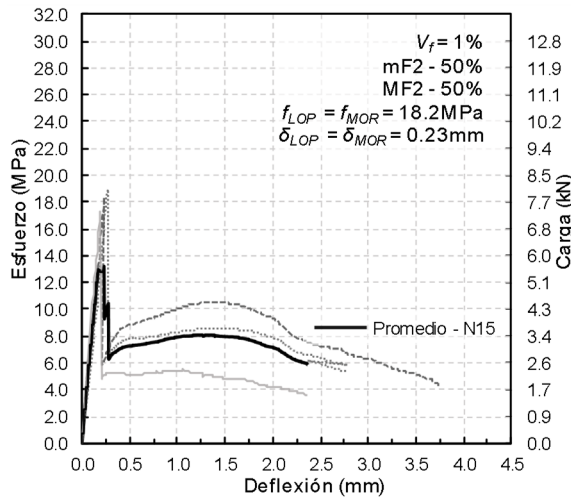
Gráfica 12. Flexión en probetas N12.



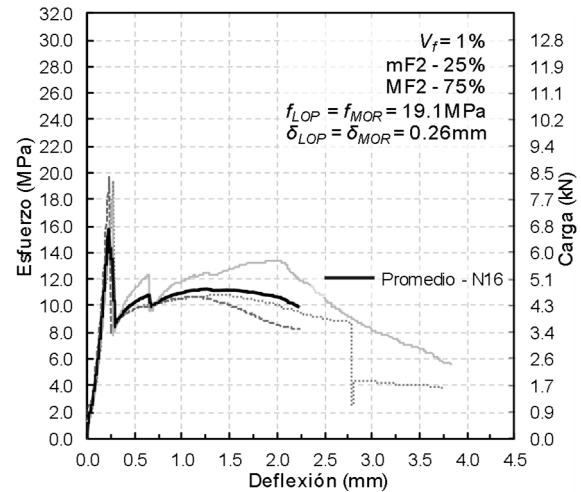
Gráfica 13. Flexión en probetas N13.



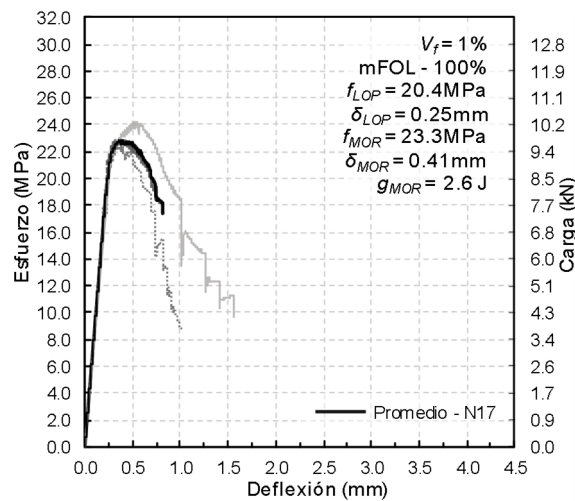
Gráfica 14. Flexión en probetas N14.



Gráfica 15. Flexión en probetas N15.



Gráfica 16. Flexión en probetas N16.



Gráfica 17. Flexión en probetas N17.

Tanto en los resultados como en las gráficas se puede apreciar que las probetas con 1% de fibras por volumen, dosificadas con micro-fibras de nylon y macro-fibras fibriladas (mezclas N1 a N5) presentan mayor módulo de rotura en comparación a las demás combinaciones con iguales proporciones de micro y macro fibras. El incremento en resistencia puede estar relacionado con el curado interno que desarrollan estas fibras al UHPFRC. El agua absorbida por las micro-fibras de nylon y por las fibrillas de la macro-fibra es liberada durante el fraguado del concreto, esta hidratación puede mejorar las propiedades mecánicas del material entre ellas: la adherencia de la fibra con la matriz, el límite de proporcionalidad y la compresión del UHPFRC como se podrá observar en el numeral 5.3.



Caso contrario ocurre con las mezclas con menos absorción de agua, es decir, mezclas con micro-fibras de PVA y macro-fibras de polipropileno (mezclas N10, N14 a N16). No obstante, estas mezclas presentaron mejor trabajabilidad. Esta disminución en la resistencia puede estar asociada al recubrimiento del agente lubricante que presenta la micro-fibra de PVA, pese a que el recubrimiento es favorable para la fibra no rompa antes de salir de la matriz, a su vez restringe la absorción de agua a la fibra y las macro-fibras de polipropileno son hidrófobas. Por lo tanto, el curado interno que puede proporcionar la micro-fibra de PVA y el PP al UHPFRC es reducido en comparación al proporcionado por la micro-fibra de nylon y PP/PE. De modo que las propiedades mecánicas del UHPFRC tanto a flexión como a compresión no puedan ser superiores a las presentadas por las micro-fibras de nylon que logran desarrollar un curado interno y posiblemente mejorar la interface pasta fibra.

También se puede apreciar en las gráficas que entre mayor es el contenido de macro-fibras poliméricas, el módulo de rotura disminuye. No obstante, estas fibras permiten soportar mayor carga residual post-fisuración en comparación a la carga residual post-fisuración soportada por las probetas con altas dosificaciones de micro-fibra. Esto se debe a que las probetas con altos contenidos de macro-fibras poliméricas presentan un comportamiento a flexión denominado reblandecimiento por deflexión y las probetas con altas dosis de micro-fibras presentan falla frágil.

En general las probetas de UHPFRC reforzadas con 0.75 o 1% de macro-fibras de polipropileno presentan un comportamiento a flexión sobresaliente sobre las demás mezclas con 1% de fibras en volumen. Esto puede estar asociado a la forma, rigidez y longitud de la macro-fibra que le permite orientarse fácilmente en la dirección longitudinal de la probeta y, por ende, mayor cantidad de fibras alineadas en la dirección del esfuerzo de tensión genera mayor resistencia a la extracción de la matriz. En cuanto a la deflexión asociada al módulo de rotura en las probetas de UHPFRC reforzadas con 1% de fibras poliméricas en volumen, es similar a la deflexión de las probetas sin refuerzo (UHPC) de aproximadamente  $L/400$ .

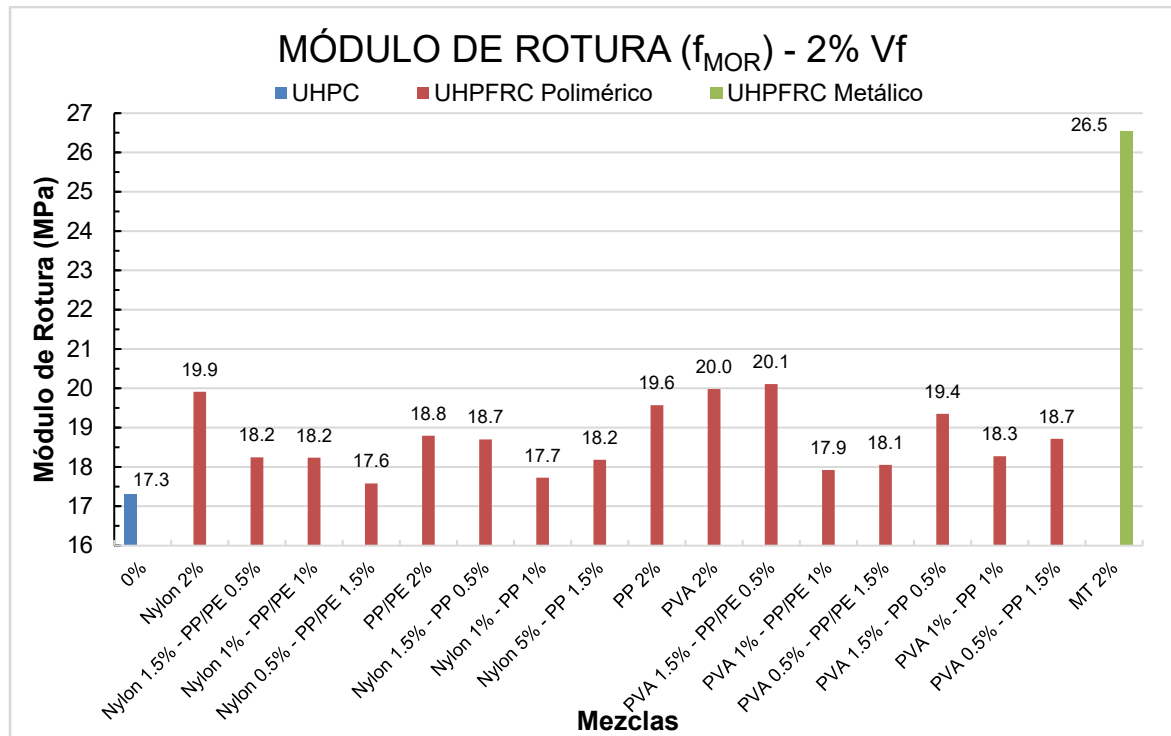
En la **Tabla 5-6**, **Ilustración 5-5** e **Ilustración 5-6** se presentan los resultados de la resistencia a flexión y deflexión asociados al límite de proporcionalidad  $f_{LOP}$  y al módulo de rotura  $f_{MOR}$  de las mezclas con 2% de fibras en volumen. Para determinar la dispersión de



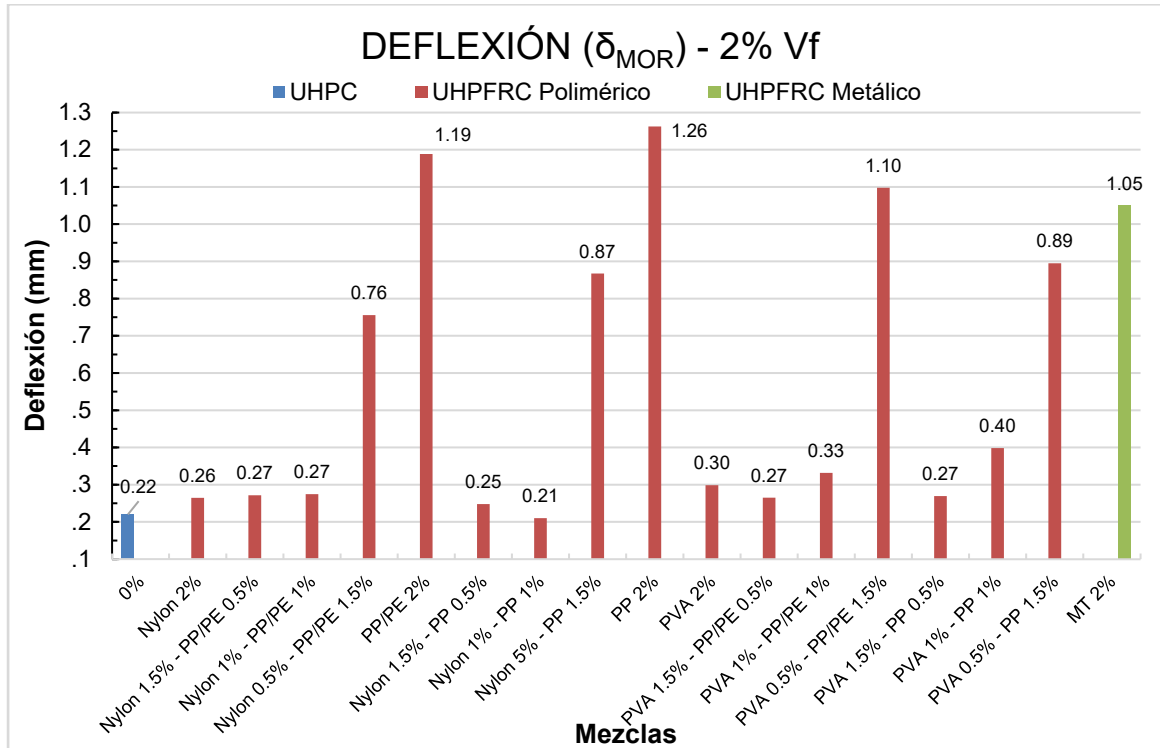
los resultados se determinó la desviación estándar ( $SD_M$ ) de las 3 probetas. Adicionalmente, se determinó la relación ( $r$ ) entre los resultados de las probetas de UHPFRC y UHPC.

**Tabla 5-6. Resultados de la resistencia a flexión en probetas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 2% en volumen.**

MEZCLA	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - Vf					LOP						MOR					
						FLEXIÓN			DEFLEXIÓN			FLEXIÓN			DEFLEXIÓN		
	Nylon	PVA	PP/PE	PP	MT	$f_{LOP}$	$SD_M$	$r$	$\delta_{LOP}$	$SD_M$	$r$	$f_{MOR}$	$SD_M$	$r$	$\delta_{MOR}$	$SD_M$	$r$
mF1	mF2	MF1	MF2	mFOL	(MPa)	(%)	(%)	(mm)	(%)	(%)	(MPa)	(%)	(%)	(mm)	(%)	(%)	
N18	2.00%											19.9	8.3%	15%	0.26	11.2%	20%
N19	1.50%		0.50%									18.2	3.2%	5%	0.27	16.0%	23%
N20	1.00%		1.00%									18.2	2.2%	5%	0.27	16.4%	25%
N21	0.50%		1.50%			17.3	3.5%	0%	0.28	17.8%	27%	17.6	2.1%	1%	0.76	5.0%	243%
N22			2.00%			17.3	9.7%	0%	0.30	3.4%	35%	18.8	1.5%	8%	1.19	5.8%	439%
N23	1.50%			0.50%								18.7	2.3%	8%	0.25	21.3%	12%
N24	1.00%			1.00%								17.7	4.9%	2%	0.21	9.7%	-5%
N25	0.50%			1.50%		17.4	7.8%	0%	0.27	25.2%	22%	18.2	9.6%	5%	0.87	55.8%	293%
N26				2.00%		17.0	4.3%	-2%	0.36	12.9%	65%	19.6	8.8%	13%	1.26	11.2%	472%
N27		2.00%										20.0	3.5%	15%	0.30	0.8%	35%
N28		1.50%	0.50%									20.1	2.5%	16%	0.27	5.4%	20%
N29		1.00%	1.00%									17.9	9.1%	3%	0.33	6.7%	50%
N30		0.50%	1.50%			17.4	3.8%	1%	0.34	6.5%	56%	18.1	2.2%	4%	1.10	15.9%	398%
N31		1.50%		0.50%								19.4	1.8%	12%	0.27	4.2%	22%
N32		1.00%		1.00%		17.2	0.3%	-1%	0.29	3.5%	32%	18.3	4.6%	5%	0.40	2.5%	81%
N33		0.50%		1.50%		17.6	2.9%	1%	0.32	9.7%	44%	18.7	3.4%	8%	0.89	46.4%	306%
N34					2.00%	22.6	10.9%	30%	0.31	11.4%	41%	26.5	16.4%	53%	1.0	22.2%	376%



**Ilustración 5-5. Resultados del módulo de rotura en las probetas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 2% en volumen.**



**Ilustración 5-6.** Resultados de la deflexión asociada al módulo de rotura en las probetas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 2% en volumen.

A diferencia de las mezclas con dosificaciones con 1% de fibras en volumen, algunas mezclas dosificadas al 2% con fibras poliméricas lograron desarrollar endurecimiento por deflexión, mientras que el resto presentaron reblandecimiento por deflexión y ninguna presentó falla frágil, como se puede apreciar en las **Gráficas 18** a la **33**.

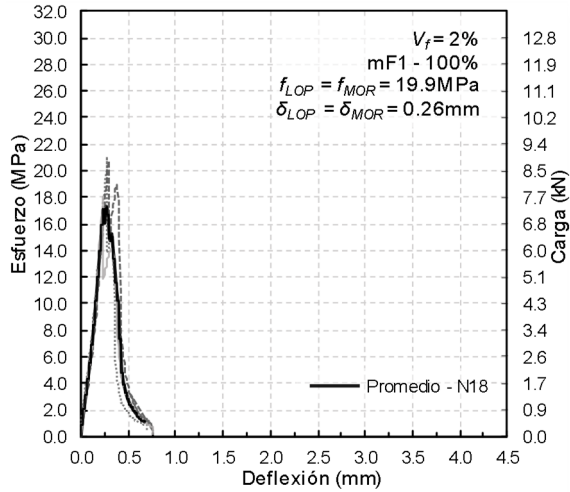
Las combinaciones con contenidos de macro-fibras en volumen superiores o iguales a 1.5% lograron absorber energía, como se ilustra en las **Gráficas 21, 22, 25, 26, 30** y **33**. Sin embargo cabe resaltar que la **Gráfica 32** fue la única que presentó endurecimiento por deflexión con 1% de micro-fibras de PVA y 1% de macro-fibras de polipropileno en volumen. El incremento promedio de la resistencia a flexión entre el límite de proporcionalidad  $f_{LOP}$  y el módulo de rotura  $f_{MOR}$  en las probetas que presentaron endurecimiento por deflexión fue de 6.5%. Las probetas que presentaron reblandecimiento por deflexión fueron: N18 a N20, N23, N24, N27 a N29 y N31. En estas probetas límite de proporcionalidad fue igual al módulo de rotura, por lo tanto  $f_{LOP} = f_{MOR}$ .

El módulo de rotura de las probetas de UHPFRC reforzadas con 2% de fibras poliméricas y que presentaron reblandecimiento por deflexión, fue superior entre el 3 al 16%, con respecto al módulo de rotura de las probetas de UHPC, este incremento fue similar al obtenido por las probetas con 1% de fibras por volumen.

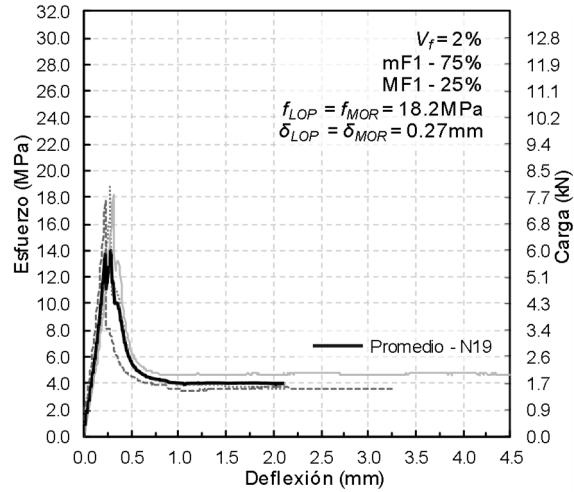
Para las probetas reforzadas con fibras poliméricas y que presentaron endurecimiento por deflexión, el límite de proporcionalidad alcanzado fue deficiente, incluso siendo menor en algunos casos al límite de proporcionalidad de las probetas de UHPC, pero el módulo de rotura fue superior entre 1 y 13% con respecto al módulo de rotura de las probetas de UHPC. No obstante, este incremento en resistencia no fue superior al módulo de rotura de otras probetas con 1 y 2% de fibras en volumen, mezclas N1 y N28.

Estos resultados podrían estar asociados a la óptima ITZ que desarrolla la matriz sobre la micro-fibra. La adherencia de la matriz con la micro-fibra es mejor que la adherencia con las macro-fibras, debido a que entre menor sea el tamaño de la fibra la transmisión de esfuerzos de la matriz a la fibra será más eficiente, estos resultados corroboran las investigaciones desarrolladas por (Li et al., 1990) y (O'Connell, 2011). Donde concluyen que entre mayor es el contenido de fibras la probabilidad de traslapos o contactos directos entre las fibras aumenta, debilitando la matriz en estas micro zonas, en especial en altas dosificaciones de macro-fibras. Cabe resaltar que el diámetro de las macro-fibras es 31 veces mayor que el diámetro de las micro-fibras.

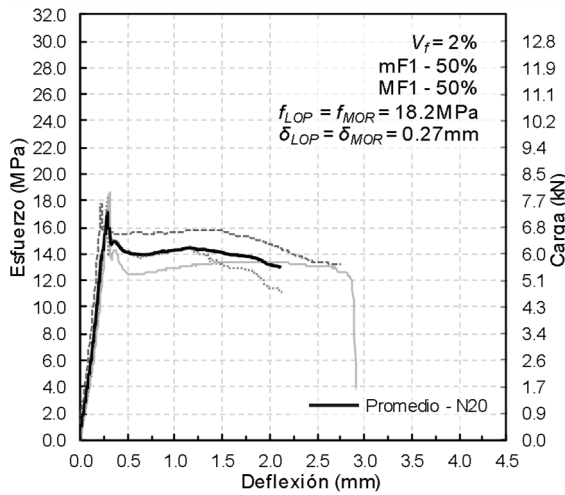
En cuanto a las deflexiones, los resultados permiten evidenciar que el comportamiento de las probetas reforzadas con 2% de fibras poliméricas fue mejor que el evidenciado por las probetas reforzadas con 1% de fibras poliméricas en volumen. La deflexión promedio en las probetas que presentaron reblandecimiento por deflexión fue 23% superior a la deflexión de las probetas de UHPC. Asimismo, para las probetas que presentaron endurecimiento por deflexión la deflexión promedio asociada al límite de proporcionalidad y al módulo de rotura fue 40 y 319% respectivamente, superior a la deflexión máxima de las probetas de UHPC.



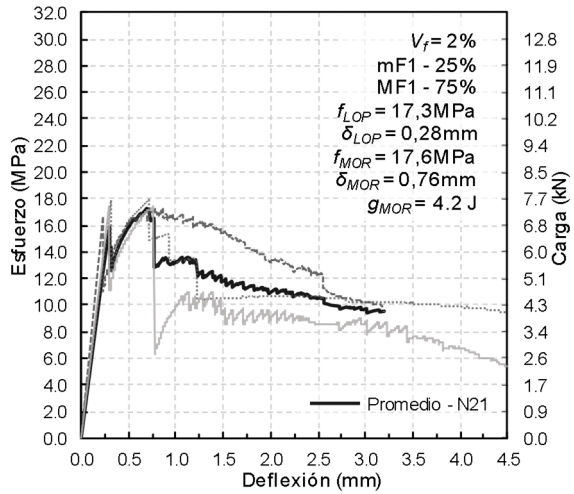
Gráfica 18. Flexión en probetas N18.



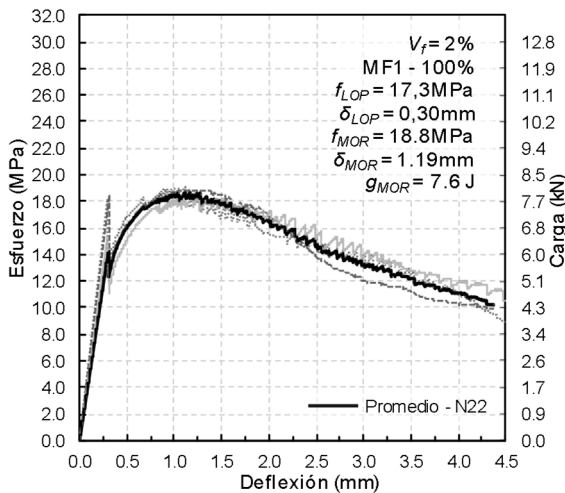
Gráfica 19. Flexión en probetas N19.



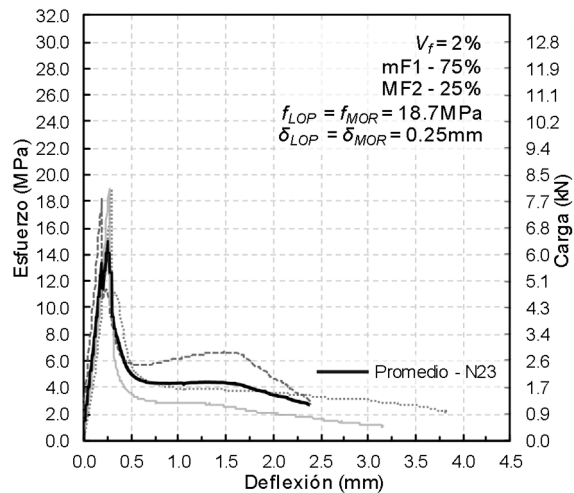
Gráfica 20. Flexión en probetas N20.



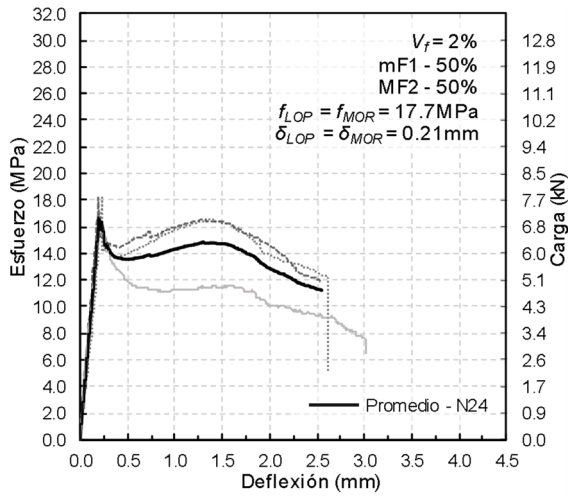
Gráfica 21. Flexión en probetas N21.



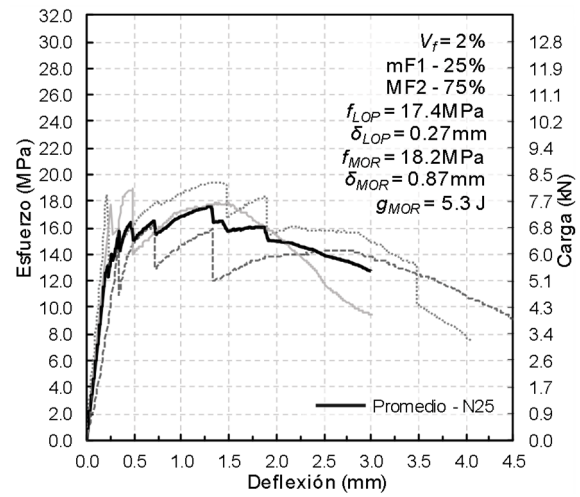
Gráfica 22. Flexión en probetas N22.



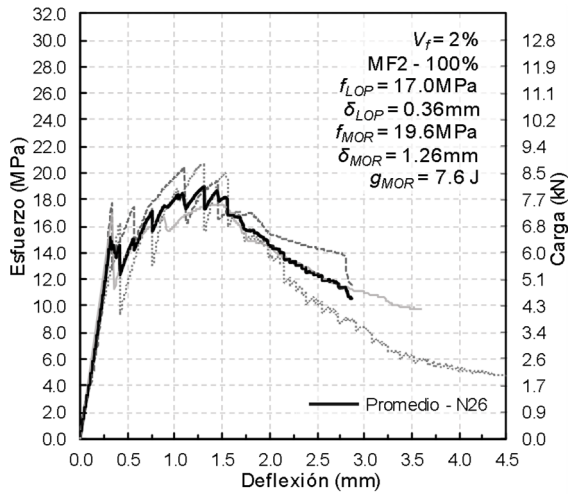
Gráfica 23. Flexión en probetas N23.



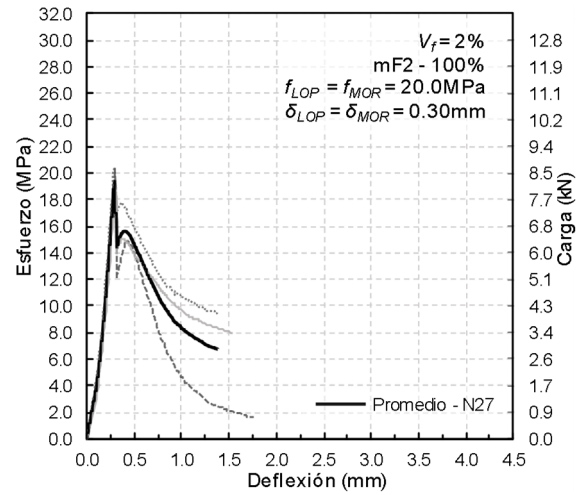
Gráfica 24. Flexión en probetas N24.



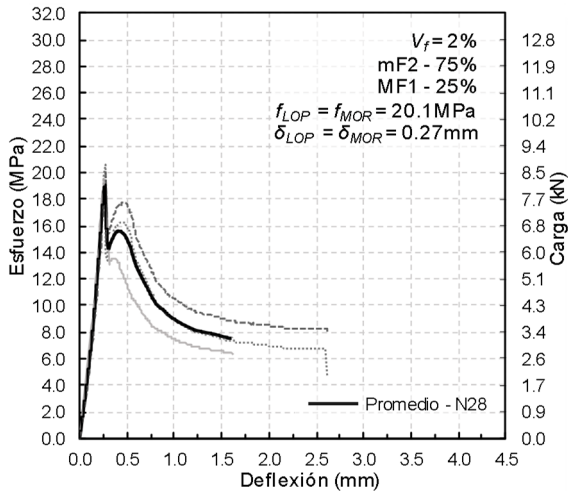
Gráfica 25. Flexión en probetas N25.



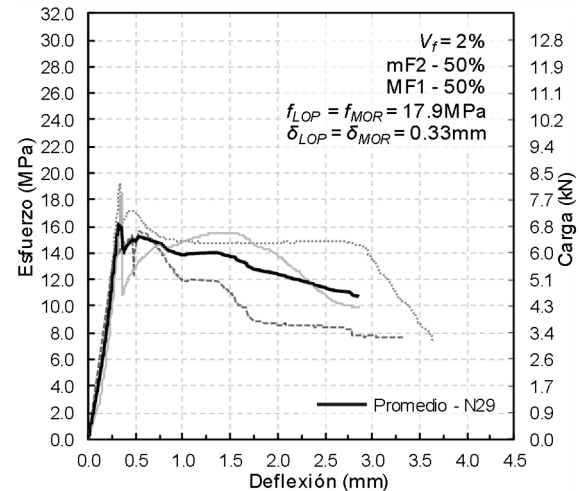
Gráfica 26. Flexión en probetas N26.



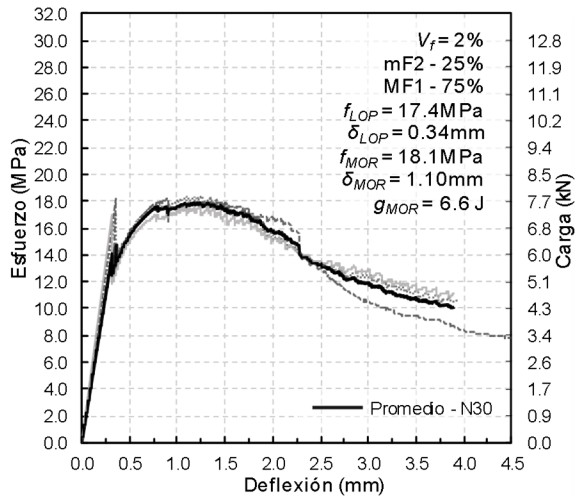
Gráfica 27. Flexión en probetas N27.



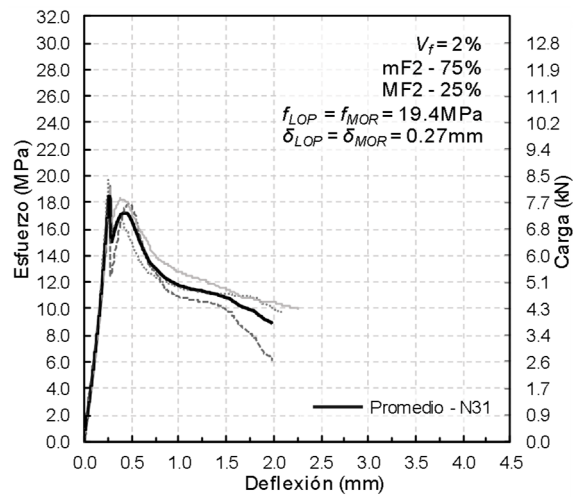
Gráfica 28. Flexión en probetas N28.



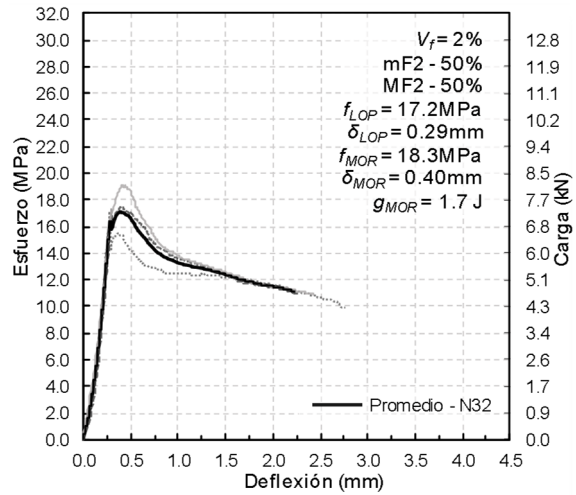
Gráfica 29. Flexión en probetas N29.



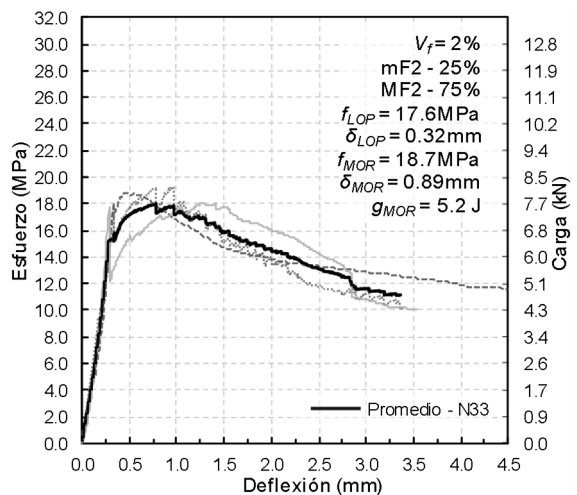
Gráfica 30. Flexión en probetas N30.



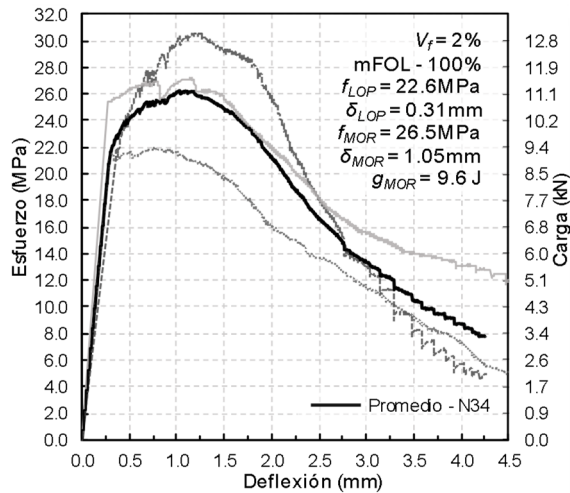
Gráfica 31. Flexión en probetas N31.



Gráfica 32. Flexión en probetas N32.



Gráfica 33. Flexión en probetas N33.



Gráfica 34. Flexión en probetas N34.

En resumen, los resultados y las gráficas indican que el módulo de rotura ( $f_{MOR}$ ), para la mayoría de las probetas reforzadas con fibras poliméricas al 1 y 2% en volumen, es superior al módulo de rotura de las probetas de UHPC. El incremento promedio en resistencia es 8% y 5% respectivamente. En cuanto al módulo de rotura de las probetas con 2% de fibras por volumen y que presentaron endurecimiento por deflexión el incremento promedio de la resistencia fue del 6%.

La deflexión máxima asociada al módulo de rotura se presentó en las probetas reforzadas con 2% de macro-fibras de polipropileno en volumen, con un incremento del 472%, con respecto a la deflexión de las probetas de UHPC. Esta deflexión es aproximadamente de L/79 casi cuatro veces la deflexión asociada al módulo de rotura del UHPC.

En cuanto a la máxima resistencia a flexión, se presentó en las probetas N34 reforzadas con 2% de micro-fibras metálicas en volumen. Cabe resaltar que ninguna de las mezclas reforzadas con fibras poliméricas desarrollo una resistencia similar ( $f_{MOR} = 26.5 MPa$ ). Sin embargo, el límite de proporcionalidad de la mezcla N17 reforzada con 1% de micro-fibras metálicas, es similar al módulo de rotura de las probetas reforzadas solo con micro-fibras de nylon y PVA al 1% en volumen (mezclas N1 y N10). Esto reitera que el contenido de micro-fibras tiene alta incidencia con la resistencia del UHPFRC en su comportamiento elástico, antes de presentar fisuración. La deflexión asociada al límite de proporcionalidad de la mezcla (N17), está en el rango entre la deflexión evidenciada en las probetas reforzadas con 1 y 2% de fibras poliméricas.

Las probetas con 2% de fibras poliméricas en volumen y que presentaron reblandecimiento por deflexión, tienen un mejor comportamiento que las probetas reforzadas con 1% de fibras poliméricas en volumen, debido a entre mayor es el contenido de fibras la carga residual post-fisuración aumenta.

En la **Figura 5-7** se puede apreciar una de las probetas reforzadas con 2% de fibras poliméricas que presentó endurecimiento por deflexión y múltiples fisuras, mezcla N25.





**Figura 5-7.** Probeta de UHPFRC reforzada con 0.5% de micro-fibras de nylon y 1.5% de macro-fibras de polipropileno en volumen. Probeta con endurecimiento por deflexión y con múltiple fisuración.  
Fuente: El autor.



### 5.2.2 Comparación de resultados a flexión

Como se pudo apreciar en el estado del arte se presentó una recopilación de los resultados obtenidos por algunas investigaciones relacionadas con UHPFRC en las cuales se determinó la resistencia a flexión y compresión. La mayoría de los estudios reforzaron sus especímenes de prueba con micro-fibras de acero de alta resistencia, fibras OL13/0.20, idénticas a las adoptadas en esta investigación, por lo tanto, la comparación de resultados es válida para los resultados obtenidos por las probetas de UHPC y UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas. En la **Tabla 5-7** se presenta la comparación de resultados obtenidos por las probetas UHPC y UHPFRC con micro-fibras metálicas con respecto a los resultados de otras investigaciones con probetas de igual tamaño (40 x 40 x 160 mm). Fueron resaltados los resultados en los cuales el volumen de fibras fue igual a los adoptados en la presente investigación.

**Tabla 5-7. Comparación de resultados a flexión entre probetas de UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas**

RESULTADOS A FLEXIÓN						COMPARACIÓN					
Fibra	Tipo	Ensayo a $V_f$ flexión	$V_f$ %	$f_{MOR}$ (MPa)	Referencia	Mezcla	$V_f$ %	$f_{MOR}$ (MPa)	$r$ %		
-	Sin fibras	3 Puntos	0.0	11.6	14.3	Yu R. et al	N0	0.0	17.3	-33%	-17%
PP04	Mono	3 Puntos	0.4	10.8	17.6	Yu R. et al	N33	1.0	23.3	-54%	-24%
SS20	Mono	3 Puntos	2.0	18.8		Yu R. et al	N34	2.0	26.5	-29%	
PP04SS20	Hibrida	3 Puntos	2.4	24.9	27.9	Yu R. et al	N34	2.0	26.5	-6%	5%
PP03SS20	Hibrida	3 Puntos	2.3	31.7		Yu R. et al	N34	2.0	26.5	20%	
-	Sin fibras	3 Puntos	0.0	19.0		Wu, Z. et al	N0	0.0	17.3	10%	
SS10	Mono	3 Puntos	1.0	21.7	26.0	Wu, Z. et al	N33	1.0	23.3	-7%	12%
SS20	Mono	3 Puntos	2.0	27.8	34.4	Wu, Z. et al	N34	2.0	26.5	5%	30%
SS30	Mono	3 Puntos	3.0	38.3	41.0	Wu, Z. et al	N34	2.0	26.5	45%	55%
-	Sin fibras	3 Puntos	0.0	27.8		Wu Z. et al	N0	0.0	17.3	61%	
SS20	Mono	3 Puntos	2.0	25.7	36.9	Wu Z. et al	N34	2.0	26.5	-3%	39%
-	Sin fibras	3 Puntos	0.0	6.7		Vaitkevicius. V. et al	N0	0.0	17.3	-61%	
SS10	Mono	3 Puntos	1.0	13.2		Vaitkevicius. V. et al	N33	1.0	23.3	-43%	
SS13	Mono	3 Puntos	1.3	23.5		Vaitkevicius. V. et al	N33	1.0	23.3	1%	
SS19	Mono	3 Puntos	1.9	36.2		Vaitkevicius. V. et al	N34	2.0	26.5	37%	
SS20	Mono	4 Puntos	2.0	25.5	29.5	Kou, S.C. et al	N34	2.0	26.5	-4%	11%
SF25	Mono	4 Puntos	2.5	31.0		Bornemann, et al	N34	2.0	26.5	17%	
SF10PVA20	Mono	4 Puntos	1.0	31.5		Bornemann, et al	N33	1.0	23.3	35%	
PVA40	Mono	4 Puntos	4.0	31.0	33	Bornemann, et al	N34	2.0	26.5	17%	25%
SF10PVA20	Hibrida	4 Puntos	3.0	42.0		Bornemann, et al	N34	2.0	26.5	58%	
SF20	Mono	4 Puntos	2.0	31.0		Bornemann, et al	N34	2.0	26.5	17%	
SS20	Mono	3 Puntos	2.0	34.0	43.0	Nguyen, E. et al	N34	2.0	26.5	28%	62%

Al comparar los resultados se puede apreciar que las probetas elaboradas para esta investigación presentan resistencias similares a las reportadas por otros investigadores. No obstante, al hacer el promedio de los módulos de rotura obtenidos en otras investigaciones para probetas sin fibras y reforzadas con 1 o 2% de micro-fibras metálicas en volumen, los resultados de los módulos de rotura obtenidos por esta investigación son superiores al promedio en 9% en las probetas de UHPC y 1% superior en las probetas de UHPFRC reforzadas con 1% de micro-fibras metálicas por volumen. En cuanto al módulo de rotura de las probetas reforzadas con 2% de fibras por volumen, la resistencia es menor un 12% respecto al promedio de las resistencias alcanzadas en otras investigaciones. En la **Tabla 5-8** se puede apreciar esta comparación.

**Tabla 5-8.** Resumen de comparación de resultados a flexión entre probetas de UHPC y UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas

RESUMEN					
OTRAS INVESTIGACIONES				AUTOR	
Fibra	$V_f$ %	$f_{MOR}$ (MPa)	$SD_M$ %	$f_{MOR}$ (MPa)	$r$ %
-	0.0	15.9	50%	17.3	9%
OL13/0.2	1.0	23.1	33%	23.3	1%
OL13/0.2	2.0	30.0	19%	26.5	-12%

Esta comparación de resultados indica que el módulo de rotura de las probetas de UHPC y UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas están dentro del promedio de los resultados obtenidos en otras investigaciones. La desviación estándar ( $SD_M$ ) es del 50%, para las probetas sin refuerzo, es decir, los resultados obtenidos por otras investigaciones difieren en gran medida, esto confirma que existen múltiples variables que pueden afectar la resistencia de la matriz de UHPC. Variables como el tipo de materiales cementantes y puzolanas utilizadas, el método de mezclado, el proceso de vaciado y compactación utilizado.

### 5.2.3 Tenacidad

El comportamiento a la flexión en concretos reforzados con fibras también se evalúa en términos de tenacidad. La tenacidad se pudo analizar en las probetas que desarrollaron un comportamiento sobresaliente a flexión, en las cuales se presentó endurecimiento por

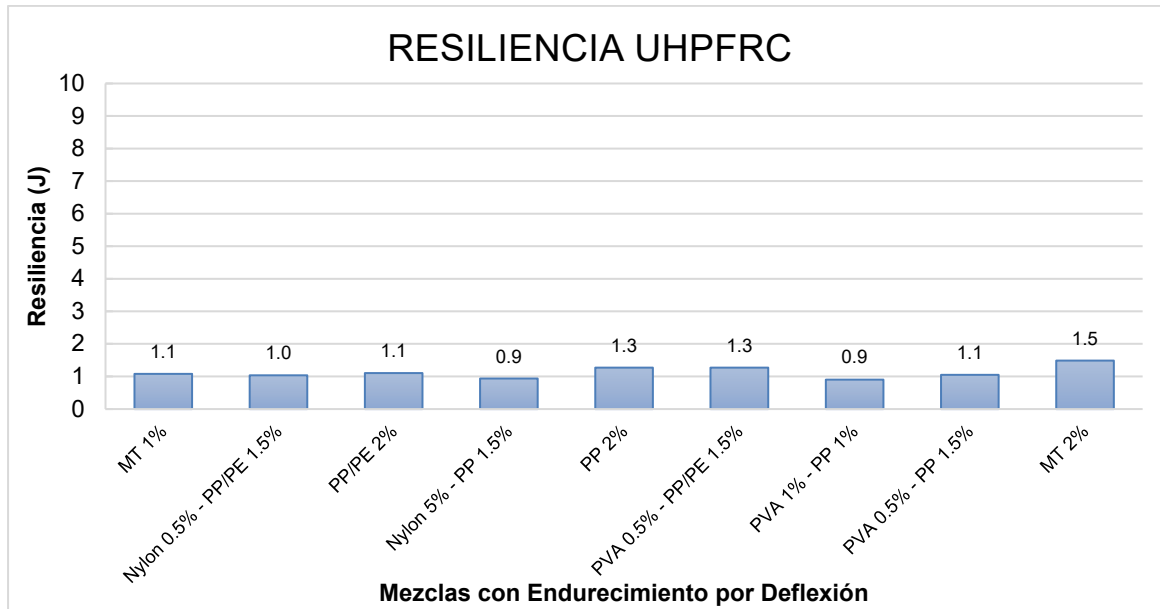
deflexión. La evaluación consistió en determinar la ductilidad y tenacidad de cada probeta de UHPFRC reforzada con fibras poliméricas y metálicas. Conocidas estas energías se estableció la relación ( $r$ ) para cada resultado (ductilidad y tenacidad) con el resultado obtenido por la dosificación N34 que corresponde a la dosificación de micro-fibras metálicas al 2% en volumen y que presentó el máximo módulo de rotura de los especímenes estudiados. Se eligió esta dosificación debido a que presentó los mejores resultados a flexión. Posteriormente, se estableció el índice de tenacidad ( $I_{MOR}$ ) producto de la relación entre la tenacidad y ductilidad de las probetas, con esta relación se evaluó el comportamiento plástico del UHPFRC.

▪ **Energía absorbida**

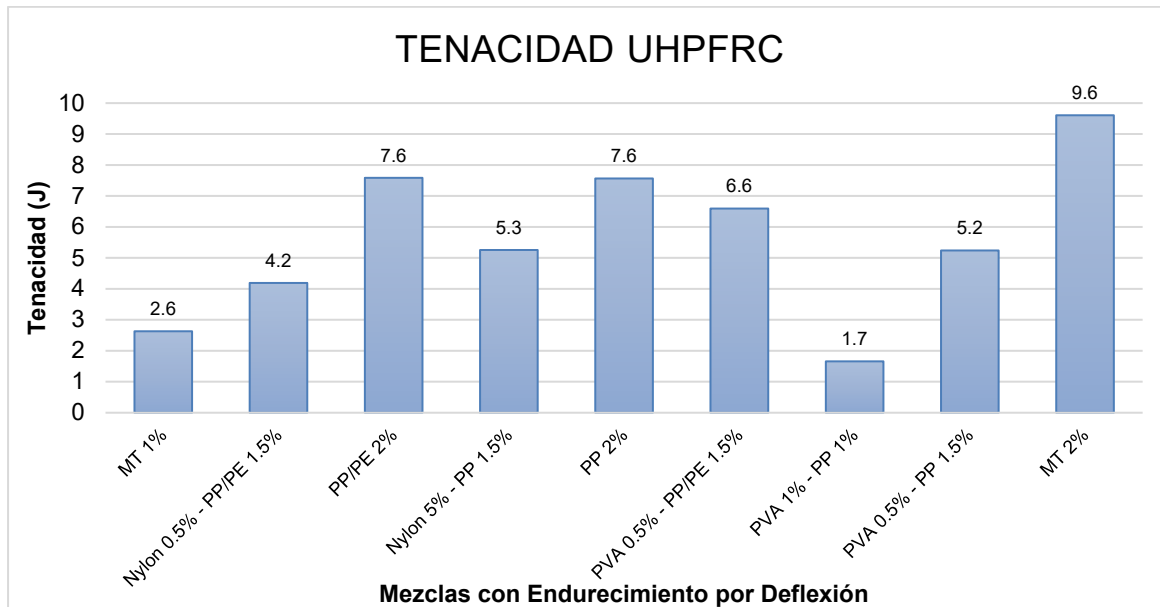
En la **Tabla 5-9**, **Ilustración 5-7** e **Ilustración 5-8** se presenta la ductilidad ( $g_{LOP}$ ) y la tenacidad o energía absorbida ( $g_{MOR}$ ) por las probetas que presentaron endurecimiento por deflexión. Para determinar la dispersión de los resultados se determinó la desviación estándar ( $SD_M$ ) de las 3 probetas. Adicionalmente, se determinó la relación ( $r$ ) entre los resultados obtenidos y los resultados de las probetas de UHPFRC reforzadas con 2% de micro-fibras metálicas en volumen.

**Tabla 5-9. Resultados de ductilidad y tenacidad en las probetas de UHPFRC que presentan endurecimiento por deflexión.**

MEZCLA	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - Vf					RESILIENCIA			TENACIDAD		
	Nylon mF1	PVA mF2	PP/PE MF1	PP MF2	MT mFOL	$g_{LOP}$ (J)	$SD_M$ (%)	$r$ (%)	$g_{MOR}$ (J)	$SD_M$ (%)	$r$ (%)
N17					1.00%	1.1	13.7%	-27%	2.6	40.6%	-73%
N21	0.50%		1.50%			1.0	20.9%	-30%	4.2	7.0%	-56%
N22			2.00%			1.1	9.1%	-26%	7.6	7.6%	-21%
N25	0.50%			1.50%		0.9	11.2%	-37%	5.3	75.4%	-45%
N26				2.00%		1.3	18.9%	-15%	7.6	9.5%	-21%
N30		0.50%	1.50%			1.3	7.8%	-15%	6.6	18.4%	-31%
N32		1.00%		1.00%		0.9	13.2%	-39%	1.7	11.4%	-83%
N33		0.50%		1.50%		1.1	20.8%	-29%	5.2	56.2%	-45%
N34					2.00%	1.5	6.4%	0%	9.6	34.6%	0%



**Ilustración 5-7.** Resultados de la resiliencia en las probetas de UHPFRC con endurecimiento por deflexión.



**Ilustración 5-8.** Resultados de la tenacidad en las probetas de UHPFRC con endurecimiento por deflexión.

La resiliencia promedio de las probetas reforzadas con fibras poliméricas que presentaron endurecimiento por deflexión fue de  $g_{LOP} = 1.1$  J. Esta energía es idéntica a la absorbida por las probetas de UHPFRC reforzadas con 1% de micro-fibras metálicas, pero es inferior

en promedio un 27% a la resiliencia desarrollada por las probetas de UHPFRC reforzadas con 2% de micro-fibras metálicas en volumen.

La tenacidad promedio desarrollada por las probetas de UHPFRC reforzadas con una relación de 1.5 o 2% de macro-fibras poliméricas en volumen fue  $g_{MOR} = 6.1$  J, esta energía corresponde al área bajo la curva de carga – deflexión hasta la deflexión  $\delta_{MOR}$  asociada al módulo de rotura. La tenacidad de las probetas reforzadas con fibras poliméricas es sobresaliente, partiendo de la premisa que la tenacidad del UHPC es unitaria y la tenacidad desarrollada por las probetas de UHPFRC reforzadas con 1 y 2% de micro-fibras metálicas es 2.6 y 9.6 J respectivamente. Sin embargo, la dispersión de datos es significativa para las probetas reforzadas con 1.5% de macro-fibras de polipropileno en volumen, como se puede apreciar en las **Gráficas 25 y 33**, con respecto a la dispersión de los resultados de las demás probetas con endurecimiento por deflexión. Esta desviación puede estar asociada a la orientación de las macro-fibras con respecto al sentido longitudinal de la probeta, dado que mayor concentración de fibras en la parte central de la probeta mejora la resistencia a flexión.

La tenacidad desarrollada por las probetas de UHPFRC reforzadas con micro-fibras también presentan alta dispersión en los resultados. Además, la energía absorbida por las probetas con 1% de micro-fibras metálicas es un 73% menor a la energía absorbida por las probetas de UHPFRC reforzadas 2% de micro-fibras metálicas y un 57% menor al promedio de la energía absorbida por las probetas reforzadas con 1.5 y 2% de macro-fibras poliméricas en volumen.

En cuanto a las dosificaciones de fibras poliméricas que mayor absorción de energía tienen con relación a la energía absorbida por las probetas con 2% de micro-fibras metálicas en volumen (mezcla N34) corresponde a las mezclas N22 y N26. Estas mezclas están conformadas por 2% de macro-fibras poliméricas en volumen y son capaces de absorber hasta el 79% de la energía de las probetas N34.

▪ **Índice de ductilidad**

El índice de ductilidad  $I_{MOR}$  se obtiene al relacionar la tenacidad y la resiliencia como se puede apreciar en la *Ecuación 5-1*. Esta relación permite conocer el comportamiento en el rango inelástico del material, dado que entre mayor es el índice de ductilidad mayor es la capacidad de absorción de la energía del material.

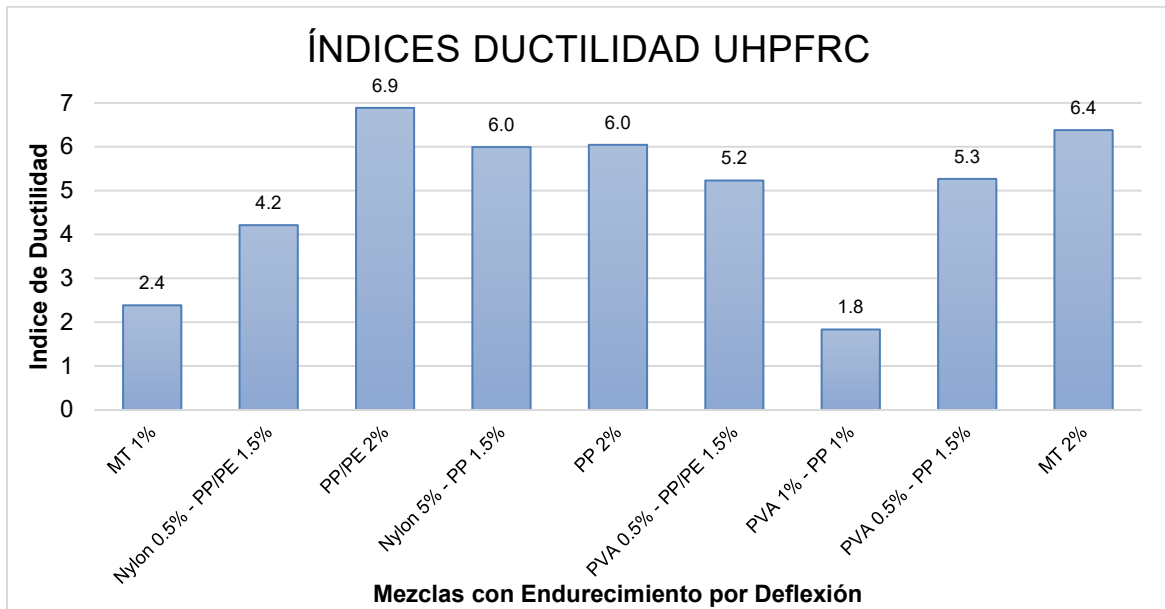
$$I_{MOR} = \frac{g_{MOR}}{g_{LOP}}$$

**Ecuación 5-1**

En la **Tabla 5-10** e **Ilustración 5-9**, se presentan los índices de ductilidad para las probetas que presentaron endurecimiento por deflexión. Para determinar la dispersión de los resultados se determinó la desviación estándar ( $SD_M$ ) de las 3 probetas. Adicionalmente, determinó la relación ( $r$ ) entre los índices de tenacidad alcanzados por las probetas de UHPFRC que presentaron endurecimiento por deflexión con respecto al índice de tenacidad alcanzado por las probetas de UHPFRC reforzadas con 2% de micro-fibras metálicas.

**Tabla 5-10.** Resultados de los índices de ductilidad en las probetas de UHPFRC que presentaron endurecimiento por deflexión.

MEZCLA	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - Vf					ÍNDICE DE DUCTILIDAD		
	Nylon mF1	PVA mF2	PP/PE MF1	PP MF2	MT mFOL	$I_{MOR}$	$SD_M$ (%)	$r$ (%)
N17					1.00%	2.4	27.4%	-62.6%
N21	0.50%		1.50%			4.2	30.4%	-34.0%
N22			2.00%			6.9	5.3%	7.9%
N25	0.50%			1.50%		6.0	87.3%	-6.1%
N26				2.00%		6.0	13.7%	-5.3%
N30		0.50%	1.50%			5.2	22.5%	-18.0%
N32		1.00%		1.00%		1.8	2.9%	-71.3%
N33		0.50%		1.50%		5.3	69.6%	-17.4%
N34					2.00%	6.4	30.0%	0.0%



**Ilustración 5-9.** Resultados de la tenacidad en las probetas de UHPFRC con endurecimiento por deflexión.

Los resultados de los índices de ductilidad  $I_{MOR}$  indican que las probetas de UHPFRC reforzadas con 1 o 1.5% de macro-fibras poliméricas en volumen, presentan un comportamiento a flexión en el rango inelástico deficiente y aceptable, respectivamente. Dado que la relación de resultados ( $r$ ) indica que el comportamiento plástico promedio de estas probetas es un 71 y 19% inferior al comportamiento desarrollado por las probetas reforzadas con micro-fibras metálicas al 2%. No obstante, el comportamiento plástico de las probetas reforzada con 2% de macro-fibras poliméricas en volumen es sobresaliente, puesto que el índice de ductilidad promedio de estas probetas es 1% superior al índice de ductilidad de las probetas con 2% de micro-fibras metálicas.

Los resultados asociados a los índices de ductilidad  $I_{MOR}$  en las probetas con 1% de micro-fibras metálicas en volumen (mezcla N17) son similares a los obtenidos por las probetas con 1% de micro y 1% macro fibras poliméricas en volumen (mezcla N32), por lo tanto, el comportamiento a flexión después de presentarse la primera fisura es deficiente para estas mezclas, como se pudo observar en las **Gráficas 17** y **32**; pese a que el módulo de rotura en las probetas con 1% micro-fibras metálicas en volumen es 21% superior al módulo de rotura de las probetas con 1% micro y 1% macro fibras poliméricas en volumen.

En general las probetas de UHPFRC reforzadas con 1.5 o 2% de macro-fibras poliméricas en volumen, tienen mayor tenacidad, en comparación a las probetas reforzadas con 1% de micro-fibras metálicas en volumen. Además, las probetas de UHPFRC reforzadas con 2% de micro-fibras metálicas o macro-fibras poliméricas en volumen, desarrollan un comportamiento plástico sobresaliente; independientemente del módulo de rotura y tenacidad del compuesto.

También se pudo observar que la falla y colapso en el UHPC ocurren con la primera fisura; mientras que, en el UHPFRC reforzado con altas dosificaciones de fibras poliméricas o metálicas, la falla y colapso tienen lugar mucho más allá del momento en que se presentó la primera fisura, gracias a la deformación adicional con la que cuenta el UHPFRC gracias al aporte de la fibra. En las estructuras este comportamiento puede permitir la absorción de carga sin colapsar la estructura e incluso seguir funcionando.

En general las probetas de UHPFRC reforzadas con altas dosificaciones de macro-fibras poliméricas, tanto al 1 como al 2% en volumen, presentan un comportamiento a flexión superior en comparación a las probetas reforzadas con la misma proporción de fibras poliméricas en volumen, dado que las macro-fibras permiten soportar mayor deflexión post-fisuración antes de colapsar, como se pudo apreciar en las **Gráficas 4, 5, 8, 9, 13, 16, 21, 22, 25, 26, 30 y 33** de UHPFRC reforzadas con altas dosificaciones de macro-fibras poliméricas.

### 5.3 Resistencia a Compresión

Como ya se mencionó, la resistencia a compresión se determinó después de ensayar a flexión y cortar las probetas en cubos de 40 mm de lado, como lo indica la norma EN 196-1. La carga aplicada a la probeta aumento constantemente a una velocidad de 0.5 mm/min durante todo el tiempo de aplicación de la carga hasta la rotura. En la **Figura 5-8** se puede apreciar el proceso de rotulado y corte de las probetas.





**Figura 5-8.** Rotulado y corte de probeta de UHPFRC para ensayo a compresión.  
Fuente: El autor.

La resistencia a compresión ( $f'_c$ ) para cada mezcla se obtuvo del promedio de los resultados de 6 cubos, para determinar la dispersión de los resultados se determinó la desviación estándar ( $SD_M$ ) de los 6 prismas. Adicionalmente, se determinó la relación ( $r$ ) entre los resultados obtenidos y los resultados de la resistencia a compresión de las probetas de UHPC. En la **Tabla 5-11** se presenta el resultado de la resistencia a compresión asociado a la mezcla patrón de UHPC.

**Tabla 5-11.** Resultado de la resistencia a la compresión en probetas de UHPC.

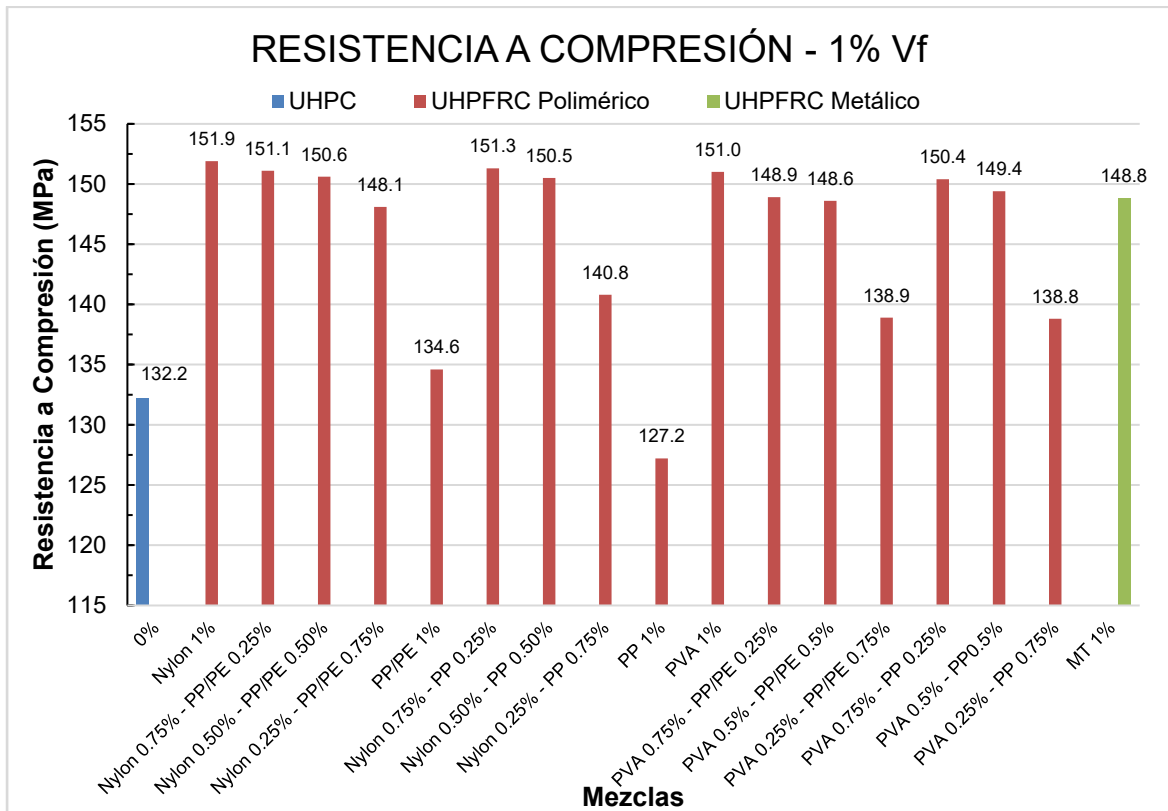
MEZCLA		COMPRESIÓN		
ID	$V_f$	$f'_c$	$SD_M$	$r$
		(MPa)	(%)	(%)
N0	0%	132.2	5.2%	0%

La resistencia a la compresión en la mezcla base de UHPC es aceptable para un concreto de ultra altas prestaciones, no es superior a lo indicado por el ACI 239 R-18, pero está dentro del rango de 110 a 150 MPa de los concretos de muy altas prestaciones reforzados con fibras (VHPFRC). Los resultados de las probetas N0, sirven como criterio de evaluación para determinar la influencia de las micro y macro fibras poliméricas en la resistencia a compresión del UHPFRC.

En la **Tabla 5-12 e Ilustración 5-10** se presentan los resultados de la resistencia a compresión de las mezclas de UHPFRC reforzadas con fibras al 1% en volumen y, en la **Tabla 5-13 e Ilustración 5-11** se presentan los resultados para el 2% en volumen. En el anexo C se presentan los cálculos y resultados de la resistencia a compresión de cada prisma.

**Tabla 5-12.** Resultados de la resistencia a la compresión en probetas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 1% en volumen.

MEZCLA ID	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - Vf					COMPRESIÓN		
	Nylon mF1	PVA mF2	PP/PE MF1	PP MF2	MT mFOL	f'c (MPa)	SD <sub>M</sub> (%)	r (%)
N1	1.00%					151.9	3.8%	15%
N2	0.75%		0.25%			151.1	7.8%	14%
N3	0.50%		0.50%			150.6	4.9%	14%
N4	0.25%		0.75%			148.1	6.6%	12%
N5			1.00%			134.6	6.4%	2%
N6	0.75%			0.25%		151.3	6.2%	14%
N7	0.50%			0.50%		150.5	7.3%	14%
N8	0.25%			0.75%		140.8	4.8%	7%
N9				1.00%		127.2	1.4%	-4%
N10		1.00%				151.0	5.2%	14%
N11		0.75%	0.25%			148.9	6.1%	13%
N12		0.50%	0.50%			148.6	6.3%	12%
N13		0.25%	0.75%			138.9	4.7%	5%
N14		0.75%		0.25%		150.4	4.1%	14%
N15		0.50%		0.50%		149.4	4.4%	13%
N16		0.25%		0.75%		138.8	6.0%	5%
N17					1.00%	148.8	5.3%	13%



**Ilustración 5-10.** Resultados de la resistencia a compresión en las probetas de UHPFRC con 1% de fibras en volumen.

Los resultados indican que más del 90% de las probetas de UHPFRC reforzadas con 1% de fibras poliméricas tienen mayor resistencia a la compresión que las probetas de UHPC, el incremento máximo en resistencia fue del 15% y el promedio fue del 10%. Los resultados también permiten observar que la dispersión de los datos es baja, lo que indica mayor confianza en los resultados.

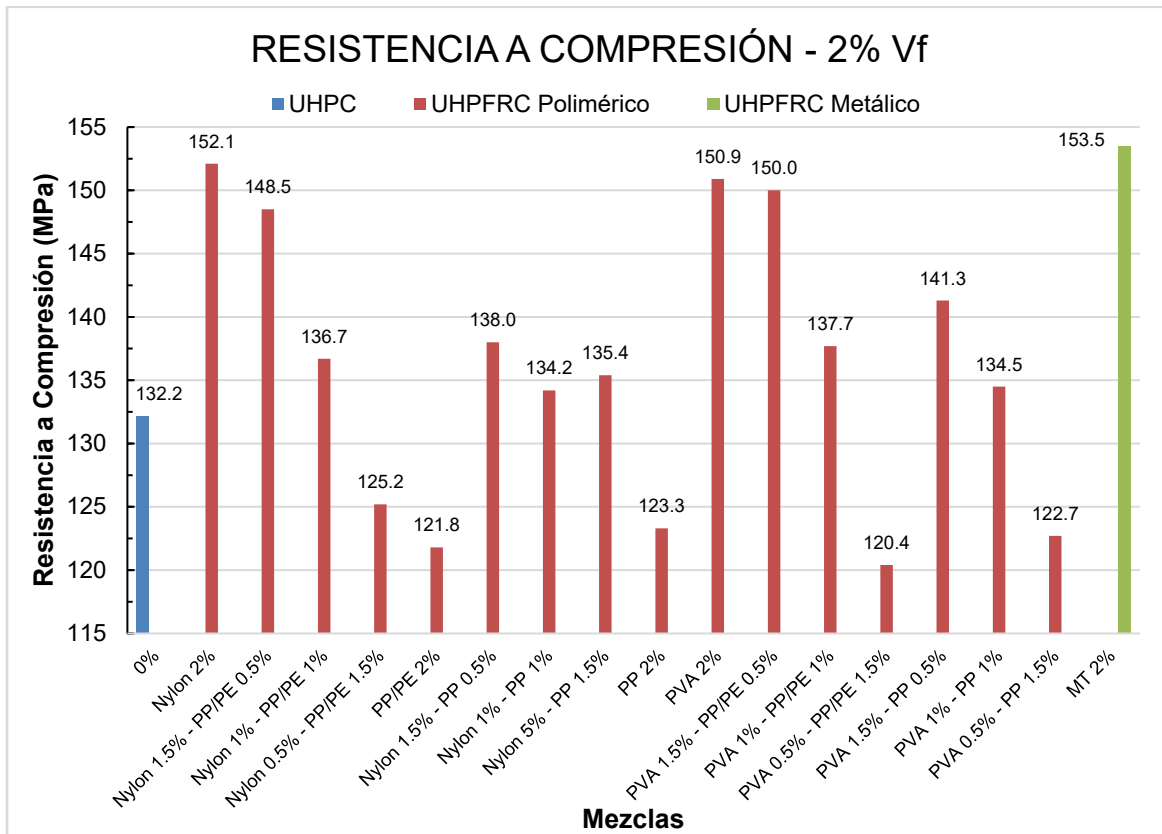
Además, se puede apreciar que las probetas reforzadas con altas dosificaciones de micro-fibras poliméricas son más resistentes que las probetas reforzadas con altas dosificaciones de macro-fibras poliméricas. Esto obedece a varios factores como son: la absorción de agua desarrollada por las micro-fibras, especialmente el nylon, puesto que disminuye la relación agua conglomerante ( $w/b$ ) esto contribuye al incremento de la resistencia. Al curado interno que genera las micro-fibras hidrofílicas como es el caso del nylon y el PVA que ayuda a la resistencia al evitar la formación de micro fisuras por contracción. Al reforzamiento tridimensional que proporcionan las micro-fibras. A la relación de aspecto de la micro-fibra, ya que a entre menor sea el diámetro de la fibra el empaquetamiento de

partículas es más difícil de romper. Finalmente, el espacio formado por la macro-fibra al interior de la matriz podría actuar como un hueco cuando se somete la probeta a compresión, reduciendo la capacidad resistente del UHPFRC. Esto se minimiza con la macro-fibra fibrilada.

De forma similar se puede apreciar que la resistencia a compresión de las probetas de UHPFRC reforzadas con 1% de micro-fibras poliméricas, son un 17% más resistentes, que las probetas reforzadas con micro-fibras metálicas en la misma proporción en volumen. Esto puede deberse a que las fibras poliméricas proporcionan mayor densidad de reforzamiento a la matriz de UHPFRC, en comparación a la proporcionada por las micro-fibras metálicas, dado que por cada micro-fibra metálica dosificada, se requiere de aproximadamente 6.5 micro-fibras poliméricas para ocupar el mismo volumen en la matriz.

**Tabla 5-13.** Resultados de la resistencia a la compresión en probetas de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 2% en volumen.

MEZCLA ID	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - Vf					COMPRESIÓN		
	Nylon mF1	PVA mF2	PP/PE MF1	PP MF2	MT mFOL	f <sub>c</sub> (MPa)	SD <sub>M</sub> (%)	r (%)
N18	2.00%					152.1	6.6%	15%
N19	1.50%		0.50%			148.5	6.5%	12%
N20	1.00%		1.00%			136.7	11.0%	3%
N21	0.50%		1.50%			125.2	7.2%	-5%
N22			2.00%			121.8	8.0%	-8%
N23	1.50%			0.50%		138.0	8.3%	4%
N24	1.00%			1.00%		134.2	6.2%	2%
N25	0.50%			1.50%		135.4	6.7%	2%
N26				2.00%		123.3	5.4%	-7%
N27		2.00%				150.9	3.8%	14%
N28		1.50%	0.50%			150.0	4.8%	13%
N29		1.00%	1.00%			137.7	8.5%	4%
N30		0.50%	1.50%			120.4	9.4%	-9%
N31		1.50%		0.50%		141.3	7.8%	7%
N32		1.00%		1.00%		134.5	8.1%	2%
N33		0.50%		1.50%		122.7	8.8%	-7%
N34					2.00%	153.5	2.4%	16%



**Ilustración 5-11.** Resultados de la resistencia a compresión en las probetas de UHPFRC con 2% de fibras en volumen.

Los resultados indican que más del 65% de las probetas de UHPFRC reforzadas con 2% de fibras poliméricas tienen mayor resistencia a la compresión que las probetas de UHPC, el incremento máximo en resistencia fue del 15% y el promedio fue del 3%.

Los resultados presentan una incidencia negativa en la resistencia a compresión del UHPFRC reforzado con un 2% de fibras poliméricas por volumen. Dado que la resistencia disminuye en comparación a las probetas con contenidos de fibra del 1%. Esto se debe posiblemente a la saturación y superposición de las macro-fibras. En estas zonas de saturación las fibras entran en contacto e impiden su recubrimiento, generando micro zonas de debilidad en el concreto debido a que la resistencia a la compresión de la fibra es menor a la del compuesto. Por lo general, las probetas reforzadas con macro-fibras al 1.5 o 2% en volumen, presentan una reducción superior al 5% en la resistencia a compresión, comparado con las probetas de UHPC.

El UHPFRC reforzado con solo 1% de micro-fibras poliméricas en volumen, podría ser adoptado para elementos sometidos principalmente a compresión dado que el incremento en la resistencia a causa del curado interno y la adherencia de las micro-fibras es del 14.6%.

Finalmente, los resultados indican que el 44 y 19% de las probetas de UHPFRC reforzadas con 1 y 2% de fibras poliméricas en volumen, respectivamente, presentan resistencias a la compresión superiores a 150 MPa, es decir, que estas probetas satisfacen la condición del ACI 239 R-18, para ser clasificadas como concretos de ultra altas prestaciones reforzado con fibras (UHPFRC). El resto de las probetas se encuentran en el rango de resistencia de VHPFRC. Incluso las probetas reforzadas con 1% de micro-fibras metálicas en volumen.

Los resultados de la resistencia a compresión de las probetas reforzadas con micro-fibras metálicas son sobresalientes, como era de esperarse, debido al confinamiento tridimensional que desarrollan las micro-fibras metálicas a la matriz. Sin embargo, los valores obtenidos en las probetas reforzadas con micro-fibras poliméricas no distan de los resultados obtenidos por estas probetas. Dado que el incremento en resistencia para las probetas de UHPFRC reforzadas con 1% micro-fibras poliméricas fue del 15% y para el mismo volumen las probetas reforzadas con micro-fibras metálicas fue solo del 13%, con respecto a la resistencia del UHPC.

### 5.3.1 Correlación de resultados a compresión

En el estado del arte en la **Tabla 2-3**, se presentaron los factores de correlación entre las probetas cúbicas y cilíndricas para determinar la resistencia a la compresión del UHPC y UHPFRC. Por lo tanto, para correlacionar los resultados obtenidos con las probetas cúbicas de 40 mm de lado a probetas cilíndricas con esbeltez 1:2 (100 x 200 mm), se debe primero relacionar las probetas cúbicas de 40 a 100 mm y, luego de las probetas cúbicas de 100 mm a probetas cilíndricas. A continuación, se pueden apreciar estas relaciones.

$$f'_{c \text{ Probeta } 100L} = 1.121 \times f'_{c \text{ Probeta } 40L} \quad f'_{c \text{ Probeta } 100 \times 200} = f'_{c \text{ Probeta } 100L} / 1.020$$

$$f'_{c \text{ Probeta } 100 \times 200} = 1.10 f'_{c \text{ Probeta } 40L}$$

Los resultados de la resistencia a la compresión en probetas cilíndricas de 100 x 200 mm, serían un 10% superior a los evidenciados en probetas cubicas de 40 mm de lado.

### 5.3.2 Comparación de resultados a compresión

En el estado del arte se presentó una recopilación de los resultados obtenidos por algunas investigaciones relacionadas con UHPFRC en las cuales se determinó la resistencia a flexión y compresión. Como se indicó en la comparación de los resultados a flexión la comparación de resultados se realizó entre los resultados obtenidos por las probetas de UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas y las de UHPC. En la **Tabla 5-14** se presenta la comparación de resultados obtenidos por las probetas reforzadas con micro-fibras metálicas y los resultados de otras investigaciones con probetas de igual tamaño. Fueron resaltados los resultados en los cuales el volumen de fibras fue igual a los adoptados en la presente investigación.

**Tabla 5-14.** Comparación de resultados a compresión entre probetas de UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas.

RESULTADOS A COMPRESIÓN						COMPARACIÓN					
Fibra	Tipo	Ensayo a $V_f$	$f'_c$	$f'_c$		Referencia	Mezcla $V_f$	$f'_c$	r		
		flexión %	(MP)				%	(MPa)	%	%	
-	Sin fibras	3 Puntos	<b>0.0</b>	<b>62</b>	<b>110</b>	Yu R. et al	N0	<b>0.0</b>	<b>132.2</b>	<b>-53%</b>	<b>-17%</b>
PP04	Mono	3 Puntos	0.4	72	110	Yu R. et al	N33	1.0	148.8	-52%	-26%
SS20	Mono	3 Puntos	<b>2.0</b>	<b>104</b>		Yu R. et al	N34	<b>2.0</b>	<b>153.5</b>	<b>-32%</b>	
PP04SS20	Hibrida	3 Puntos	2.4	68		Yu R. et al	N34	2.0	153.5	-56%	
PP03SS20	Hibrida	3 Puntos	2.3	116		Yu R. et al	N34	2.0	153.5	-24%	
-	Sin fibras	3 Puntos	<b>0.0</b>	<b>105</b>		Wu, Z. et al	N0	<b>0.0</b>	<b>132.2</b>	<b>-21%</b>	
SS10	Mono	3 Puntos	<b>1.0</b>	<b>128</b>	<b>143</b>	Wu, Z. et al	N33	<b>1.0</b>	<b>148.8</b>	<b>-14%</b>	<b>-4%</b>
SS20	Mono	3 Puntos	<b>2.0</b>	<b>150</b>	<b>159</b>	Wu, Z. et al	N34	<b>2.0</b>	<b>153.5</b>	<b>-2%</b>	<b>4%</b>
SS30	Mono	3 Puntos	3.0	157	170	Wu, Z. et al	N34	2.0	153.5	2%	11%
-	Sin fibras	3 Puntos	<b>0.0</b>	<b>150</b>		Wu Z. et al	N0	<b>0.0</b>	<b>132.2</b>	<b>13%</b>	
SS20	Mono	3 Puntos	<b>2.0</b>	<b>143</b>	<b>150</b>	Wu Z. et al	N34	<b>2.0</b>	<b>153.5</b>	<b>-7%</b>	<b>-2%</b>
-	Sin fibras	3 Puntos	<b>0.0</b>	<b>116</b>		Vaitkevicius. V. et al	N0	<b>0.0</b>	132.2	<b>-12%</b>	
SS10	Mono	3 Puntos	<b>1.0</b>	<b>139</b>		Vaitkevicius. V. et al	N33	<b>1.0</b>	148.8	<b>-7%</b>	
SS13	Mono	3 Puntos	1.3	143		Vaitkevicius. V. et al	N33	1.0	148.8	-4%	
SS19	Mono	3 Puntos	<b>1.9</b>	<b>149</b>		Vaitkevicius. V. et al	N34	<b>2.0</b>	<b>153.5</b>	<b>-3%</b>	
SS20	Mono	4 Puntos	<b>2.0</b>	<b>143</b>	<b>158</b>	Kou, S.C. et al	N34	<b>2.0</b>	<b>153.5</b>	<b>-7%</b>	<b>3%</b>
SF25	Mono	4 Puntos	2.5	180		Bornemann, et al	N34	2.0	153.5	17%	
SF10PVA20	Mono	4 Puntos	<b>1.0</b>	<b>176</b>		Bornemann, et al	N33	<b>1.0</b>	<b>148.8</b>	<b>18%</b>	
PVA40	Mono	4 Puntos	4.0	-		Bornemann, et al	N34	2.0	153.5		
SF10PVA20	Hibrida	4 Puntos	3.0	161		Bornemann, et al	N34	2.0	153.5	5%	
SF20	Mono	4 Puntos	<b>2.0</b>	<b>161</b>		Bornemann, et al	N34	<b>2.0</b>	<b>153.5</b>	<b>5%</b>	
SS20	Mono	3 Puntos	<b>2.0</b>	<b>151</b>	<b>172</b>	Nguyen, E. et al	N34	<b>2.0</b>	<b>153.5</b>	<b>-2%</b>	<b>12%</b>

Al comparar los resultados se puede apreciar que las probetas elaboradas para esta investigación tienden a presentar resistencias a compresión superiores a las reportadas por otros investigadores. Dado que al hacer el promedio de los resultados obtenidos en otras investigaciones para probetas sin fibras y reforzadas con 1 o 2% de micro-fibras metálicas en volumen, los resultados a compresión obtenidos por esta investigación son superiores al promedio en 22% en las probetas de UHPC y, 2 y 12% superior en las probetas de UHPFRC reforzadas con 1 o 2% de micro-fibras metálicas por volumen, respectivamente. En la **Tabla 5-15** se puede apreciar esta comparación.

**Tabla 5-15.** Resumen de la comparación de resultados a compresión entre probetas de UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas.

RESUMEN					
OTRAS INVESTIGACIONES				AUTOR	
Fibra	$V_f$ %	$f'_c$ (MPa)	$SD_M$ %	$f'_c$ (MPa)	$r$ %
-	0.0	108.6	29%	132.2	22%
OL13/0.2	1.0	146.4	14%	148.8	2%
OL13/0.2	2.0	136.6	13%	153.5	12%

De forma similar a la desviación estándar ( $SD_M$ ) de la comparación de los resultados a flexión, la desviación estándar para la comparación de los resultados a compresión es alta, casi del 30%, para las probetas sin refuerzo, es decir los resultados obtenidos por otras investigaciones difieren en gran medida, esto reafirma que existen múltiples variables que pueden afectar la resistencia de la matriz de UHPC.

## 5.4 Correlación entre la resistencia a flexión y compresión en UHPFRC

La constante ( $k$ ) correlaciona el módulo de rotura y la resistencia compresión del concreto, según la NSR-10,  $k$  es igual 0.62 para el concreto convencional. Cabe resaltar que en Colombia las normas, las especificaciones y el control de calidad del concreto, en general se hacen con base en probetas cilíndricas con esbeltez 1:2 (para resistencia a compresión) y en viguetas de 150 x 150 x 500 mm (para resistencia a la flexión) cargadas en el tercio medio.



Dado que esta investigación determino los módulos de rotura y la resistencia a compresión del UHPC y UHPFRC reforzado con fibras poliméricas y micro-fibras metálicas, en probetas de 40 x 40 x 160 mm (para resistencia a la flexión) cargadas en centro de la luz y, en probetas de 40 mm de lado (para resistencia a compresión), se consideró pertinente determinar la correlación “*k*” para estos concretos, donde  $k = f_{MOR} / \sqrt{f'_c}$ .

La constante *k* para UHPC se puede apreciar en la **Tabla 5-16** y, la constante *k* para las dosificaciones de fibras del 1 y 2% en volumen, se pueden apreciar en la **Tabla 5-17** y **Tabla 5-18**, respectivamente.

**Tabla 5-16.** Constante *k* para UHPC.

MEZCLA		RELACIÓN
ID	V <sub>f</sub>	<i>k</i>
N0	0%	1.51

**Tabla 5-17.** Constante *k* para UHPFRC reforzado fibras al 1% en volumen.

MEZCLA	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - V <sub>f</sub>					RELACIÓN
	Nylon mF1	PVA mF2	PP/PE MF1	PP MF2	MT mFOL	
N1	1.00%					1.59
N2	0.75%		0.25%			1.60
N3	0.50%		0.50%			1.60
N4	0.25%		0.75%			1.61
N5			1.00%			1.69
N6	0.75%			0.25%		1.59
N7	0.50%			0.50%		1.60
N8	0.25%			0.75%		1.65
N9				1.00%		1.74
N10		1.00%				1.60
N11		0.75%	0.25%			1.61
N12		0.50%	0.50%			1.61
N13		0.25%	0.75%			1.66
N14		0.75%		0.25%		1.60
N15		0.50%		0.50%		1.60
N16		0.25%		0.75%		1.66
N17					1.00%	1.61

**Tabla 5-18.** Constante  $k$  para UHPFRC reforzado fibras al 2% en volumen.

MEZCLA	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - $V_f$					RELACIÓN $k$
	Nylon mF1	PVA mF2	PP/PE MF1	PP MF2	MT mFOL	
N18	2.00%					1.61
N19	1.50%		0.50%			1.63
N20	1.00%		1.00%			1.70
N21	0.50%		1.50%			1.78
N22			2.00%			1.80
N23	1.50%			0.50%		1.70
N24	1.00%			1.00%		1.72
N25	0.50%			1.50%		1.71
N26				2.00%		1.79
N27		2.00%				1.62
N28		1.50%	0.50%			1.63
N29		1.00%	1.00%			1.70
N30		0.50%	1.50%			1.81
N31		1.50%		0.50%		1.68
N32		1.00%		1.00%		1.72
N33		0.50%		1.50%		1.80
N34					2.00%	1.61

Para comprender mejor estas constantes, se determinó el promedio de los resultados obtenidos para las probetas reforzadas con fibras poliméricas al 1 y 2%, también se determinó el promedio de la constante  $k$  para de las probetas reforzadas con fibras poliméricas que presentaron reblandecimiento y endurecimiento por deflexión y, se compararon con la constante  $k$  del UHPC. En la

**Tabla 5-19** se pueden apreciar estos promedios y la desviación estándar respectivamente.

**Tabla 5-19.** Promedio de constante  $k$  para UHPFRC.

MEZCLA	$V_f$	FIBRA	COMPORTAMIENTO	$k$	r %	$SD_M$
UHPC	0%	Sin Fibras	Falla Frágil	1.51	0%	N/A
UHPFRC	1%	Polimérica	Reblandecimiento	1.63	8%	2.7%
UHPFRC	1 y 2%	Polimérica	Reblandecimiento	1.64	9%	2.8%
UHPFRC	2%	Polimérica	Reblandecimiento o Endurecimiento	1.71	14%	4.0%
UHPFRC	2%	Polimérica	Endurecimiento	1.77	18%	2.4%
UHPFRC	1%	Metálica	Endurecimiento	1.61	7%	N/A
UHPFRC	2%	Metálica	Endurecimiento	1.61	7%	N/A

Como se puede apreciar la constante  $k$  para las probetas de UHPC, UHPFRC reforzado con fibras poliméricas al 1% y el UHPFRC que presentó reblandecimiento por deflexión, el valor de  $k$  es similar. Ninguna de las probetas de estos grupos de concretos logró alcanzar endurecimiento por deflexión, por lo tanto, el valor de  $k = 1.59$ , podría servir de referencia para relacionar la resistencia a flexión y compresión del UHPFRC reforzado con fibras poliméricas que presenta a flexión una falla frágil o reblandecimiento por deflexión, es decir, la dosificación de fibras no es adecuada para alcanzar un comportamiento a flexión sobresaliente o endurecimiento por deflexión.

En cuanto a las probetas con 2% de fibras poliméricas el valor promedio de  $k$  aumenta un 6% y, para las probetas que presentaron endurecimiento por deflexión con fibras poliméricas aumenta un 12%, con respecto al  $k$  del UHPC.

Para las probetas de UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas al 1 y 2% en volumen, el valor de  $k$  disminuye un 7% para contenidos del 1% y aumenta un 32% para dosificaciones del 2% de micro-fibras metálicas en volumen. Esto confirma que el comportamiento a flexión del UHPFRC reforzado con fibras poliméricas y micro-fibras metálicas en la misma proporción de fibras en volumen, no son equivalentes.

Es importante resaltar que estas correlaciones entre los módulos de rotura y las resistencias a compresión obtenidas para UHPC y UHPFRC, sirven como punto de partida para futuras investigaciones, dado que para lograr un valor de  $k$  con mayor certeza y con un grado de confiabilidad óptimo, es necesario desarrollar una cantidad de ensayos considerables en los que se tenga en cuenta diferentes condiciones y geometrías en las probetas; además de estudiar correlaciones con distintas dosificaciones de materiales cementantes y con variaciones en las características y volumen de fibras en la matriz.

## 5.5 Costo del UHPFRC

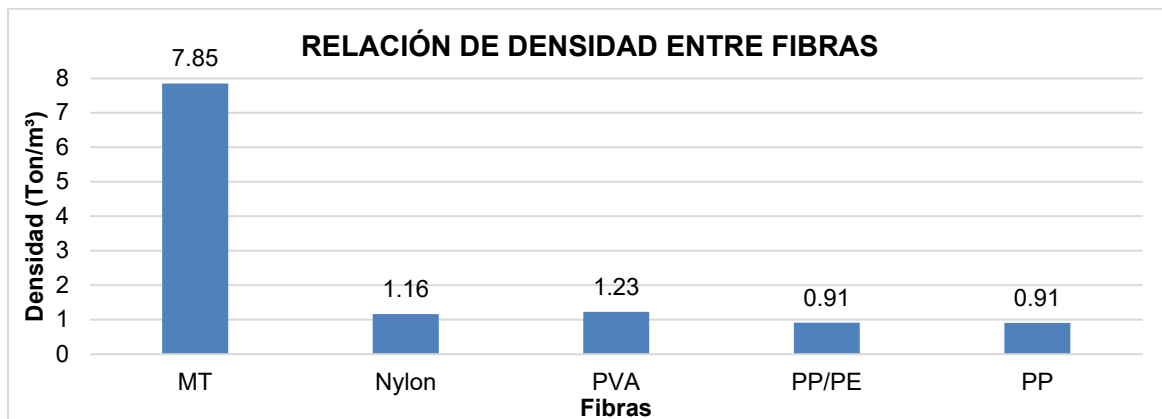
Varios autores que han estudiado el desempeño del UHPFRC y coinciden que las mejoras de rendimiento obtenidas con dosificaciones de fibras metálicas superiores al 2% en volumen no compensan el incremento en costo por metro cúbico (Kim, Naaman, et al., 2008a), (Serna et al., 2012), (Abellán et al., 2018a). Por lo tanto, se limitó el contenido de

fibras poliméricas al 2% en las mezclas de UHPFRC, para tener un parámetro de comparación con las mezclas de UHPFRC reforzadas con fibras metálicas.

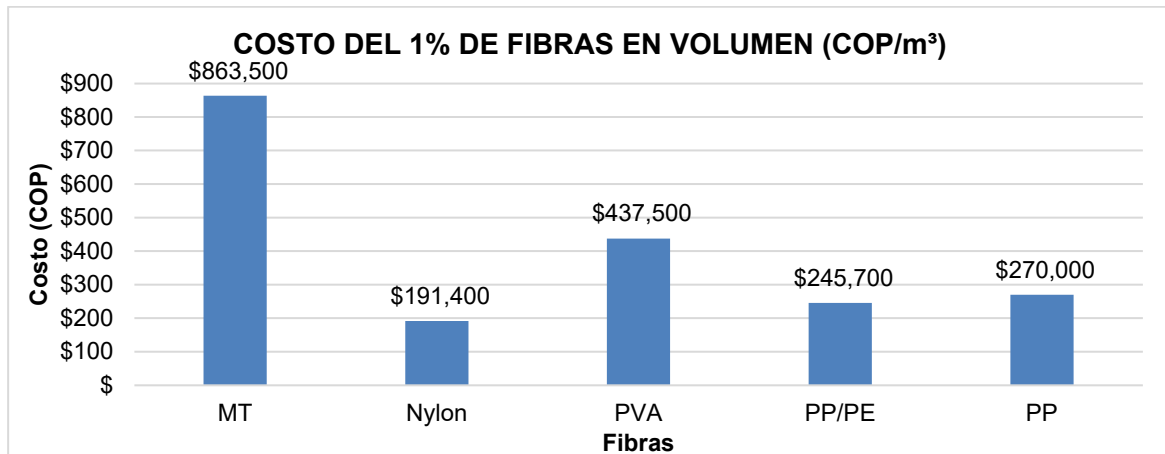
En cuanto a la dosificación de fibras, la forma correcta de indicarlo es por volumen y no por su masa. Por ejemplo, 40 kg de fibra de acero (densidad 7.85 kg/L) ocupan por m<sup>3</sup> de concreto un volumen del 5.1%. Las fibras de polipropileno (densidad 0.91 kg/L) necesitan entonces apenas 4.66 kg/m<sup>3</sup> para ocupar el mismo volumen. En ambos casos tendrían así una dosificación similar (relación de densidades). Aunque en realidad las dosis equivalentes no son estrictamente la relación de densidades, sí se le aproximan (*acero/polipropileno* = 7.85/0.91 = 8.6 veces). Ahora la incidencia en costos es representativa dado que 1 kg de fibras de acero tiene un costo promedio de \$11.000 COP y 1 kg de fibras de polipropileno tiene un costo promedio de \$30.000 COP, la diferencia corresponde a un 68.7% para el mismo volumen de fibras. En la **Tabla 5-20**, **Ilustración 5-12** e **Ilustración 5-13** se puede apreciar la relación entre la densidad y el costo de las fibras poliméricas comparadas con las micro-fibras de acero para un mismo volumen.

**Tabla 5-20.** Costo de las fibras por metro cubico (m<sup>3</sup>) dosificadas al 1% en volumen, y relación entre la masa y el costo de las fibras para reforzar UHPFRC.

FIBRA		D	V	Cant	Prec. Unit	COSTO	RELACIÓN	
MATERIAL	SIGLA	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	kg	COP/kg	COP/m <sup>3</sup>	MASA	COSTO
MT	mFOL	7850	0.01	78.50	\$ 11,000	\$ 863,500	100.0%	100.0%
Nylon	mF1	1160	0.01	11.60	\$ 16,500	\$ 191,400	14.8%	22.2%
PVA	mF2	1225	0.01	12.50	\$ 35,000	\$ 437,500	15.6%	50.7%
PP/PE	MF1	910	0.01	9.10	\$ 27,000	\$ 245,700	11.6%	28.5%
PP	MF2	905	0.01	9.00	\$ 30,000	\$ 270,000	11.5%	31.3%



**Ilustración 5-12.** Relación entre la densidad de las fibras para reforzar UHPFRC.



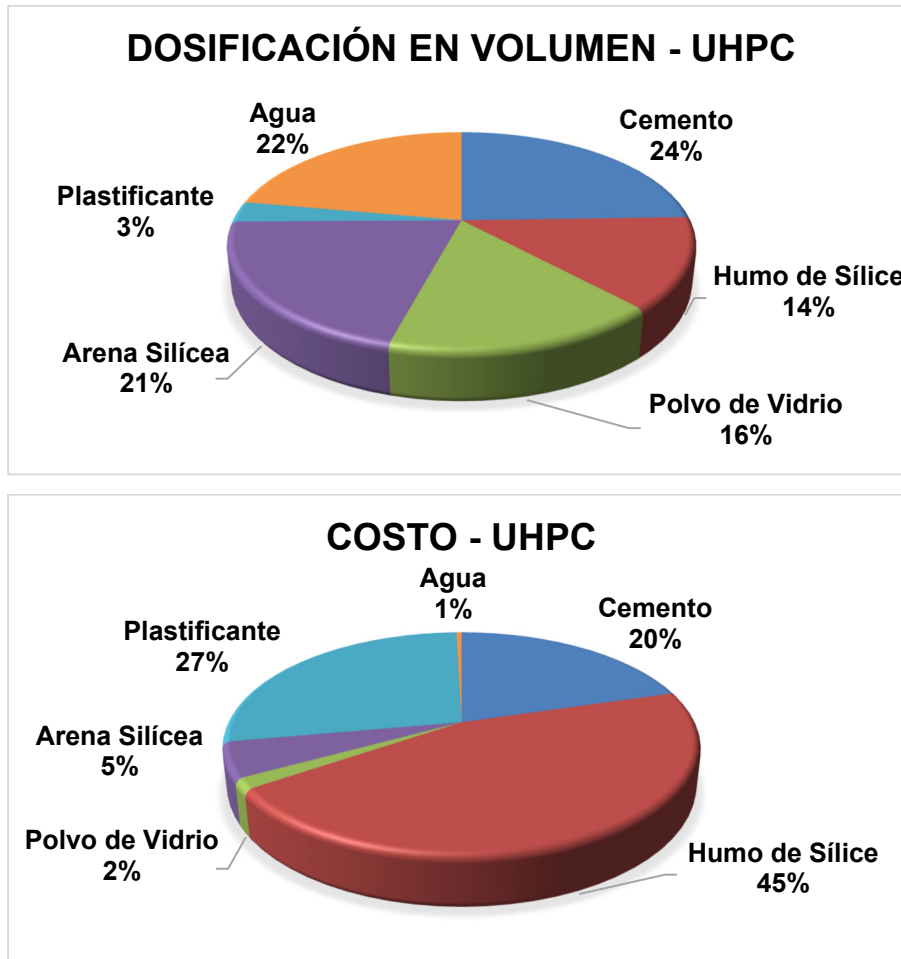
**Ilustración 5-13.** Relación entre el costo de las fibras para reforzar el UHPFRC con 1% en volumen.

La relación entre fibras permite evidenciar que un metro cubico de concreto reforzado con fibras poliméricas solo requiere en promedio de 10.6 kg para ocupar el mismo espacio que las fibras metálicas en el concreto al dosificarse al 1% en volumen. Además, el costo de las micro y macro fibras poliméricas es el 36.4 y 29.9%, respectivamente, del costo de las micro-fibras metálicas para una misma dosificación en volumen.

En relación al costo por metro cubico de UHPFRC, se determinó el valor correspondiente de la mezcla patrón de UHPC, con la proporción de materiales que se obtuvo del diseño de mezcla. En la **Tabla 5-21** e **Ilustración 5-14** se ilustra la proporción y el costo de cada material para 1 m³ de UHPC.

**Tabla 5-21.** Proporción y costo de los materiales para un metro cubico (1 m³) de UHPC.

MATRIZ		D	V	Cant	Prec. Unit	COSTO
MATERIAL	SIGLA	kg/m³	m³	kg	COP/kg	COP/m³
Cemento	CEM	3150	0.24	750	\$ 350	\$ 262,500
Humo de Sílice	SF	2200	0.13	290	\$ 2,000	\$ 580,000
Polvo de Vidrio	GF	2550	0.16	400	\$ 50	\$ 20,000
Arena Silíceea	SS	2650	0.20	530	\$ 125	\$ 66,287
Plastificante	HRWR	1090	0.03	32	\$ 10,905	\$ 352,809
Agua	W	1000	0.22	215	\$ 25	\$ 5,382
<b>TOTAL</b>				0.97	2218	<b>\$1,286,978</b>



**Ilustración 5-14.** Proporción y costo de los materiales para un metro cubico (1 m<sup>3</sup>) de UHPC.

El precio unitario de cada material corresponde a valores de venta al por mayor y no incluye impuestos. El costo promedio de la mezcla base (N0) de UHPC para la presente investigación es de (\$1,286,978 COP/m<sup>3</sup>). Ver **Tabla 5-22**.

**Tabla 5-22.** Costo de la mezcla base de UHPC.

MEZCLA		COSTO
ID	Vf	COP/m <sup>3</sup>
N0	0%	\$ 1,286,978

Con los costos de las fibras y el de la mezcla base se obtiene el costo de cada mezcla de UHPFRC, según la dosificación de fibras correspondiente. En la **Tabla 5-23** y **Tabla 5-24**

se presentan los costos de UHPFRC para dosificaciones del 1 o 2% de fibras en volumen, respectivamente.

**Tabla 5-23. Costo de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 1% en volumen.**

MEZCLA ID	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - V <sub>f</sub>						M <sub>f</sub> (kg)	COSTO COP/m <sup>3</sup>
	Nylon mF1	PVA mF2	PP/PE MF1	PP MF2	MT mFOL			
N1	1.00% 11.6 kg						11.6	\$1,478,378
N2	0.75% 8.7 kg		0.25% 2.3 kg				11.0	\$1,491,953
N3	0.50% 5.8 kg		0.50% 4.6 kg				10.4	\$1,505,528
N4	0.25% 2.9 kg		0.75% 6.8 kg				9.7	\$1,519,103
N5			1.00% 9.1 kg				9.1	\$1,532,678
N6	0.75% 8.7 kg				0.25% 2.3 kg		11.0	\$1,498,403
N7	0.50% 5.8 kg				0.50% 4.5 kg		10.3	\$1,518,428
N8	0.25% 2.9 kg				0.75% 6.8 kg		9.7	\$1,538,453
N9					1.00% 9.1 kg		9.1	\$1,558,478
N10		1.00% 12.3 kg					12.3	\$1,715,728
N11		0.75% 9.2 kg	0.25% 2.3 kg				11.5	\$1,669,965
N12		0.50% 6.1 kg	0.50% 4.6 kg				10.7	\$1,624,203
N13		0.25% 3.1 kg	0.75% 6.8 kg				9.9	\$1,578,440
N14		0.75% 9.2 kg			0.25% 2.3 kg		11.5	\$1,676,415
N15		0.50% 6.1 kg			0.50% 4.5 kg		10.7	\$1,637,103
N16		0.25% 3.1 kg			0.75% 6.8 kg		9.9	\$1,597,790
N17						1.00% 78.5 kg	78.5	\$2,150,478

**Tabla 5-24. Costo de UHPFRC con dosificaciones de fibras al 2% en volumen.**

MEZCLA ID	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - V <sub>f</sub>						M <sub>f</sub> (kg)	COSTO COP/m <sup>3</sup>
	Nylon mF1	PVA mF2	PP/PE MF1	PP MF2	MT mFOL			
N18	2.00% 23.2 kg						23.2	\$1,669,778
N19	1.50% 17.4 kg		0.50% 4.6 kg				22.0	\$1,696,928
N20	1.00% 11.6 kg		1.00% 9.1 kg				20.7	\$1,724,078
N21	0.50% 5.8 kg		1.50% 13.7 kg				19.5	\$1,751,228
N22			2.00% 18.2 kg				18.2	\$1,778,378
N23	1.50% 17.4 kg				0.50% 4.5 kg		21.9	\$1,709,828
N24	1.00% 11.6 kg				1.00% 9.1 kg		20.7	\$1,749,878
N25	0.50% 5.8 kg				1.50% 13.6 kg		19.4	\$1,789,928
N26					2.00% 18.1 kg		18.1	\$1,829,978
N27		2.00% 24.5 kg					24.5	\$2,144,478
N28		1.50% 18.4 kg	0.50% 4.6 kg				22.9	\$2,052,953
N29		1.00% 12.3 kg	1.00% 9.1 kg				21.4	\$1,961,428
N30		0.50% 6.1 kg	1.50% 13.7 kg				19.8	\$1,869,903
N31		1.50% 18.4 kg			0.50% 4.5 kg		22.9	\$2,065,853
N32		1.00% 12.3 kg			1.00% 9.1 kg		21.3	\$1,987,228
N33		0.50% 6.1 kg			1.50% 13.6 kg		19.7	\$1,908,603
N34						2.00% 157 kg	157	\$3,013,978

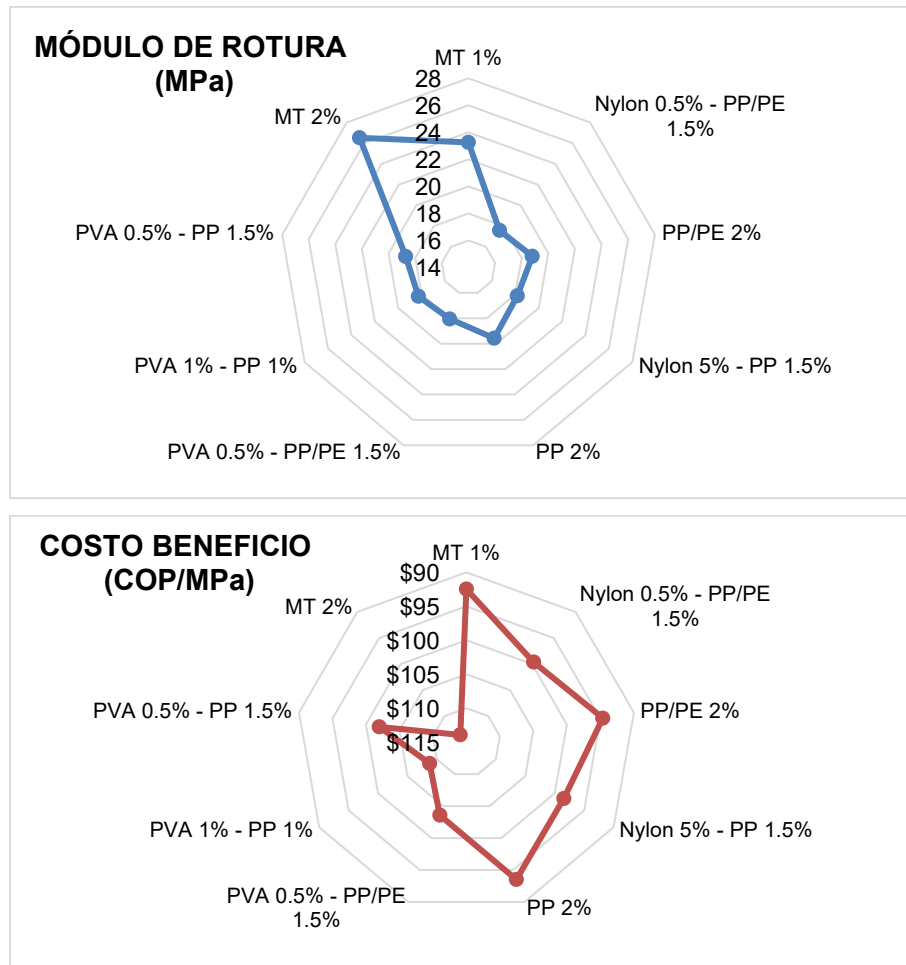
El menor y mayor costo de las mezclas de UHPFRC reforzadas con fibras poliméricas corresponde a las dosificaciones con altos contenidos de micro-fibras de nylon y PVA, respectivamente. Debido a que nylon es la fibra más económica y la fibra de PVA la más costosa. La variación de precios unitarios está asociada con el proceso de fabricación y módulo de elasticidad de la fibra.

Al realizar una evaluación del costo beneficio de la resistencia a flexión, en cuanto al módulo de rotura se refiere ( $f_{MOR}$ ), se puede evidenciar que el costo equivalente en MPa de las probetas reforzadas con micro-fibras metálicas al 2% en volumen, es el más alto, pero a su vez, también el más bajo para probetas con 1% de micro-fibras metálicas. Como se puede evidenciar en la **Tabla 5-25** e **Ilustración 5-15**, donde se indica la relación entre el costo y el módulo de rotura para las probetas de UHPFRC que presentaron endurecimiento por deflexión y se comparan los resultados con el mejor costo beneficio, evidenciado en las probetas de UHPFRC reforzadas con 1% de micro-fibras metálicas en volumen.

**Tabla 5-25.** Evaluación de costos de las mejores mezclas de UHPFRC a flexión.

FLEXIÓN - MOR								
MEZCLA	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - $V_f$					$f_{MOR}$ (MPa)	COSTO COP/MPa	RELACIÓN %
ID	Nylon mF1	PVA mF2	PP/PE MF1	PP MF2	MT mFOL			
N17					1.00%	23.3	\$ 92,470	100.0%
N21	0.50%		1.50%			17.6	\$ 99,610	107.7%
N22			2.00%			18.8	\$ 94,624	102.3%
N25	0.50%			1.50%		18.2	\$ 98,447	106.5%
N26				2.00%		19.6	\$ 93,506	101.1%
N30		0.50%	1.50%			18.1	\$ 103,580	112.0%
N32		1.00%		1.00%		18.3	\$ 108,755	117.6%
N33		0.50%		1.50%		18.7	\$ 101,984	110.3%
N34					2.00%	26.5	\$ 113,593	122.8%





**Ilustración 5-15.** Relación costo beneficio a flexión para las probetas de UHPFRC con endurecimiento por deflexión.

Ahora, si el objetivo de una estructura es resistir un máximo esfuerzo a flexión al menor costo de reforzamiento posible, las micro-fibras metálicas son adecuadas en dosificaciones del 1% en volumen (mezcla N17), como también lo son, las mezclas reforzadas con macro-fibras de polipropileno en dosificaciones del 2% en volumen (mezcla N26). Sin embargo, esto no quiere decir que estas mezclas tienen la mayor capacidad de absorción de energía o tenacidad.

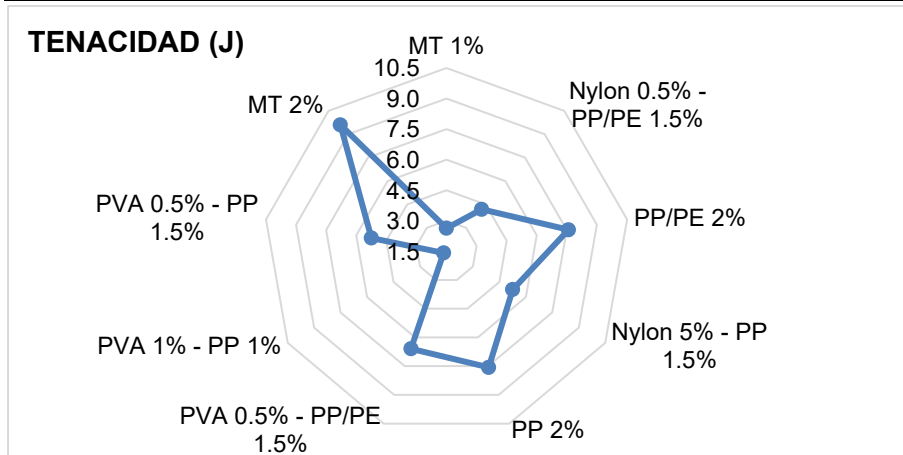
En cuanto al costo beneficio por capacidad de absorción de energía o tenacidad del UHPFRC, las probetas reforzada con 2% de macro-fibras poliméricas sobresalen (mezclas N22 y N26). Dado que estas probetas reforzadas con macro-fibras poliméricas corresponden a las que mayor tenacidad desarrollan, razón por la cual tienen el menor

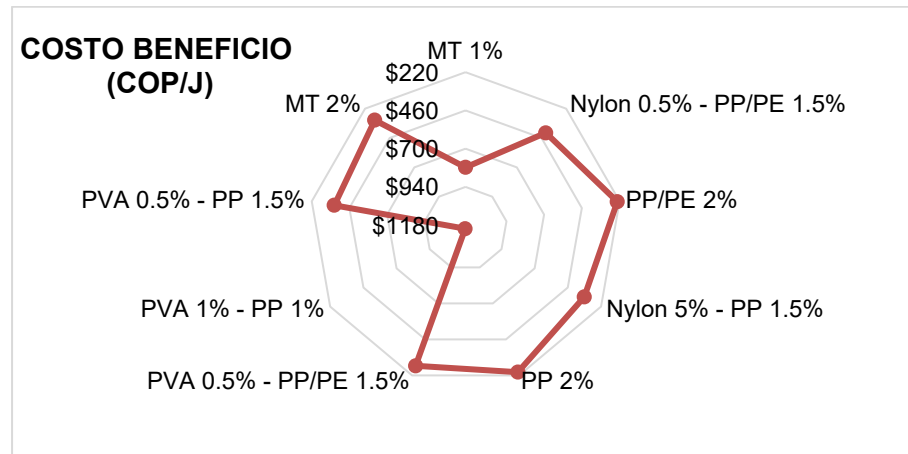
costo por unidad de energía absorbida. Cabe resaltar que las probetas reforzadas con micro-fibras metálicas al 1% en volumen y las probetas reforzadas con 1% de micro-fibras y 1% macro-fibras poliméricas en volumen, tienen la más deficiente relación costo beneficio en cuanto a tenacidad se refiere. Esto reitera que para un concreto de ultra altas prestaciones reforzado con fibras no es representativo la máxima resistencia a flexión sino la tenacidad que puede desarrollar el material post-fisuración.

En la **Tabla 5-26** e **Ilustración 5-16** se puede observar la relación costo beneficio de las probetas que presentaron endurecimiento por deflexión en la investigación. Las probetas N22 fueron las que mejor relación costo beneficio presentaron, por esta razón, se establecieron como punto de referencia para comparar el costo beneficio por tenacidad de las demás probetas.

**Tabla 5-26.** Evaluación de costos de las mejores mezclas de UHPFRC por tenacidad.

ENERGÍA								
MEZCLA	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - $V_f$					$g_{MOR}$ (J)	COSTO COP/J	RELACIÓN %
ID	Nylon mF1	PVA mF2	PP/PE MF1	PP MF2	MT mFOL			
N17					1.00%	2.6	\$ 817,126	348.5%
N21	0.50%		1.50%			4.2	\$ 418,053	178.3%
N22			2.00%			7.6	\$ 234,457	100.0%
N25	0.50%			1.50%		5.3	\$ 340,713	145.3%
N26				2.00%		7.6	\$ 241,924	103.2%
N30		0.50%	1.50%			6.6	\$ 283,565	120.9%
N32		1.00%		1.00%		1.7	\$ 1,196,835	510.5%
N33		0.50%		1.50%		5.2	\$ 364,048	155.3%
N34					2.00%	9.6	\$ 313,730	133.8%





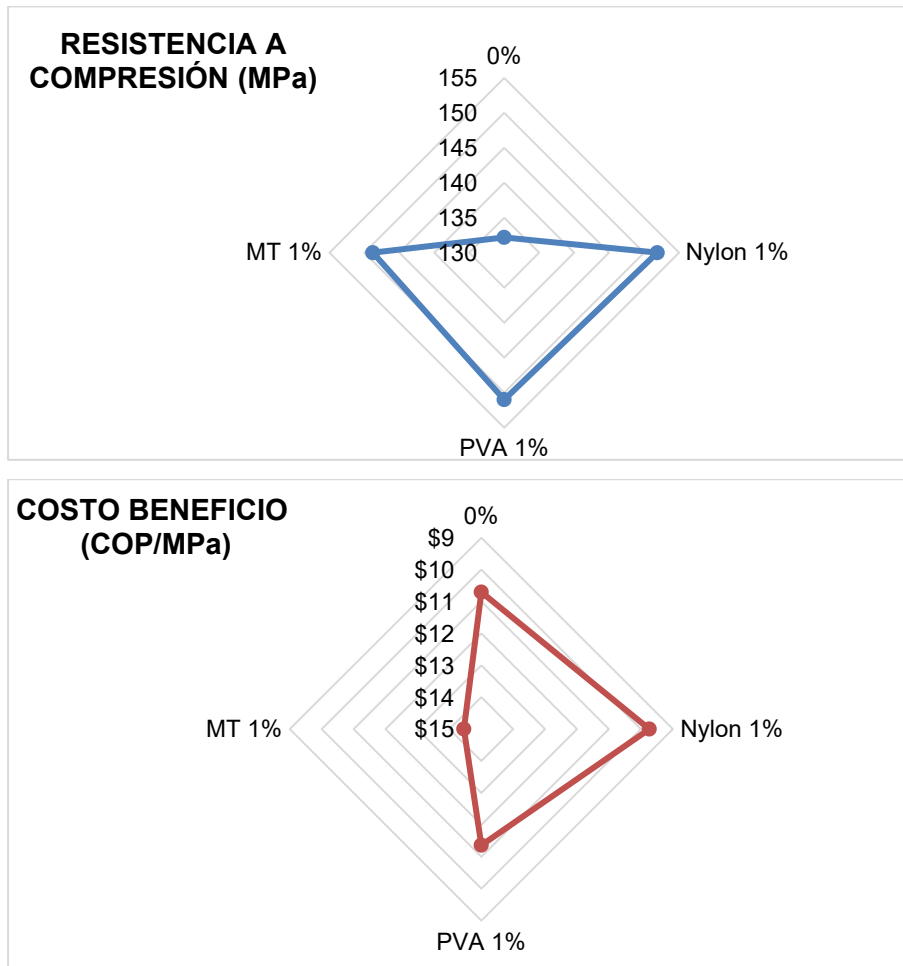
**Ilustración 5-16.** Relación costo beneficio por tenacidad para las probetas de UHPFRC con endurecimiento por deflexión.

Los resultados también permiten evidenciar que las probetas reforzadas con micro-fibras metálicas al 2% en volumen, presentaron la máxima absorción de energía. Sin embargo, el costo por unidad de energía absorbida es un 34% superior al costo por unidad de energía absorbida de las probetas reforzadas con 2% de micro-fibras de polipropileno que presentaron mayor eficiencia (mezcla N22).

El incremento del costo por metro cubico de UHPFRC en las mezclas reforzadas con fibras metálicas es notable, si se compara con el costo de las mezclas reforzadas con fibras poliméricas con igual volumen de fibras. Esta comparación es válida para la resistencia a compresión, dado que los resultados indican que las probetas reforzadas con 1% de micro-fibras poliméricas en volumen, presentan resistencias similares a las obtenidas por las probetas reforzadas con micro-fibras metálicas. Es decir, las mezclas de UHPFRC reforzadas con 1% de micro-fibras de nylon y PVA son 48 y 32%, respectivamente, más económicas que la mezcla reforzada con 1% de micro-fibras metálicas, para una resistencia a la compresión promedio de 137 MPa, como se puede apreciar en la **Tabla 5-27 e Ilustración 5-17**.

**Tabla 5-27.** Evaluación de costos de las mejores mezclas de UHPFRC a compresión.

COMPRESIÓN								
MEZCLA	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - $V_f$					$f'_c$	COSTO	RELACIÓN
ID	Nylon	PVA	PP/PE	PP	MT	(MPa)	COP/MPa	%
	mF1	mF2	MF1	MF2	mFOL			
N0						132.2	\$ 10,707	110.0%
N1	1.00%					151.9	\$ 9,733	100.0%
N10		1.00%				151.0	\$ 11,362	116.7%
N17					1.00%	148.8	\$ 14,452	148.5%

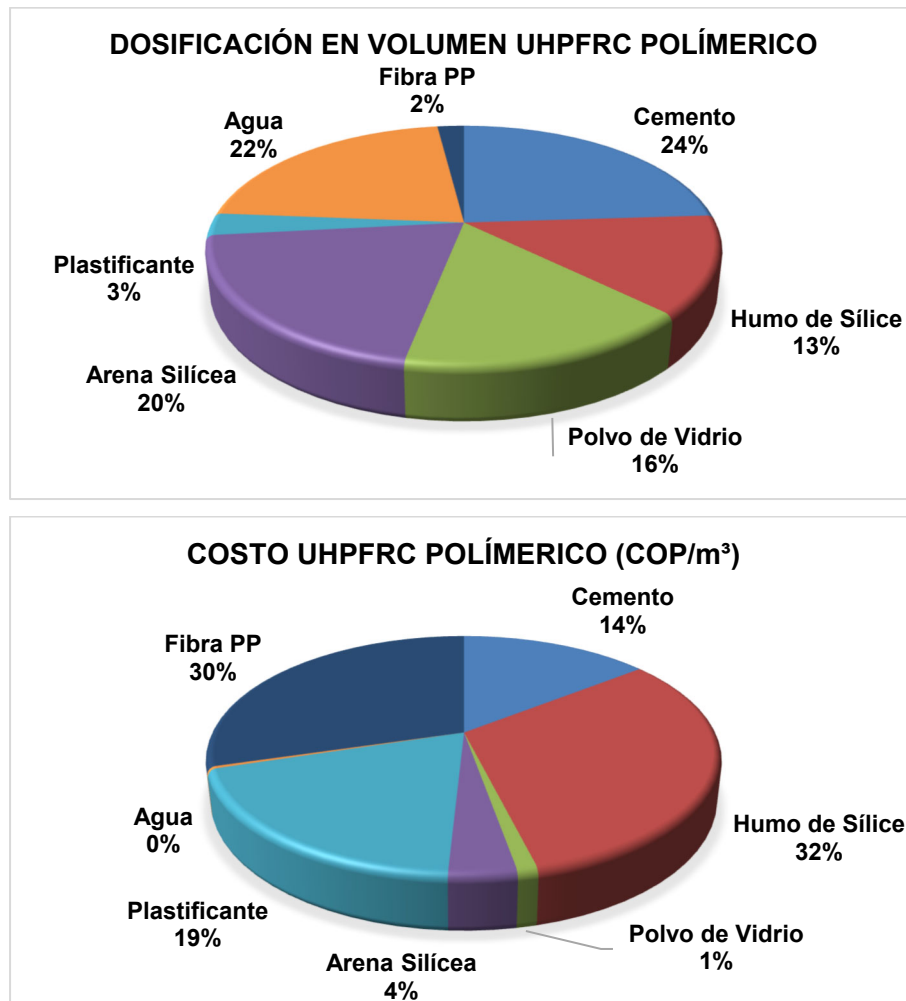


**Ilustración 5-17.** Relación costo beneficio a compresión para las probetas de UHPFRC con mayor resistencia.

Los resultados permiten evidenciar que no es rentable adicionar micro-fibras de PVA o metálicas a la mezcla de UHPC para obtener mejor rendimiento a compresión, dado que la relación entre el costo y la resistencia a compresión del UHPFRC reforzado con estas micro-fibras es superior al costo beneficio del UHPC a compresión. En cambio, incorporar

micro-fibras de nylon en altas dosificaciones puede contribuir a la resistencia a compresión, dado que la relación entre el costo y la resistencia a compresión del UHPFRC reforzado con micro-fibras de nylon es inferior un 10% al costo beneficio del UHPC a compresión.

Finalmente, después de realizar los análisis comparativos técnico económicos se puede evidenciar que las fibras poliméricas que mejores prestaciones aportan a la matriz de UHPC, en cuanto a manejabilidad, resistencia a flexión, deflexión, tenacidad, índice de ductilidad y costo, corresponde a las macro-fibras de polipropileno al 2% en volumen. En la **Ilustración 5-18** se puede apreciar la dosificación y costo de la mejor mezcla de UHPFRC con fibras poliméricas.



**Ilustración 5-18.** Dosificación y costo de la mejor mezcla de UHPFRC reforzada con fibras poliméricas. Costo \$1.829.978 COP/m³. Contenido de macro-fibras de polipropileno al 2%.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en el proyecto de investigación se presentan las siguientes conclusiones:

- La incidencia de las micro-fibras metálicas en la reducción del flujo estático y trabajabilidad de la mezcla es mínima, debido a que el acero no absorbe agua. Sin embargo, en altas dosificaciones (2%) el área expuesta y la dispersión de fibras aumenta lo que genera reducciones mínimas en el flujo.
- La reducción del flujo estático en las mezclas de UHPFRC, es significativo en combinaciones con altas concentraciones de micro-fibras y mínimo en mezclas con altas concentraciones de macro-fibras poliméricas, debido a que las micro-fibras de nylon y PVA son hidrofílicas y, las macro-fibras de polipropileno son hidrófobas. No obstante, las macro-fibras fibriladas en altas concentraciones presentan segregación y sangrado en la mezcla debido al fuerte enlace entre las fibrillas.
- Las probetas de UHPFRC con 2% de macro-fibras de polipropileno (PP) en volumen, presentaron el mejor desempeño a flexión de los especímenes reforzados con fibras poliméricas, el módulo de rotura fue ( $f_{MOR} = 19.6 \text{ MPa}$ ). Sin embargo, esta resistencia a flexión es un 19 y 35% inferior a la alcanzada por las probetas de UHPFRC reforzadas con 1 o 2% de micro-fibras metálicas, respectivamente.
- La energía absorbida por las probetas de UHPFRC reforzadas con 1.5 o 2% de macro-fibras poliméricas en volumen, ( $g_{MOR} = 6.1 \text{ J}$ ), corresponde al 57% de la energía

absorbida por las probetas de UHPFRC reforzadas 2% de micro-fibras metálicas en volumen.

- Las probetas reforzadas con 0.75 o 1% de micro-fibras poliméricas en volumen, alcanzaron un 14% más de resistencia a la compresión en comparación a las probetas de UHPC. Además, esta resistencia es similar a la observada en probetas de UHPFRC reforzadas con micro-fibras metálicas al 1 o 2% en volumen.
- Las probetas de UHPFRC reforzadas con 2% de macro-fibras poliméricas tienen la mejor relación costo beneficio por energía absorbida, en relación a todas las probetas que presentaron endurecimiento por deflexión. Asimismo, las probetas de UHPFRC reforzadas con solo 1% de micro-fibras de nylon tienen la mejor relación costo beneficio por resistencia a compresión, en comparación a todas las probetas analizadas, incluso supera la relación costo beneficio del UHPC en un 10%.
- La mezcla de UHPFRC reforzada con 2% de macro-fibras de polipropileno presentó las mejores propiedades en estado fresco, estado endurecido y su costo es un 39% inferior al costo de la mezcla de UHPFRC reforzada con 2% de micro-fibras metálicas.
- El efecto de la combinación de micro y macro fibras poliméricas en el comportamiento a flexión del UHPFRC es positivo para las probetas con 1.5 o 2% de macro-fibras de polipropileno y/o polietileno en volumen.

## 6.2 Recomendaciones

A continuación, se presentan una serie de recomendaciones que pueden servir para profundizar o fortalecer algunos de los aspectos desarrollados en la presente investigación o que sirvan de referencia para emprender nuevas investigaciones en UHPFRC reforzado con fibras poliméricas:

- Los UHPFRC reforzados con fibras poliméricas pueden tener una aplicabilidad con resultados excelentes en cuanto a durabilidad, estética, ductilidad y resistencia en pisos industriales susceptibles a presencia de ácidos, plataformas de puertos

marítimos, rompe olas, losas de pavimentos rígidos para aeropuertos, vías de primer orden que sean susceptibles a temperaturas bajo cero, canales de aguas residuales, plantas de tratamiento de agua, elementos de alta seguridad, entre otros.

- Evaluar el comportamiento a flexión con probetas de otras dimensiones, donde la sección transversal y longitudinal de las probetas sean de mayor tamaño a las empleadas en esta investigación, con el propósito de reducir la tendencia que presentan las macro-fibras a alinearse en el sentido longitudinal de la probeta, esta condición no permite simular de forma adecuada el reforzamiento interno que proporcionarían las macro-fibras en grandes volúmenes de UHPFRC.
- Correlacionar los resultados obtenidos para resistencia a compresión, con probetas cilíndricas con esbeltez 1:2 y, para resistencia a flexión, con viguetas de 150 x 150 x 500 mm cargadas en el tercio medio; dado que en Colombia las normas, las especificaciones y el control de calidad del concreto, se hace con esta geometría.
- Para profundizar en el comportamiento a flexión del UHPFRC reforzado con fibras poliméricas se puede establecer que el contenido mínimo de macro-fibras sea de 1.5% en volumen, dosificación con la cual se obtuvieron resultados sobresalientes a flexión en la presente investigación. Es importante resaltar que para altas dosificaciones de fibras poliméricas se requiere un diseño de mezcla particular por cada dosificación, dado que el flujo y la trabajabilidad de la mezcla se reducirían notablemente.
- Es importante desarrollar investigaciones con otros materiales cementantes suplementarios y macro-fibras de producción nacional que permitan optimizar costos en las mezclas de UHPFRC.
- Es primordial desarrollar investigaciones enfocadas en analizar los efectos de las combinaciones híbridas de fibras poliméricas en UHPFRC ante esfuerzos de corte y torsión. Los cuales podrían llegar a ser muy satisfactorios debido al reforzamiento tridimensional que presenta este compuesto.



- A pesar de que el UHPFRC aún no está normalizado en Latinoamérica, es importante desarrollar mediante análisis numéricos por elementos finitos diseños y reforzamientos estructurales con UHPFRC que permitan establecer parámetros y criterios de diseño, y a su vez promuevan la implementación de este material en los reglamentos de construcción.



## Bibliografía

- Abellán, J. (2019). *Base de datos ensayos UHPFRC*.
- Abellán, J. (2020). Four-layer perceptron approach for strength prediction of UHPC. *Construction and Building Materials*, 256.
- Abellán, J., Fernández, J., Torres, N., & Núñez, A. (2020). Statistical optimization of Ultra-High-Performance Glass Concrete. *ACI Materials Journal*, 117, 243–254.
- Abellán, J., Santofimio, M., & Torres, N. (2019). Analysis of metakaolin as partial substitution of ordinary Portland cement in Reactive Powder Concrete. *Advances in Civil Engineering Materials*, 6–82.
- Abellán, J., Torres, N., Fernández, J., & Núñez, A. (2019). Effect of FC3R on the properties of ultra-high-performance concrete with recycled glass. *Dyna*, 86(211), 84–93.
- Abellán, J., Torres, N., Núñez, A., & Fernández, J. (2018a). Concretos de muy altas prestaciones reforzados con fibras: estado del arte, aplicaciones y posibilidades en el mercado latinoamericano. *XXXVIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*.
- Abellán, J., Torres, N., Núñez, A., & Fernández, J. (2018b). Influencia del exponente de Fuller, la relación agua conglomerante y el contenido en policarboxilato en las propiedades de concretos de muy altas prestaciones. *19 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, Ccd*, 1–16.
- Abellán, J., Torres, N., Núñez, A., & Fernández, J. (2018c). "Ultra high performance fiber reinforced concrete: state of the art, applications and possibilities into the latin american market." *XXXVIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*.
- Acero, J. P. (2017). Evaluación del uso combinado de fibras metálicas y sintéticas como refuerzo del concreto aplicado al soporte y revestimiento de túneles. In *Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- ACI Committe 239R. (2018). Ultra-high-performance concrete: An emerging technology report. *American Concrete Institute*.
- ACI Committe 544. (2002). State of the art Report on fiber reinforced concrete Reported (ACI 544.1R-96 Reapproved 2002). *American Concrete Institute*, 96(Reapproved), 66.
- AFGC. (2013). Scientific and technical document on recommendations for ultra high performance fibre-reinforced concrete. *Association Francaise de Genie Civil*.
- Andreasen, A., & Andersen, J. (1930). Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). *Kolloid-Zeitschrift*, 50(3), 217–228.

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS. (1997). Reglamento Colombiano de Construcción Sísmica Resistente NSR-10. In *Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS: Vol. Título C-*.
- Asociación Española de Normalización. (2018). Métodos de ensayo de cementos Parte 1: Determinación de resistencias. *UNE-EN 196-1*, 1–40.
- ASTM International. (2000). ASTM C1240 – 05 Standard Specification for silica fume used in cementitious mixtures. *ASTM International*, 4(2), 1–6.
- ASTM International. (2013a). ASTM C1017 / C1017M-13e1, Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete. *ASTM International*.
- ASTM International. (2013b). ASTM C1437 - Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. *ASTM International*, 1–2.
- ASTM International. (2014). Medición del tamaño de partículas de materiales en polvo. *ASTM International*.
- ASTM International. (2019). ASTM C494 / C494M-19, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. *ASTM International*.
- Banthia, N., & Mindess, S. (1995). *Fiber Reinforced Concrete Modern Developments. Vancouver: The University of British Columbia*.
- Behloul, M., Bernier, G., & Cheyrezy, M. (1996). Tensile behavior of reactive powder concrete (RPC). *4th International Symposium on Utilization of HSC*.
- Bekaert. (2019). *Dramix OL 13/20*. [www.bekaert.com/doc/Dramix\\_OL](http://www.bekaert.com/doc/Dramix_OL)
- Bentur, A., & Mindess, S. (1990). *Fibre reinforced cementitious composites*. Taylor & Francis Group.
- Bornemann, R., & Faber, S. (2004). UHPC with steel- and non-corroding high-strength polymer fibres under static and cyclic loading. *Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*.
- Camacho, E. (2013). *Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties*.
- Camargo, N. R. (2015). La ceniza de cascarilla del arroz como aporte a la resistencia de del concreto hidráulico. *Revista Orinoquía, Ciencia y Sociedad*, 33–38.
- Ceccato, D. M., Masuero, A. B., Moraes, C. A. M., & Vilela, A. C. F. (2009). Reciclaje de escoria granulada de fundición (EGF) como sustitución de parte del cemento en hormigón. *Revista Matéria (Rio de Janeiro)*, 14(1), 737–748.
- Cordero, 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. *Universidad Politécnica de Valencia*, 107.
- Detwiler, R. J., & Mehta, P. K. (1989). Chemical and physical effects of silica fume on the mechanical behavior of concrete. *ACI Materials Journal*, 86(6), 609–614.
- Dili, A. S., & Sunthanam, M. (2004). Investigations on reactive powder concrete: A developing ultra high-strength technology. *Indian Concrete Journal*.
- Elasto Plastic Concrete. (2010). *Ficha técnica Barchip 48*.
- Euclid - Toxement. (2011). Tuf Strand SF - Fibras sintéticas estructurales. *Euclid - Toxement*. [www.toxement.com.co](http://www.toxement.com.co)

- Euclid - Toxement. (2017). Plastol 7500 Ultra. *Euclid - Toxement*. [www.toxement.com.co](http://www.toxement.com.co)
- Ferdosian, I., Camões, A., & Ribeiro, M. (2017). High-volume fly ash paste for developing ultra-high performance concrete (UHPC). *Ciencia e Tecnologia Dos Materiais*, 29(1), e157–e161.
- Forgeron, D., & Omer, A. (2010). Flow characteristics of macro-synthetic fiber-reinforced self-consolidating concrete. *American Concrete Institute*.
- Funk, J. E., & Dinger, D. R. (1994). Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions. In *Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions*.
- Geng, Y., & Leung, C. K. Y. (1996). A microstructural study of fibre/mortar interfaces during fibre debonding and pull-out. *Journal of Materials Science*, 31(5), 1285–1294.
- Ghafari, E., Costa, H., & Júlio, E. (2014). RSM-based model to predict the performance of self-compacting UHPC reinforced with hybrid steel micro-fibers. *Construction and Building Materials*, 66, 375–383.
- Graybeal, B., & Davis, M. (2014). Cylinder or cube: strength testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *ACI Materials Journal*.
- Grünwald, S., & Walraven, J. C. (2001). Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(12), 1793–1798.
- Gutiérrez, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mecánica de Materiales*. In *Pearson Education, Inc* (8va Edición). Pearson Education.
- Hu, J., & Stroeven, P. (2004). Properties of the interfacial transition zone in model concrete. *Interface Science*, 12(4), 389–397.
- Huaquisto, S., & Belizario, G. (2018). Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 20(2), 255–234.
- ICONTEC. (1982). *Norma técnica colombiana NTC 121. Ingeniería civil y arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones físicas y mecánicas*.
- ICONTEC. (2001). *Norma técnica colombiana NTC 3459. Concretos. Agua para la elaboración de concreto*.
- Jihad, A., Rami, H., Aghajan, J., Lecturer, S., & Candidate, P. (2019). Flexural and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete-American Standard Specifications Review. *GRD Journals-Global Research and Development Journal for Engineering*, 4(3).
- JSCE. (2006). Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft). *Japan Society of Civil Engineers*.
- Katrin, H. (2003). *Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPRFC) and reinforced concrete*.
- Kim, D. J., El-Tawil, S., & Naaman, A. (2008). Loading rate effect on pullout behavior of deformed steel fibers. *ACI Materials Journal*, 105(6), 576–584.
- Kim, D. J., Naaman, A., & El-Tawil, S. (2008a). High tensile strength strain-hardening FRC composites with less than 2% fiber content. In *Structural Materials and Engineering*

- Series* (Second Int, pp. 169–176). University of Kassel, Germany.
- Kim, D. J., Naaman, A., & El-Tawil, S. (2008b). Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 917–928.
- Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S., & Koh, K. (2011). Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4144–4155.
- Li, V., Wang, S., & Wu, C. (2001). Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). *ACI Materials Journal*.
- Li, V., Wang, Y., & Backer, S. (1990). Effect of inclining angle, bundling, and surface treatment on synthetic fiber pull-out from a cement matrix. *Massachusetts Institute of Technology*.
- Li, V., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A., & Saito, T. (2011). Interface tailoring for strain-hardening PVA-ECC. *ACI Materials Journal*.
- Machuca, A. F., & Sarmiento, P. A. (2016). Evaluación del potencial de capacidad de disipación de energía en vigas en voladizo con UHPC sometidas a cargas cíclicas. *Pontificia Universidad Javeriana*, 3(1), 56.
- Markovic, I. (2006). *High-performance Hybrid-fibre Concrete: Development and Utilisation*. DUP Science.
- Mazanec, O., Lowke, D., & Schiel, P. (2010). Mixing of high performance concrete: Effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 43(3), 357–365.
- Ministerio de Fomento. (2010). *EHE-08 Instrucción de Hormigon Estructural* (Ministerio de Fomento (España) (ed.); 4 Edición).
- Naaman, A., & Najm, H. (1991). Bond-slip mechanisms of steel fibers in concrete. *ACI Materials Journal*, 88(2), 135–145.
- Naaman, A., & Reinhardt, H. W. (2003). Setting the stage, toward performance based classification of FRC composites. *Proceedings of 4th RILEM Symposium on High Performance Fiber Reinforced Cement, Composites*.
- Naaman, A., & Reinhardt, H. W. (2006). Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. *Materials and Structures*.
- Naaman, A., & Wille, K. (2010). Some correlation between high packing density, ultra-high performance, flow ability, and fiber reinforcement of a concrete matrix. *Congr. Ibérico Sobre Betão Auto-Compactável*.
- Naaman, A., & Wille, K. (2012). The path to ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC): Five decades of progress. *3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for Construction Materials*.
- NF P 18-470. (2016). Bétons bétons fibrés à ultra hautes performances — Spécification, performance, production et conformité. *ANFOR*.
- Nguyen, E., & Vidal, T. (2015). Low cost ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) with flash metakaolin. *Key Engineering Materials*.
- O'Connell, S. (2011). *Development of a new high performance synthetic fiber for concrete*

- reinforcement* (Issue July). Dalhousie University Halifax, Nova Scotia.
- Osorio, J. D. (2010). *Concreto y cemento: Historia* | ARGOS 360.
- Park, J. S., Kim, Y. J., Cho, J. R., & Jeon, S. J. (2015). Early-age strength of ultra-high performance concrete in various curing conditions. *Open Access Materials*, 8(8), 5537–5553.
- Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S., & Koh, K. T. (2012). Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 172–184.
- Pereira, E. N. B., Barros, J. A. O., & Camões, A. (2008). Steel fiber-reinforced self-compacting concrete: Experimental research and numerical simulation. *Journal of Structural Engineering*, 134(8), 1310–1321.
- Pérez, M. A. (2014). *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación* (M. A. Pérez (ed.)). OmniaScience.
- Perry, V. H., & Seibert, P. (2013). Fifteen years of UHPC construction experience in precast bridges in North America. *Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*.
- Perry, V. H., White, P., & Ahlborn, M. (2016). The first North American broad based structural design guide on UHPC – ACI 239C. *First International Interactive Symposium on UHPC – 2016*.
- Reda, M. M., Shrive, N. G., & Gillott, J. E. (1999). Microstructural investigation of innovative UHPC. *Cement and Concrete Research*, 29(3), 323–329.
- Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501–1511.
- Sahmaran, M., & Yaman, I. O. (2007). Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash. *Construction and Building Materials*, 21(1), 150–156.
- Sanjuán, M. A., & Chinchón, S. (2006). Introducción a la fabricación y normalización del Cemento Portland. In *Nucleic Acids Research* (Vol. 34, Issue 11).
- Scheydt, J., & Müller, H. (2012). Microstructure of Ultra High Performance Concrete (UHPC) and its Impact on Durability. *3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for Construction Materials*.
- Scrivener, K. L., Crumbie, A. K., & Laugesen, P. (2004). The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface Science*, 12(4), 411–421.
- Security, D. of H. (2011). *Ultra High Performance Concrete - Pathway to Commercialization*.
- Serna, P., Lopez, J. A., & Camacho, E. (2012). UHPFRC: De los componentes a la estructura. *Ibracon 2013*, 1, 1–21.
- Shafieifar, M., Farzad, M., & Azizinamini, A. (2017). Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, 156(December 2017), 402–411.
- Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., & Fang, Z. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*, 101(December), 741–751.

- Skazlić, M., Bjegović, D., & Serdar, M. (2008). Influence of test specimen geometry on compressive strength of ultra high performance concrete. *Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*.
- Soliman, N. A., & Tagnit-Hamou, A. (2017a). Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap. *Construction and Building Materials*, 139, 374–383.
- Soliman, N. A., & Tagnit-Hamou, A. (2017b). Using glass sand as an alternative for quartz sand in UHPC. *Construction and Building Materials*, 145, 243–252.
- Spasojevic, A. (2006). Possibilities of innovation in bridge design. *École Polytechnique Fédérale de Lausanne*.
- Suter, R., Moreillon, L., Clergue, C., & Racordon, R. (2011). Using UHPFRC for complex facade elements. *Designing and Building with UHPFRC - State of the Art and Development. London*, 405–419.
- The European Project Group. (2005). The european guidelines for self-compacting concrete. Specification, production and use. *EFNARC*. [www.efnarc.org](http://www.efnarc.org)
- Trezza, M. A., & Rahhal, V. F. (2018). Comportamiento del residuo de vidrio molido en cementos mezcla: Estudio comparativo con microsilice. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23(1).
- Trottier, J., & Mahoney, M. (2001). Innovative synthetic fibers. *American Concrete Institute*.
- Trottier, J., Mahoney, M., & Forgeron, D. (2002). Can synthetic fibers replace welded-wire mesh in slabs-on-ground? *American Concrete Institute*.
- Vaitkevičius, V., Šerelis, E., & Hilbig, H. (2014). The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 68, 102–109.
- Van Tuan, N., Ye, G., & Van Breugel, K. (2012). Mitigation of early age shrinkage of Ultra High Performance Concrete by using Rice Husk Ash. *3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for Construction Materials*.
- Van Tuan, N., Ye, G., Van Breugel, K., Fraaij, A. L. A., & Bui, D. D. (2011). The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 25(4), 2030–2035.
- Walraven, J. C. (2009). High performance fiber reinforced concrete: progress in knowledge and design codes. *Materials and Structures*.
- Wang, D., Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Huang, Z., & Fang, Z. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. *Construction and Building Materials*, 96(August 2015), 368–377.
- Wang, Y., Li, V., & Backer, S. (1988). Modelling of fibre pull-out from a cement matrix. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 10(3), 143–149.
- Wille, K., El-Tawil, S., & Naaman, A. (2014). Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. *Cement and Concrete Composites*, 48, 53–66.
- Wille, K., Kim, D. J., & Naaman, A. (2010). Strain-hardening UHP-FRC with low fiber



- contents. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44(3), 583–598.
- Won, J.-P., Lim, D.-H., & Park, C.-G. (2006). Bond behaviour and flexural performance of structural synthetic fibre-reinforced concrete. *Magazine of Concrete Research*, 58(6), 401–410.
- Won, J.-P., Park, C.-G., Lee, S.-W., Jang, C.-I., & Kim, H.-Y. (2009). Performance of synthetic macrofibres in reinforced concrete for tunnel linings. *Magazine of Concrete Research*, 61(3), 165–172.
- Wu, Z., Shi, C., He, W., & Wu, L. (2016). Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 103, 8–14.
- Yazici, H., Yiğiter, H., Karabulut, A. Ş., & Baradan, B. (2008). Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. *Fuel*, 87(12), 2401–2407.
- Yoo, D. Y., Kim, M. J., Kim, S. W., & Park, J. J. (2017). Development of cost effective ultra-high-performance fiber-reinforced concrete using single and hybrid steel fibers. *Construction and Building Materials*, 150, 383–394.
- 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*, 56, 29–39.
- Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2015). Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete ( UHPFRC ): Towards an efficient utilization of binders and fibres. *Construction and Building Materials*, 79, 273–282.
- Yu, R., Tang, P., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2014). A study of multiple effects of nano-silica and hybrid fibres on the properties of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) incorporating waste bottom ash (WBA). *Construction and Building Materials*, 60, 98–110.

## A. Anexo: Flujo estático

En el anexo A se presentan los cálculos correspondientes y fotografías de la medición del flujo estático para cada mezcla de UHPFRC reforzado con fibras poliméricas y micro-fibras metálicas.

El flujo estático se determinó con la siguiente ecuación:

$$\varnothing_m = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \varnothing_i$$

**Ecuación A-1**

La desviación estándar de la muestra de datos se determinó con la siguiente ecuación:

$$SD_M = \frac{100}{\varnothing_m} \times \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varnothing_i - \varnothing_m)^2}$$

**Ecuación A-2**

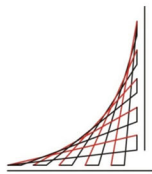
Donde:

$SD_M$  desviación estándar de la muestra en %;

$\varnothing_m$  es el diámetro promedio del flujo estático en mm;

$\varnothing_i$  es el diámetro del flujo estático en mm;

$n$  es el número de datos o diámetros.



ESCUELA  
COLOMBIANA  
DE INGENIERÍA  
JULIO GARAVITO

**Efecto de la mezcla de micro-fibras y macro-fibras poliméricas en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC**

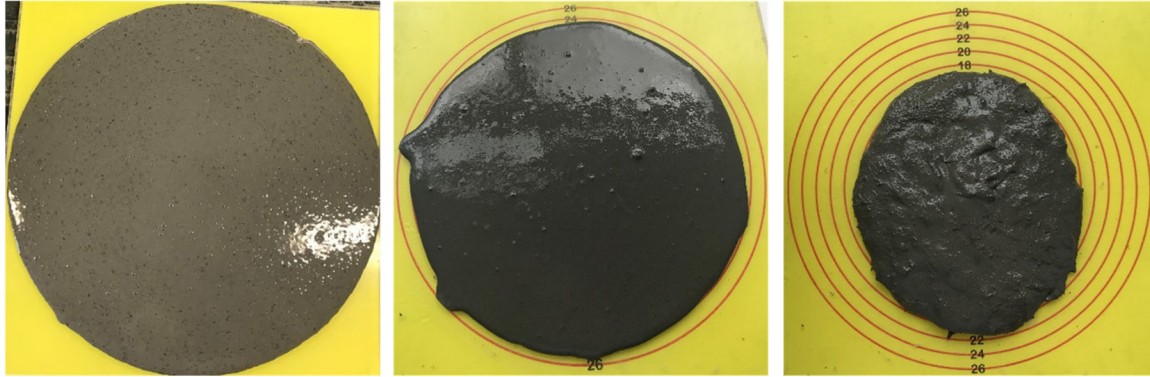
Anexo A: Cálculo del flujo estático

MEZCLA	FIBRA					DIAMETROS				FLUJO	
	Nylon	PVA	PP/PE	PP	MT	$\varnothing_1$	$\varnothing_2$	$\varnothing_3$	$\varnothing_4$	$\varnothing_m$	SD <sub>M</sub>
ID	mF1	mF2	MF1	MF2	mFOL	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)
N00						300	300	300	300	300	0.0%
N0						250	245	240	245	245	1.7%
N1	1.00%					165	190	185	180	180	6.0%
N2	0.75%		0.25%			180	175	185	185	181	2.6%
N3	0.50%		0.50%			210	170	190	190	190	8.6%
N4	0.25%		0.75%			190	185	220	180	194	9.3%
N5			1.00%			210	210	210	220	213	2.4%
N6	0.75%			0.25%		210	187	210	175	196	8.9%
N7	0.50%			0.50%		210	190	200	200	200	4.1%
N8	0.25%			0.75%		205	190	210	200	201	4.2%
N9				1.00%		220	230	235	225	228	2.8%
N10		1.00%				200	220	235	200	214	8.0%
N11		0.75%	0.25%			190	220	220	195	206	7.8%
N12		0.50%	0.50%			175	205	190	183	188	6.8%
N13		0.25%	0.75%			198	215	225	215	213	5.3%
N14		0.75%		0.25%		210	240	230	212	223	6.5%
N15		0.50%		0.50%		220	225	225	233	226	2.4%
N16		0.25%		0.75%		216	245	230	220	228	5.7%
N17					1.00%	242	232	242	233	237	2.3%
N18	2.00%					100	100	110	108	105	5.0%
N19	1.50%		0.50%			110	108	110	106	109	1.8%
N20	1.00%		1.00%			113	130	125	118	122	6.2%
N21	0.50%		1.50%			140	152	149	141	146	4.1%
N22			2.00%			145	149	155	158	152	3.9%
N23	1.50%			0.50%		120	120	125	116	120	3.1%
N24	1.00%			1.00%		138	155	164	150	152	7.1%
N25	0.50%			1.50%		175	194	205	176	188	7.8%
N26				2.00%		210	219	225	220	219	2.9%
N27		2.00%				165	195	199	178	184	8.5%
N28		1.50%	0.50%			174	165	174	169	171	2.6%
N29		1.00%	1.00%			155	160	168	155	160	3.8%
N30		0.50%	1.50%			147	146	156	149	150	3.0%
N31		1.50%		0.50%		190	207	218	185	200	7.6%
N32		1.00%		1.00%		214	187	204	204	202	5.5%
N33		0.50%		1.50%		191	232	220	212	214	8.1%
N34					2.00%	235	218	236	221	228	4.1%

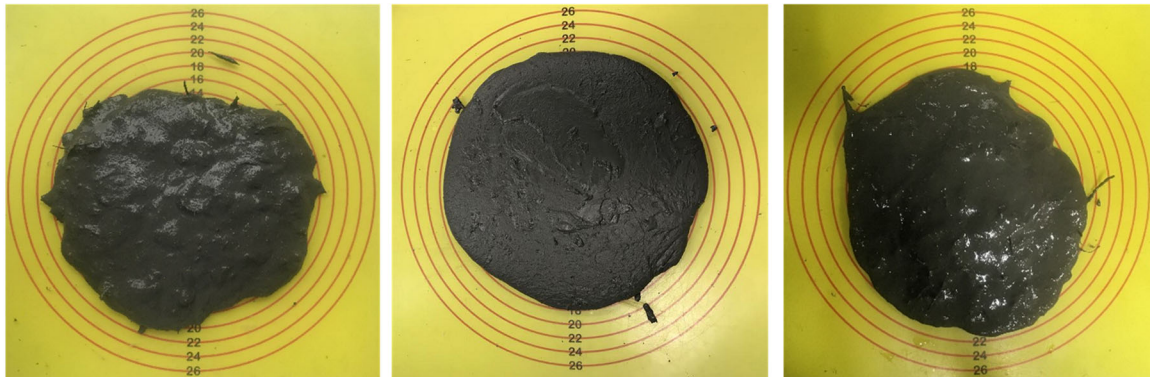


**Efecto de la mezcla de micro-fibras y macro-fibras poliméricas en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC**

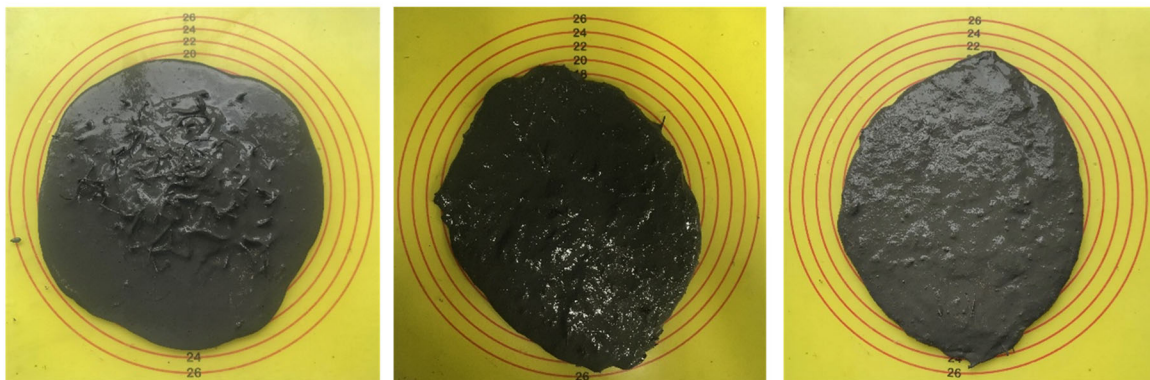
Anexo A: Fotografías del flujo estático



Mezcla N00		Mezcla N0		Mezcla N1	
Øm = 300mm	SD = 0.0%	Øm = 245mm	SD = 1.7%	Øm = 180mm	SD = 6.0%



Mezcla N2		Mezcla N3		Mezcla N4	
Øm = 181mm	SD = 2.6%	Øm = 190mm	SD = 8.6%	Øm = 194mm	SD = 9.3%



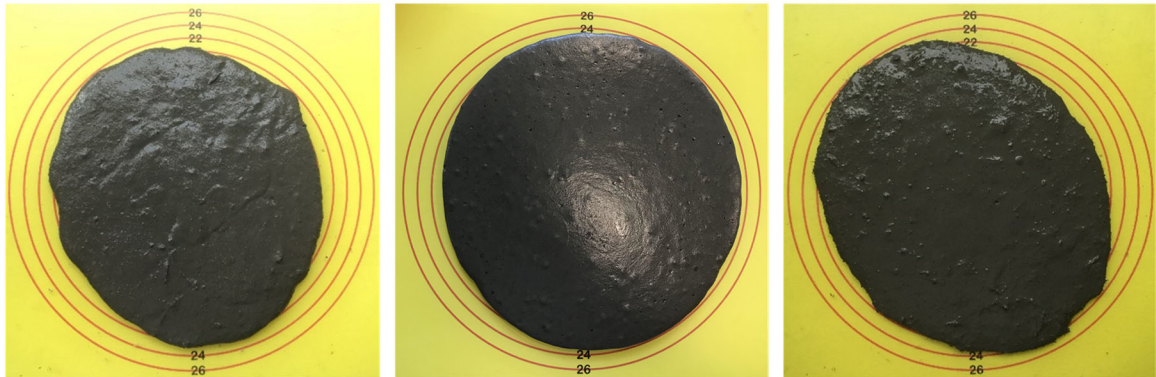
Mezcla N5		Mezcla N6		Mezcla N7	
Øm = 213mm	SD = 2.4%	Øm = 196mm	SD = 8.9%	Øm = 200mm	SD = 4.1%



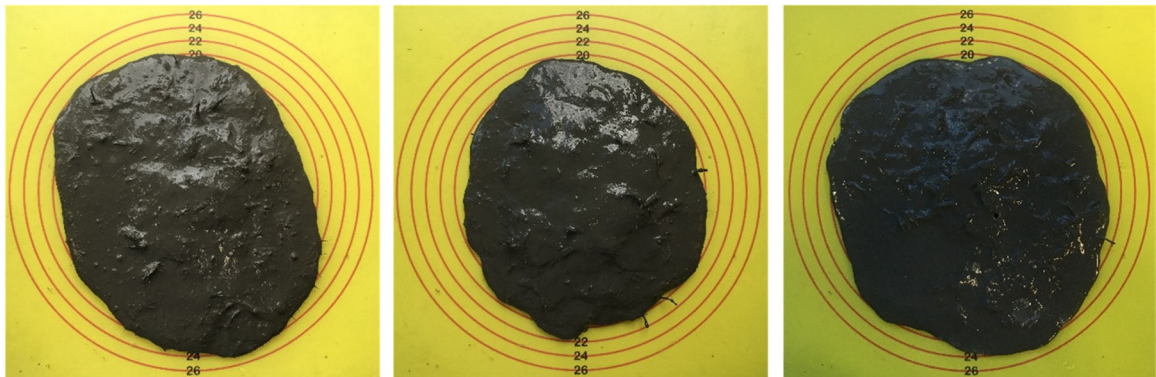


**Efecto de la mezcla de micro-fibras y macro-fibras poliméricas en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC**

Anexo A: Fotografías del flujo estático



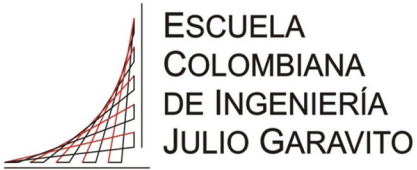
<b>Mezcla N8</b>		<b>Mezcla N9</b>		<b>Mezcla N10</b>	
$\varnothing m = 201mm$	SD = 4.2%	$\varnothing m = 228mm$	SD = 2.8%	$\varnothing m = 214mm$	SD = 8.0%



<b>Mezcla N11</b>		<b>Mezcla N12</b>		<b>Mezcla N13</b>	
$\varnothing m = 206mm$	SD = 7.8%	$\varnothing m = 188mm$	SD = 6.8%	$\varnothing m = 213mm$	SD = 5.3%

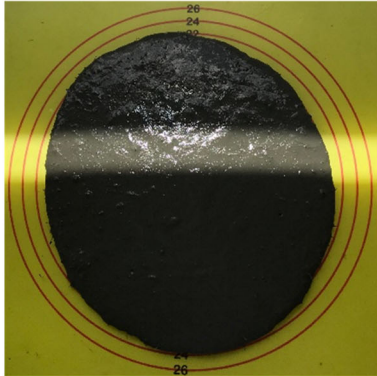


<b>Mezcla N14</b>		<b>Mezcla N15</b>		<b>Mezcla N16</b>	
$\varnothing m = 223mm$	SD = 6.5%	$\varnothing m = 226mm$	SD = 2.4%	$\varnothing m = 228mm$	SD = 5.7%

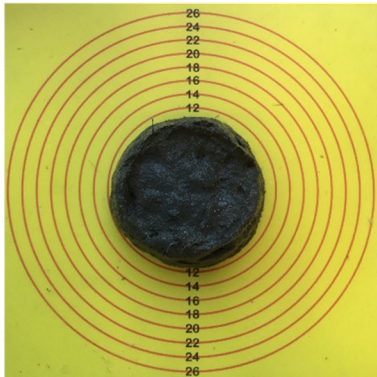


**Efecto de la mezcla de micro-fibras y macro-fibras poliméricas en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC**

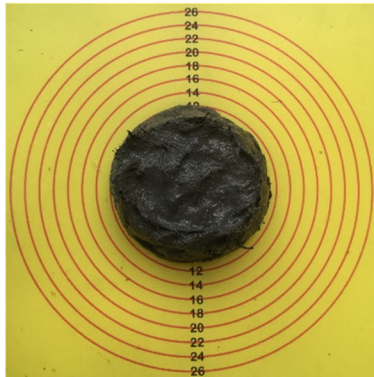
Anexo A: Fotografías del flujo estático



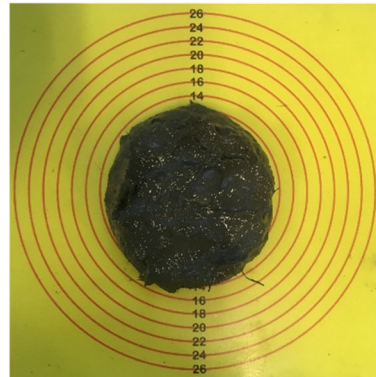
<b>Mezcla N17</b>	
$\varnothing_m = 237\text{mm}$	$SD = 2.3\%$



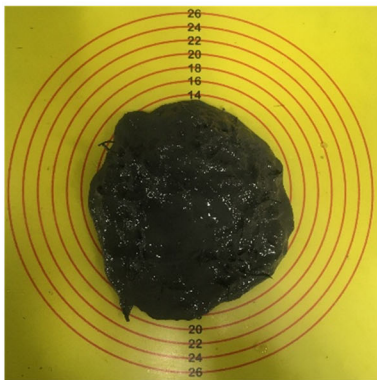
<b>Mezcla N18</b>	
$\varnothing_m = 105\text{mm}$	$SD = 5.0\%$



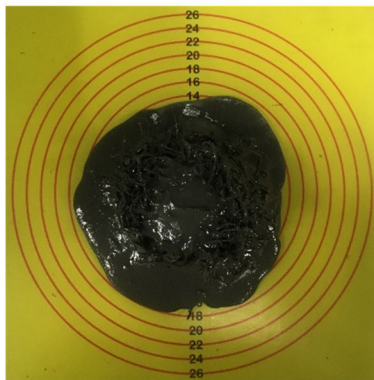
<b>Mezcla N19</b>	
$\varnothing_m = 109\text{mm}$	$SD = 1.8\%$



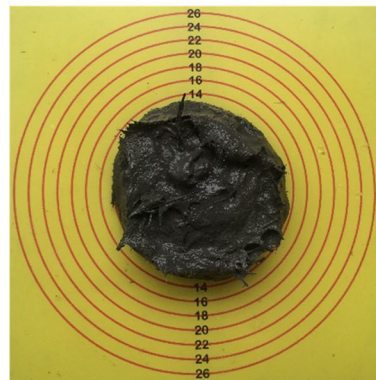
<b>Mezcla N20</b>	
$\varnothing_m = 122\text{mm}$	$SD = 6.2\%$



<b>Mezcla N21</b>	
$\varnothing_m = 146\text{mm}$	$SD = 4.1\%$



<b>Mezcla N22</b>	
$\varnothing_m = 152\text{mm}$	$SD = 3.9\%$



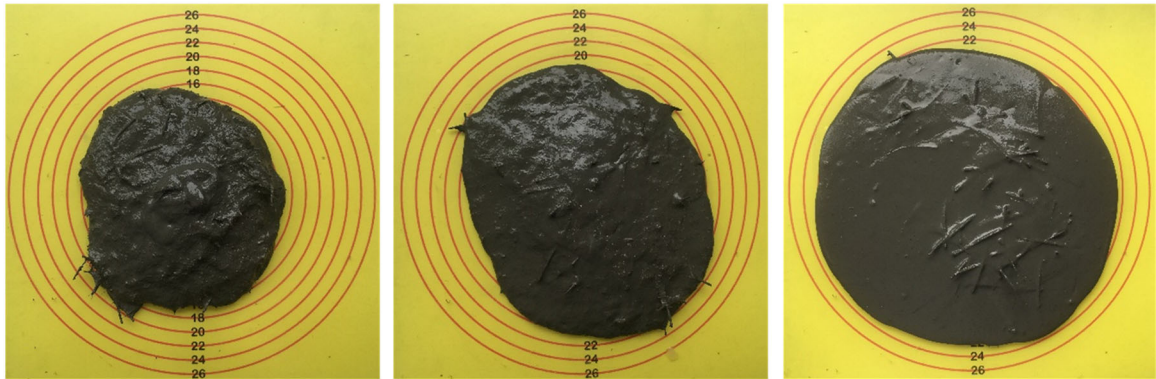
<b>Mezcla N23</b>	
$\varnothing_m = 120\text{mm}$	$SD = 3.1\%$



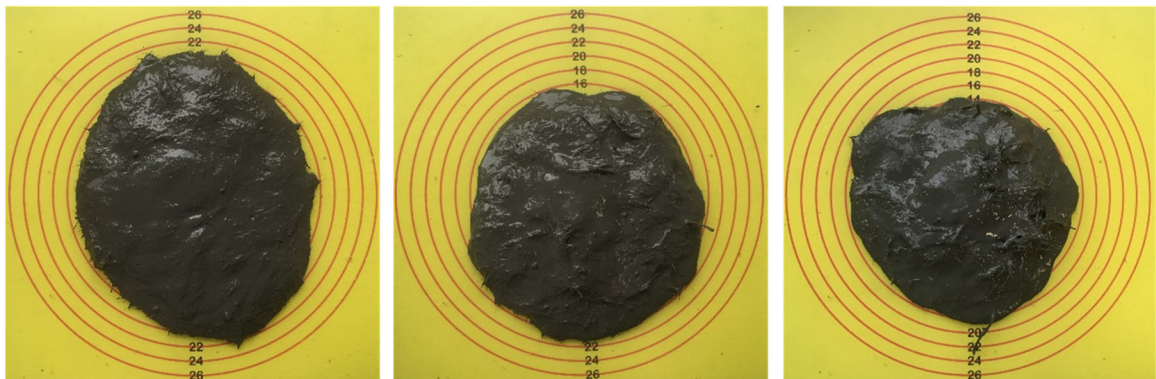


**Efecto de la mezcla de micro-fibras y macro-fibras poliméricas en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC**

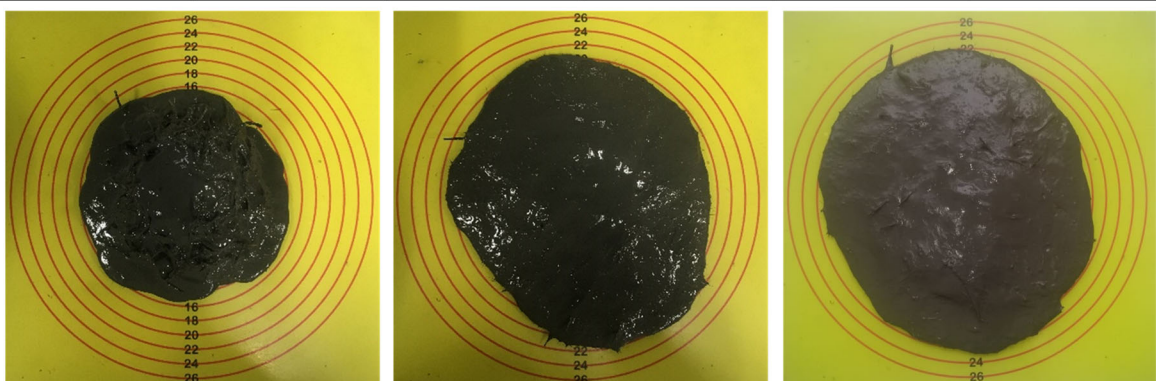
Anexo A: Fotografías del flujo estático



<b>Mezcla N24</b>		<b>Mezcla N25</b>		<b>Mezcla N26</b>	
$\varnothing m = 152mm$	SD = 7.1%	$\varnothing m = 188mm$	SD = 7.8%	$\varnothing m = 219mm$	SD = 2.9%



<b>Mezcla N27</b>		<b>Mezcla N28</b>		<b>Mezcla N29</b>	
$\varnothing m = 184mm$	SD = 8.5%	$\varnothing m = 171mm$	SD = 2.6%	$\varnothing m = 160mm$	SD = 3.8%

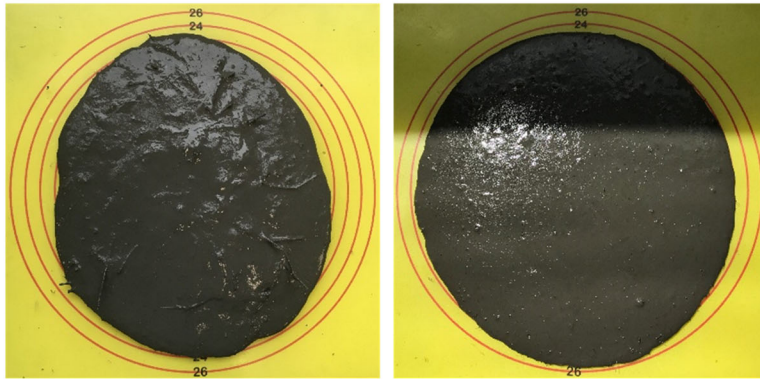


<b>Mezcla N30</b>		<b>Mezcla N31</b>		<b>Mezcla N32</b>	
$\varnothing m = 150mm$	SD = 3.0%	$\varnothing m = 200mm$	SD = 7.6%	$\varnothing m = 202mm$	SD = 5.5%



**Efecto de la mezcla de micro-fibras y macro-fibras poliméricas en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC**

Anexo A: Fotografías del flujo estático



Mezcla N33		Mezcla N34	
Øm = 214mm	SD =8.1%	Øm = 228mm	SD =4.1%



## B. Anexo: Comportamiento a flexión

En el anexo B se presentan los cálculos correspondientes a la resistencia a flexión, índices de tenacidad, factores de resistencia residual y tenacidad para cada probeta de UHPFRC reforzado con fibras poliméricas y micro-fibras metálicas.

La resistencia a flexión en tres puntos se determinó con las siguientes ecuaciones:

$$f_{LOP} = \frac{3P_{LOP}L}{2bd^2}$$

**Ecuación B-1**

$$f_{MOR} = \frac{3P_{MOR}L}{2bd^2}$$

**Ecuación B-2**

El promedio de las resistencias a flexión se determinó con las siguientes ecuaciones:

$$f_{LOP} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n f_{LOP_i}$$

**Ecuación B-3**

$$f_{MOR} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n f_{MOR_i}$$

**Ecuación B-4**

La desviación estándar de la muestra de datos se determinó con las siguientes ecuaciones:

$$SD_M = \frac{100}{f_{LOP}} \times \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_{LOP_i} - f_{LOP})^2}$$

**Ecuación B-5**

$$SD_M = \frac{100}{f_{MOR}} \times \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_{MOR_i} - f_{MOR})^2}$$

**Ecuación B-6**

Donde:

$f_{LOP}$  es la resistencia promedio a flexión asociada al límite de proporcionalidad en MPa;

$P_{LOP}$  es la carga promedio a flexión asociada al límite de proporcionalidad en N;

$f_{MOR}$  es la resistencia promedio a flexión asociada al módulo de rotura en MPa;

$P_{MOR}$  es la carga promedio a flexión asociada al módulo de rotura en N;

$L$  es la distancia entre apoyos en la disposición del ensayo en mm;

$b$  es el ancho de la probeta en mm;

$d$  es la altura de la probeta en mm;

$f_{LOP_i}$  es la resistencia a flexión asociada al límite de proporcionalidad de una probeta en MPa;

$f_{MOR_i}$  es la resistencia a flexión asociada al módulo de rotura de una probeta en MPa;

$n$  es el número de datos o probetas.

La ductilidad, tenacidad e índices de tenacidad son términos de evaluación derivados del cálculo de áreas bajo la curva de carga-deflexión. Por tal razón, por cada probeta que presente endurecimiento por deflexión se determinó el área bajo la curva que corresponde a la absorción de energía del UHPFRC, para la ductilidad se calculó el área hasta la deflexión asociada al límite de proporcionalidad  $\delta_{LOP}$  y, para la tenacidad se calculó el área hasta la deflexión asociada al módulo de rotura  $\delta_{MOR}$ . Las ecuaciones para el cálculo de estas áreas son las siguientes:

$$g_{LOP} = \sum_{i=0.00001}^{\delta_{LOP}} \left[ \frac{(P_i + P_{i+1})(\delta_{i+1} - \delta_i)}{2} \right] \quad g_{MOR} = \sum_{i=0.00001}^{\delta_{MOR}} \left[ \frac{(P_i + P_{i+1})(\delta_{i+1} - \delta_i)}{2} \right]$$

**Ecuación B-7**

**Ecuación B-8**

$$I_{MOR} = \frac{\sum_{i=0.00001}^{\delta_{MOR}} \left[ \frac{(P_i + P_{i+1})(\delta_{i+1} - \delta_i)}{2} \right]}{\sum_{i=0.00001}^{\delta_{LOP}} \left[ \frac{(P_i + P_{i+1})(\delta_{i+1} - \delta_i)}{2} \right]}$$

**Ecuación B-9**

Donde:

$g$  es la tenacidad o energía absorbida por la probeta en J;

$P_i$  es la carga a flexión en kN;

$\delta_i$  es la deflexión asociada a la carga a flexión  $P_i$  en mm;

$\delta_{LOP}$  es la deflexión asociada al límite de proporcionalidad en mm;

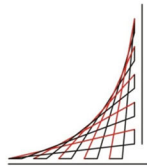
$\delta_{MOR}$  es la deflexión asociada al módulo de rotura en mm;

$\delta_n$  es la deflexión de estudio en mm;

$I_{MOR}$  es el índice de tenacidad asociado a  $\delta_{MOR}$ .







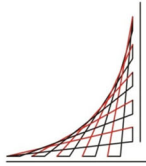
ESCUELA  
COLOMBIANA  
DE INGENIERÍA  
JULIO GARAVITO

Efecto de la mezcla de micro-fibras y macro-fibras  
poliméricas en el comportamiento a flexión y  
compresión del UHPFRC

Anexo B: Cálculo de la energía del UHPFRC

MEZCLA ID	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - Vf					RESILIENCIA				
	Nylon mF1	PVA mF2	PP/PE MF1	PP MF2	MT mFOL	g <sub>LOP 1</sub> (J)	g <sub>LOP 2</sub> (J)	g <sub>LOP 3</sub> (J)	g <sub>LOP</sub> (J)	SD <sub>M</sub> (%)
N17					1.00%	1.0	1.0	1.2	1.1	13.7%
N21	0.50%		1.50%			0.8	1.2	1.1	1.0	20.9%
N22			2.00%			1.2	1.1	1.0	1.1	9.1%
N25	0.50%			1.50%		1.0	0.8	1.0	0.9	11.2%
N26				2.00%		1.0	1.5	1.3	1.3	18.9%
N30		0.50%	1.50%			1.3	1.3	1.2	1.3	7.8%
N32		1.00%		1.00%		0.8		1.0	0.9	13.2%
N33		0.50%		1.50%		1.0	1.3	0.8	1.1	20.8%
N34					2.00%	1.6	1.4	1.5	1.5	6.4%

MEZCLA ID	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - Vf					TENACIDAD				
	Nylon mF1	PVA mF2	PP/PE MF1	PP MF2	MT mFOL	g <sub>MOR 1</sub> (J)	g <sub>MOR 2</sub> (J)	g <sub>MOR 3</sub> (J)	g <sub>MOR</sub> (J)	SD <sub>M</sub> (%)
N17					1.00%	1.9	2.2	3.9	2.6	40.6%
N21	0.50%		1.50%			4.5	3.9	4.2	4.2	7.0%
N22			2.00%			8.3	7.2	7.3	7.6	7.6%
N25	0.50%			1.50%		3.3	9.8	2.7	5.3	75.4%
N26				2.00%		6.8	7.7	8.2	7.6	9.5%
N30		0.50%	1.50%			5.2	7.5	7.1	6.6	18.4%
N32		1.00%		1.00%		1.5	-	1.8	1.7	16.1%
N33		0.50%		1.50%		2.0	6.0	7.7	5.2	56.2%
N34					2.00%	11.6	5.8	11.5	9.6	34.6%



ESCUELA  
COLOMBIANA  
DE INGENIERÍA  
JULIO GARAVITO

Efecto de la mezcla de micro-fibras y macro-fibras poliméricas en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC

Anexo B: Cálculo del índice de ductilidad del UHPFRC

MEZCLA	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - Vf					INDICE DE DUCTILIDAD				
	Nylon mF1	PVA mF2	PP/PE MF1	PP MF2	MT mFOL	I <sub>MOR 1</sub>	I <sub>MOR 2</sub>	I <sub>MOR 3</sub>	I <sub>MOR</sub>	SD <sub>M</sub> (%)
N17					1.00%	1.8	2.3	3.1	2.4	27.4%
N21	0.50%		1.50%			5.7	3.2	3.7	4.2	30.4%
N22			2.00%			6.9	6.5	7.3	6.9	5.3%
N25	0.50%			1.50%		3.2	12.0	2.7	6.0	87.3%
N26				2.00%		6.5	5.1	6.5	6.0	13.7%
N30		0.50%	1.50%			3.9	5.7	6.1	5.2	22.5%
N32		1.00%		1.00%		1.8		1.9	1.8	2.9%
N33		0.50%		1.50%		1.9	4.7	9.2	5.3	69.6%
N34					2.00%	7.4	4.2	7.6	6.4	30.0%

## C. Anexo: Resistencia a compresión

En el anexo C se presentan los cálculos correspondientes a la resistencia a compresión para cada probeta de UHPFRC reforzada con fibras poliméricas y micro-fibras metálicas.

La resistencia a compresión se determinó con la siguiente ecuación:

$$f'_c = \frac{P}{A}$$

**Ecuación C-1**

El promedio de la resistencia a compresión se determinó con la siguiente ecuación:

$$f'_c = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n f'_{ci}$$

**Ecuación C-2**

La desviación estándar de la muestra de datos se determinó con la siguiente ecuación:

$$SD_M = \frac{100}{f'_c} \times \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f'_{ci} - f'_c)^2}$$

**Ecuación C-3**

Donde:

$f'_c$  es la resistencia a la compresión en MPa;

$P$  es la carga máxima en N;

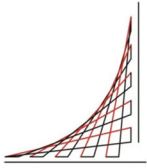
$A$  es el área del prisma en mm<sup>2</sup>.

$SD_M$  desviación estándar de la muestra en %;

$\emptyset_m$  es el diámetro promedio del flujo estático en mm;

$\emptyset_i$  es el diámetro del flujo estático en mm;

$n$  es el número de datos o probetas.



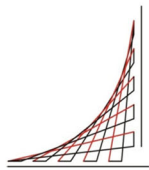
ESCUELA  
COLOMBIANA  
DE INGENIERÍA  
JULIO GARAVITO

**Efecto de la mezcla de micro-fibras y macro-fibras poliméricas en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC**

Anexo C: Cálculo de la resistencia a compresión del UHPFRC

MEZCLA	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - Vf					RESISTENCIA A COMPRESIÓN							
	Nylon mF1	PVA mF2	PP/PE MF1	PP MF2	MT mFOL	f'c 1 (MPa)	f'c 2 (MPa)	f'c 3 (MPa)	f'c 4 (MPa)	f'c 5 (MPa)	f'c 6 (MPa)	f'c (MPa)	SD <sub>M</sub> (%)
N0						140	-	128.5	128.0	-	-	<b>132.2</b>	5.2%
N1	1.00%					158.6	145.9	-	-	154.5	148.7	<b>151.9</b>	3.8%
N2	0.75%		0.25%			137.1	141.5	166.2	155.5	155.2	-	<b>151.1</b>	7.8%
N3	0.50%		0.50%			160.9	-	148.8	149.1	143.6	-	<b>150.6</b>	4.9%
N4	0.25%		0.75%			153.4	144.0	154.2	139.8	161.3	135.9	<b>148.1</b>	6.6%
N5			1.00%			138.3	130.9	124.7	147.4	131.6	-	<b>134.6</b>	6.4%
N6	0.75%			0.25%		144.2	155.0	146.8	145.2	147.7	168.9	<b>151.3</b>	6.2%
N7	0.50%			0.50%		-	137.6	148.0	143.2	161.5	162.2	<b>150.5</b>	7.3%
N8	0.25%			0.75%		145.5	144.5	146.2	132.2	131.9	144.5	<b>140.8</b>	4.8%
N9				1.00%		127.0	124.5	127.3	126.1	128.7	129.6	<b>127.2</b>	1.4%
N10		1.00%				150.1	141.7	156.0	153.9	161.8	142.5	<b>151.0</b>	5.2%
N11		0.75%	0.25%			148.8	142.7	136.6	147.0	161.3	157.0	<b>148.9</b>	6.1%
N12		0.50%	0.50%			134.5	140.8	157.8	148.8	152.8	157.0	<b>148.6</b>	6.3%
N13		0.25%	0.75%			142.9	141.4	142.0	134.3	145.0	127.7	<b>138.9</b>	4.7%
N14		0.75%		0.25%		154.1	143.5	142.7	158.1	153.1	150.9	<b>150.4</b>	4.1%
N15		0.50%		0.50%		156.3	157.0	149.6	149.2	141.2	143.1	<b>149.4</b>	4.4%
N16		0.25%		0.75%		142.0	-	126.6	-	145.1	141.6	<b>138.8</b>	6.0%
N17					1.00%	146.2	147.5	146.4	163.6	148.9	140.3	<b>148.8</b>	5.3%





ESCUELA  
COLOMBIANA  
DE INGENIERÍA  
JULIO GARAVITO

**Efecto de la mezcla de micro-fibras y macro-fibras  
poliméricas en el comportamiento a flexión y  
compresión del UHPFRC**

Anexo C: Cálculo de la resistencia a compresión del  
UHPFRC

MEZCLA	TIPO Y VOLUMEN DE FIBRA - Vf					RESISTENCIA A COMPRESIÓN							
ID	Nylon	PVA	PP/PE	PP	MT	f <sub>c</sub> 1	f <sub>c</sub> 2	f <sub>c</sub> 3	f <sub>c</sub> 4	f <sub>c</sub> 5	f <sub>c</sub> 6	f <sub>c</sub>	SD <sub>M</sub>
	mF1	mF2	MF1	MF2	mFOL	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)
N18	2.00%					149.2	171.3	144.1	154.0	147.5	146.5	<b>152.1</b>	6.6%
N19	1.50%		0.50%			150.3	154.4	150.6	150.6	155.6	129.4	<b>148.5</b>	6.5%
N20	1.00%		1.00%			132.1	-	158.4	-	123.8	132.6	<b>136.7</b>	11.0%
N21	0.50%		1.50%			130.3	129.2	132.7	-	123.7	110.1	<b>125.2</b>	7.2%
N22			2.00%			110.0	124.5	110.4	133.7	123.3	129.0	<b>121.8</b>	8.0%
N23	1.50%			0.50%		131.6	126.1	137.5	138.5	-	156.3	<b>138.0</b>	8.3%
N24	1.00%			1.00%		138.2	142.2	124.7	-	125.6	140.2	<b>134.2</b>	6.2%
N25	0.50%			1.50%		148.9	-	125.0	133.8	130.4	138.9	<b>135.4</b>	6.7%
N26				2.00%		114.6	126.1	124.8	130.3	115.6	128.5	<b>123.3</b>	5.4%
N27		2.00%				154.6	152.8	150.9	146.1	142.7	158.3	<b>150.9</b>	3.8%
N28		1.50%	0.50%			-	139.7	149.1	149.8	151.7	159.7	<b>150.0</b>	4.8%
N29		1.00%	1.00%			148.3	146.8	-	121.4	129.5	142.5	<b>137.7</b>	8.5%
N30		0.50%	1.50%			120.1	136.2	-	111.2	126.2	108.3	<b>120.4</b>	9.4%
N31		1.50%		0.50%		-	147.5	122.6	140.4	147.0	149.0	<b>141.3</b>	7.8%
N32		1.00%		1.00%		116.1	144.5	134.6	138.6	-	138.6	<b>134.5</b>	8.1%
N33		0.50%		1.50%		131.7	130.3	120.4	108.5	-	-	<b>122.7</b>	8.8%
N34					2.00%	156.7	150.3	147.8	157.0	154.0	155.3	<b>153.5</b>	2.4%

## **D. Anexo: Norma EN 196-1**

Métodos de ensayo de cementos Parte 1:  
Determinación de resistencias

## Métodos de ensayo de cementos

### Parte 1: Determinación de resistencias

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico CTN 80 *Cementos y cales*, cuya secretaría desempeña OFICEMEN.



UNE-EN 196-1

Métodos de ensayo de cementos  
Parte 1: Determinación de resistencias

*Methods of testing cement. Part 1: Determination of strength.*

*Méthodes d'essais des ciments. Partie 1: Détermination des résistances.*

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 196-1:2016.

Esta norma anula y sustituye a la Norma UNE-EN 196-1:2005.

Las observaciones a este documento han de dirigirse a:

**Asociación Española de Normalización**

Génova, 6  
28004 MADRID-España  
Tel.: 915 294 900  
info@une.org  
www.une.org  
Depósito legal: M 32978:2018

© UNE 2018

Prohibida la reproducción sin el consentimiento de UNE.

Todos los derechos de propiedad intelectual de la presente norma son titularidad de UNE.

Versión en español

**Métodos de ensayo de cementos**  
**Parte 1: Determinación de resistencias**

**Methods of testing cement. Part 1:**  
**Determination of strength.**

**Méthodes d'essais des ciments. Partie 1:**  
**Détermination des résistances.**

**Prüfverfahren für Zement. Teil 1:**  
**Bestimmung der Festigkeit.**

Esta norma europea ha sido aprobada por CEN el 2015-12-20.

Los miembros de CEN están sometidos al Reglamento Interior de CEN/CENELEC que define las condiciones dentro de las cuales debe adoptarse, sin modificación, la norma europea como norma nacional. Las correspondientes listas actualizadas y las referencias bibliográficas relativas a estas normas nacionales pueden obtenerse en el Centro de Gestión de CEN/CENELEC, o a través de sus miembros.

Esta norma europea existe en tres versiones oficiales (alemán, francés e inglés). Una versión en otra lengua realizada bajo la responsabilidad de un miembro de CEN en su idioma nacional, y notificada al Centro de Gestión de CEN/CENELEC, tiene el mismo rango que aquéllas.

Los miembros de CEN son los organismos nacionales de normalización de los países siguientes: Alemania, Antigua República Yugoslava de Macedonia, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chipre, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Rumanía, Suecia, Suiza y Turquía.



COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN  
European Committee for Standardization  
Comité Européen de Normalisation  
Europäisches Komitee für Normung  
**CENTRO DE GESTIÓN: Rue de la Science, 23, B-1040 Brussels, Belgium**

## Índice

<b>Prólogo europeo .....</b>		<b>6</b>
<b>1</b>	<b>Objeto y campo de aplicación.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Normas para consulta .....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Fundamento .....</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Laboratorio y equipo.....</b>	<b>9</b>
<b>4.1</b>	<b>Laboratorio.....</b>	<b>9</b>
<b>4.2</b>	<b>Requisitos generales del equipo .....</b>	<b>10</b>
<b>4.3</b>	<b>Tamices de ensayo .....</b>	<b>10</b>
<b>4.4</b>	<b>Amasadora .....</b>	<b>10</b>
<b>4.5</b>	<b>Moldes .....</b>	<b>12</b>
<b>4.6</b>	<b>Compactadora.....</b>	<b>14</b>
<b>4.7</b>	<b>Máquina de ensayo para resistencia a flexión.....</b>	<b>16</b>
<b>4.8</b>	<b>Máquina de ensayo para la resistencia a compresión .....</b>	<b>17</b>
<b>4.9</b>	<b>Dispositivo para la máquina de ensayo de resistencia a compresión.....</b>	<b>18</b>
<b>4.10</b>	<b>Balanza .....</b>	<b>19</b>
<b>4.11</b>	<b>Temporizador .....</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>Componentes del mortero .....</b>	<b>21</b>
<b>5.1</b>	<b>Arena.....</b>	<b>21</b>
<b>5.2</b>	<b>Cemento .....</b>	<b>22</b>
<b>5.3</b>	<b>Agua.....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Preparación del mortero .....</b>	<b>22</b>
<b>6.1</b>	<b>Composición del mortero .....</b>	<b>22</b>
<b>6.2</b>	<b>Amasado del mortero .....</b>	<b>22</b>
<b>7</b>	<b>Preparación de las probetas de ensayo.....</b>	<b>23</b>
<b>7.1</b>	<b>Tamaño de las probetas .....</b>	<b>23</b>
<b>7.2</b>	<b>Enmoldado de las probetas.....</b>	<b>23</b>
<b>8</b>	<b>Acondicionamiento de las probetas .....</b>	<b>23</b>
<b>8.1</b>	<b>Manipulación y conservación antes de desmoldear .....</b>	<b>23</b>
<b>8.2</b>	<b>Desmoldado de las probetas .....</b>	<b>24</b>
<b>8.3</b>	<b>Curado de las probetas en agua .....</b>	<b>24</b>
<b>8.4</b>	<b>Edad de las probetas para los ensayos de resistencias mecánicas .....</b>	<b>25</b>
<b>9</b>	<b>Procedimientos de ensayo .....</b>	<b>25</b>
<b>9.1</b>	<b>Resistencia a flexión .....</b>	<b>25</b>
<b>9.2</b>	<b>Resistencia a compresión.....</b>	<b>26</b>
<b>10</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>26</b>
<b>10.1</b>	<b>Resistencia a flexión.....</b>	<b>26</b>
<b>10.2</b>	<b>Resistencia a compresión.....</b>	<b>27</b>
<b>11</b>	<b>Ensayos de validación de la arena normalizada CEN y del equipo alternativo de compactación.....</b>	<b>28</b>
<b>11.1</b>	<b>Generalidades.....</b>	<b>28</b>

<b>11.2</b>	<b>Ensayos de validación de la arena normalizada CEN .....</b>	<b>29</b>
<b>11.3</b>	<b>Ensayos de validación del equipo alternativo de compactación.....</b>	<b>33</b>
<b>Anexo A (Normativo)</b>	<b>Equipo alternativo de vibración, compactación y procedimientos validados como equivalentes al equipo de compactación de referencia y su procedimiento .....</b>	<b>35</b>
<b>A.1</b>	<b>Generalidades.....</b>	<b>35</b>
<b>A.2</b>	<b>Mesa de vibración, A.....</b>	<b>35</b>
<b>A.3</b>	<b>Mesa de vibración, B.....</b>	<b>38</b>

## Prólogo europeo

Esta Norma EN 196-1:2016 ha sido elaborada por el Comité Técnico CEN/TC 51 *Cemento y cales de construcción*, cuya Secretaría desempeña NBN.

Esta norma europea debe recibir el rango de norma nacional mediante la publicación de un texto idéntico a ella o mediante ratificación antes de finales de octubre de 2016, y todas las normas nacionales técnicamente divergentes deben anularse antes de finales de octubre de 2016.

Se llama la atención sobre la posibilidad de que algunos de los elementos de este documento estén sujetos a derechos de patente. CEN no es responsable de la identificación de dichos derechos de patente.

Esta norma anula y sustituye a la Norma EN 196-1:2005.

En comparación con la Norma EN 196-1:2005, se han realizado las siguientes modificaciones:

- En el capítulo 2 se han actualizado las referencias normativas.
- En el apartado 10.2.3 se han revisado las estimaciones de las precisiones para los ensayos de resistencia a compresión, con una indicación de la repetibilidad y reproducibilidad a los 2 días y a los 7 días.
- En el apartado 6.2 se ha revisado el procedimiento de mezclado con una indicación del tiempo máximo para la adición en el recipiente.
- La norma se ha revisado editorialmente.

La Norma EN 196 consta de las siguientes partes, bajo el título general *Métodos de ensayo de cementos*:

- *Parte 1: Determinación de resistencias.*
- *Parte 2: Análisis químico de cementos.*
- *Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.*
- *Parte 4: Determinación cuantitativa de los componentes (CEN/TR 196-4).*
- *Parte 5: Ensayo de puzolanicidad para los cementos puzolánicos.*
- *Parte 6: Determinación de la finura.*
- *Parte 7: Métodos de toma y preparación de muestras de cemento.*
- *Parte 8: Determinación del calor de hidratación. Método por disolución.*
- *Parte 9: Determinación del calor de hidratación. Método semiadiabático.*
- *Parte 10: Determinación del contenido de cromo (VI) soluble en agua en cementos.*



De acuerdo con el Reglamento Interior de CEN/CENELEC, están obligados a adoptar esta norma europea los organismos de normalización de los siguientes países: Alemania, Antigua República Yugoslava de Macedonia, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chipre, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Rumanía, Suecia, Suiza y Turquía.

## 1 Objeto y campo de aplicación

Esta parte de la Norma EN 196-1 describe el método para la determinación de las resistencias mecánicas a compresión y, opcionalmente, a flexión del mortero de cemento. Este método se aplica a los cementos comunes y a los otros tipos de cementos y materiales cuyas normas hagan referencia a este método. Puede no ser aplicable a otros tipos de cementos que tengan, por ejemplo, unos tiempos iniciales de fraguado muy cortos.

El método se emplea para comprobar que la resistencia a compresión del cemento es conforme con su especificación y para el ensayo de validación de la arena de referencia CEN, EN 196-1, o para el equipo alternativo de compactación.

Esta parte de la Norma EN 196-1 describe el equipo y procedimiento de referencia y permite la utilización de procedimientos y equipos alternativos de compactación, siempre y cuando hayan sido validados de acuerdo a lo indicado en esta norma. En caso de litigio, solo se aplicará el procedimiento y equipo de referencia.

## 2 Normas para consulta

Los documentos indicados a continuación, en su totalidad o en parte, son normas para consulta indispensables para la aplicación de este documento. Para las referencias con fecha, solo se aplica la edición citada. Para las referencias sin fecha se aplica la última edición (incluida cualquier modificación de esta).

EN 196-7, *Methods of testing cement. Part 7: Methods of taking and preparing samples of cement*

EN 197-1, *Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.*

EN ISO 1101, *Especificación geométrica de productos (GPS). Tolerancia geométrica. Tolerancias de forma, orientación, localización y alabeo (ISO 1101).*

EN ISO 1302, *Especificación geométrica de productos (GPS). Indicación de la calidad superficial en la documentación técnica de productos.*

EN ISO 7500-1, *Materiales metálicos. Calibración y verificación de máquinas de ensayos uniaxiales estáticos. Parte 1: Máquinas de ensayo de tracción/compresión. Calibración y verificación del sistema de medida de fuerza (ISO 7500-1).*

ISO 565, *Test sieves. Metal wire cloth, perforated metal plate and electroformed sheet. Nominal sizes of openings.*

ISO 3310-1, *Test sieves. Technical requirements and testing. Part 1: Test sieves of metal wire cloth.*

ISO 4200, *Plain end steel tubes, welded and seamless. General tables of dimensions and masses per unit length.*

### 3 Fundamento

El método comprende la determinación de las resistencias a compresión, y opcionalmente a flexión, de probetas prismáticas de dimensiones 40 mm × 40 mm × 160 mm.

Las probetas se fabrican con un mortero plástico, compuesto de una parte en masa de cemento, tres partes en masa de arena normalizada CEN, y media parte de agua (relación agua/cemento de 0,50). Se pueden utilizar arenas normalizadas CEN de diferentes orígenes y países, con la condición de que, al ser utilizadas, los resultados de las resistencias mecánicas no difieran de forma significativa de los obtenidos utilizando la arena de referencia CEN (véase el capítulo 11).

En el procedimiento de referencia, el mortero se prepara por amasado mecánico y se compacta en un molde utilizando una compactadora. Pueden emplearse otros equipos y procedimientos de compactación alternativos, con la condición de que, al ser utilizados, los resultados de las resistencias mecánicas no difieran de forma significativa de los obtenidos utilizando la compactadora y el procedimiento de referencia (véase el capítulo 11 y el anexo A).

Las probetas se conservan en el molde en una atmósfera húmeda durante 24 h, y, después del desmoldeado, las probetas se sumergen en agua hasta el momento de los ensayos de resistencia.

A la edad requerida, las probetas se retiran de su medio de conservación húmedo, se rompen a flexión, determinando la resistencia a flexión cuando se requiera, o se rompen mediante otros métodos adecuados que no sometan a las mitades del prisma a esfuerzos dañinos, y cada mitad se somete al ensayo de resistencia a compresión.

## 4 Laboratorio y equipo

### 4.1 Laboratorio

El laboratorio donde se efectúe la preparación de las probetas debe mantenerse a una temperatura de  $(20 \pm 2)$  °C, y con una humedad relativa no menor del 50%.

La cámara húmeda o el gran armario para la conservación de las probetas en el molde, debe mantenerse a una temperatura de  $(20,0 \pm 1,0)$  °C y una humedad relativa no menor del 90%.

Los recipientes de conservación para el curado de las probetas en agua, y las gradillas sobre las que se colocan, deben ser de un material que no reaccione con el cemento. La temperatura del agua debe mantenerse a  $(20,0 \pm 1,0)$  °C.

La temperatura y la humedad relativa del aire en el laboratorio y la temperatura del agua en los recipientes de conservación deben anotarse al menos una vez al día durante las horas de trabajo. La temperatura y la humedad relativa de la cámara húmeda o del armario, se deben registrar al menos cada 4 h.

El cemento, la arena normalizada CEN (véase 5.1.3), el agua y los aparatos empleados en la fabricación de las probetas deben estar a la temperatura de  $(20 \pm 2)$  °C.

Cuando se den rangos de temperatura, la temperatura objetivo a la que se establecerán los controles, debe ser la del valor medio del rango.

## 4.2 Requisitos generales del equipo

Las tolerancias indicadas en las figuras 1 a 5 son importantes para la correcta utilización del equipo en el procedimiento en ensayo. Cuando las medidas de control indiquen que las tolerancias no se cumplen, el equipo debe rechazarse, ajustarse o repararse. Los registros de las medidas de control deben archivarse.

Los controles de recepción de un equipo nuevo deben incluir la masa, el volumen y las dimensiones para compararlos con los indicados en la norma, prestando particular atención a aquellas dimensiones críticas para las que se establece una tolerancia.

En aquellos casos en los que el material del equipo puede influir en los resultados, se debe utilizar el material especificado.

Las dimensiones aproximadas que se muestran en las figuras se proporcionan como guía para los fabricantes de equipos u operarios. Las dimensiones que incluyen tolerancias, son obligatorias.

## 4.3 Tamices de ensayo

Las telas de los tamices deben cumplir las prescripciones de la Norma ISO 3310-1, y deben ser de las medidas que figuran en la tabla 1 según la Norma ISO 565 (serie R 20).

**Tabla 1 – Luz de los tamices de ensayo**

Medidas en malla cuadrada (mm)					
2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08

## 4.4 Amasadora

La amasadora debe constar esencialmente de:

- Un recipiente de acero inoxidable de una capacidad aproximada de 5 l, con la forma típica y dimensiones de la figura 1 y equipado de manera que pueda ser fijado firmemente al bastidor de la amasadora durante el amasado y que la altura del recipiente con relación a la pala y, por consiguiente, la separación entre la pala y recipiente, pueda ajustarse y mantenerse con precisión.
- Una pala de acero inoxidable, de forma típica, medidas y tolerancias como las indicadas en la figura 1, accionada por un motor eléctrico de velocidades controladas, con movimientos de rotación sobre su propio eje, y con un movimiento planetario alrededor del eje del recipiente. Los dos sentidos de rotación deben ser opuestos, y la relación entre las dos velocidades no debe ser un número entero.

Palas y recipientes deben formar un juego que siempre debe utilizarse conjuntamente.

La holgura de  $(3 \pm 1)$  mm se refiere a la situación cuando la pala, en el recipiente vacío indicado en la figura 1, se coloca tan próxima como sea posible a la pared. Esta holgura debe comprobarse regularmente aplicando una presión mínima a la pala y asegurándose que no hay una distancia perceptible entre la junta de la pala y el eje del motor.

NOTA 1 Cuando la medida directa es difícil, son útiles los medidores sencillos de tolerancias ("galgas de precisión").

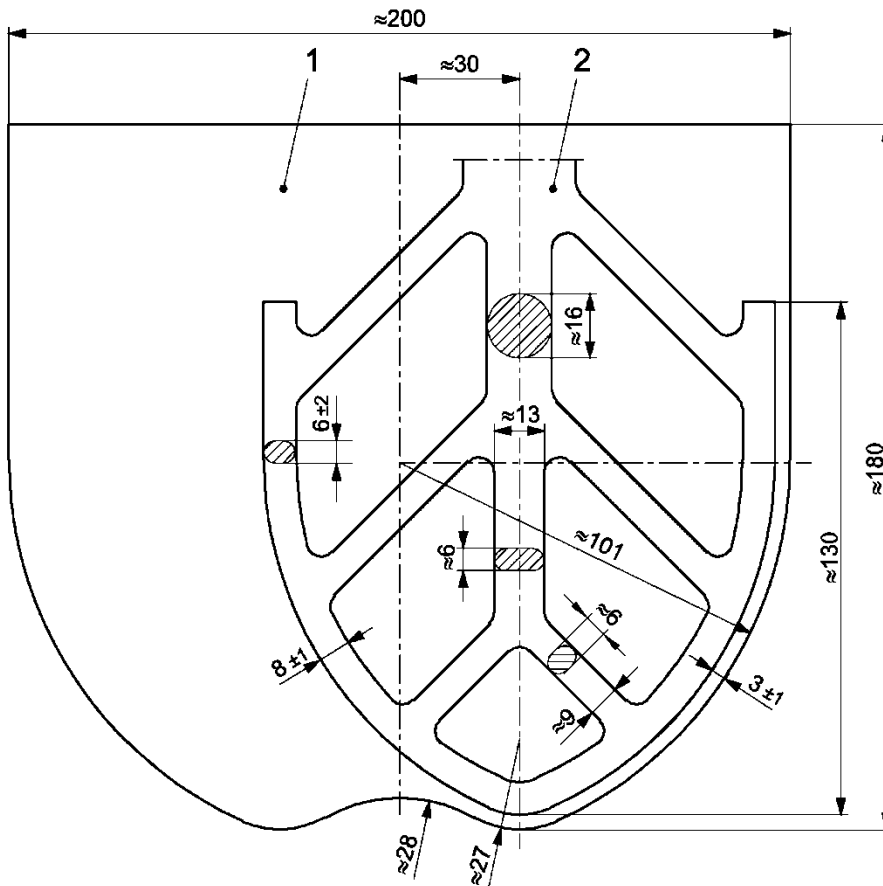
NOTA 2 Las dimensiones indicadas en la figura 1 como aproximadas son de referencia para los fabricantes.

La amasadora debe trabajar a las velocidades dadas en la tabla 2 cuando se amase el mortero.

**Tabla 2 - Velocidades de la pala mezcladora**

	<b>Rotación</b> min <sup>-1</sup>	<b>Movimiento planetario</b> min <sup>-1</sup>
Velocidad lenta	140 ± 5	62 ± 5
Velocidad rápida	285 ± 10	125 ± 10

Medidas en milímetros



Leyenda

- 1 Recipiente
- 2 Pala

**Figura 1 - Recipiente y pala tipo**

## 4.5 Moldes

El molde debe disponer de tres compartimentos horizontales, de forma que se puedan preparar simultáneamente tres probetas prismáticas de 40 mm × 40 mm de sección transversal y 160 mm de longitud.

En la figura 2 se da un ejemplo típico de molde.

El molde debe ser de acero, con un espesor de pared aproximado de 10 mm. La dureza superficial Vickers de todas las caras interiores debe ser, al menos, HV 200.

Se recomienda una dureza Vickers mínima de HV 400.

El molde debe estar construido de manera que se facilite el desmoldeado de las probetas sin dañarlas. Cada molde debe ir provisto de su correspondiente placa base, de acero mecanizado o hierro fundido. El conjunto del molde, ensamblado, debe mantenerse rígidamente unido y fijado a la base.

El ensamblado debe ser tal que no permita que se produzcan distorsiones o falta de estanquidad. La placa base debe asegurar un contacto adecuado con la mesa de la compactadora y ser lo suficientemente rígida para evitar las vibraciones secundarias.

NOTA 1 Los moldes y compactadoras de diferentes fabricantes pueden tener dimensiones externas y masas sin relación, por lo tanto su compatibilidad debe asegurarse por el comprador.

Las piezas del molde deben estar provistas de marcas de identificación para facilitar su montaje y asegurar el cumplimiento de las tolerancias especificadas. No deben intercambiarse piezas similares de distintos moldes.

El molde montado debe cumplir con las siguientes especificaciones:

- a) Las dimensiones internas y las tolerancias de cada compartimiento del molde deben ser las siguientes:
  - 1) longitud:  $(160 \pm 1)$  mm;
  - 2) anchura:  $(40,0 \pm 0,2)$  mm;
  - 3) profundidad:  $(40,1 \pm 0,1)$  mm.
- b) La tolerancia de planeidad (véase la Norma EN ISO 1101) sobre la totalidad de cada cara interna no debe ser superior a 0,03 mm.
- c) La tolerancia de perpendicularidad (véase la Norma EN ISO 1101) de cada cara interna con relación a la superficie del fondo del molde y a la cara interna adyacente, como planos de referencia, no debe ser mayor que 0,2 mm.
- d) La textura superficial (véase la Norma EN ISO 1302) de cada una de las caras internas no debe tener una rugosidad mayor que N8.

Los moldes deben reemplazarse cuando se exceda cualquiera de las tolerancias especificadas. La masa del molde debe estar de acuerdo con lo que se especifica en el apartado 4.6 para la masa combinada.

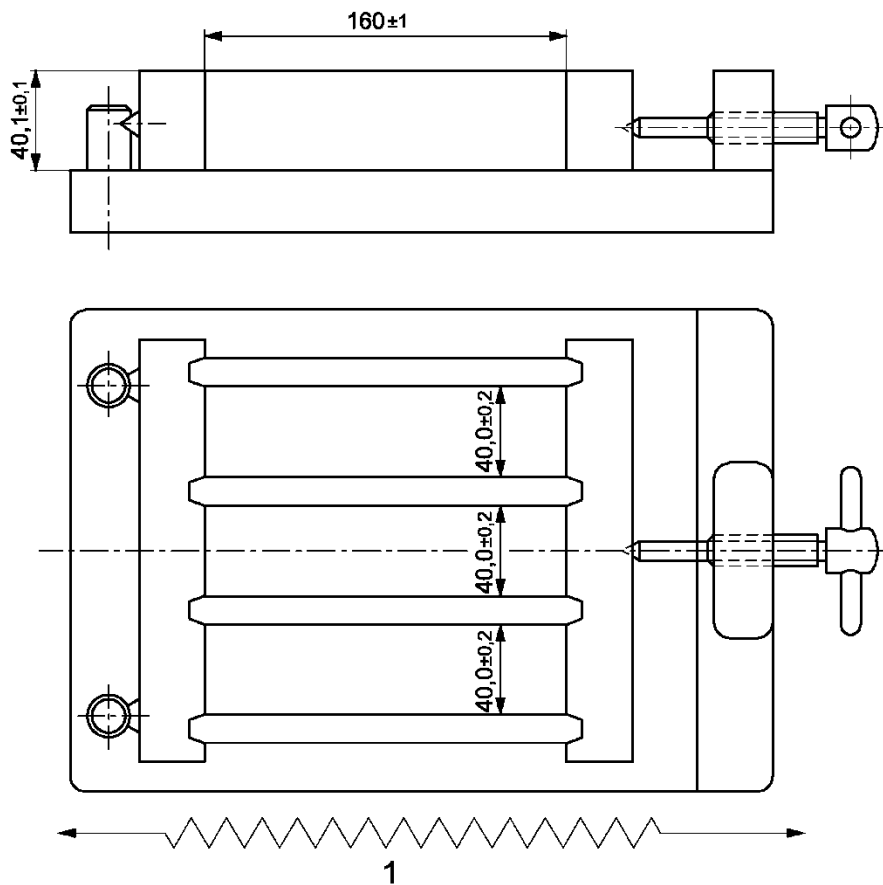
Al montar un molde limpio, listo para el uso, se debe utilizar un producto de sellado adecuado para impregnar las juntas exteriores. Se debe aplicar una capa fina de aceite de desmoldeado a las caras internas del molde.

NOTA 2 Se ha encontrado que algunos aceites pueden afectar al fraguado del cemento; los aceites con base mineral son adecuados.

Para facilitar el llenado del molde, se debe utilizar una tolva metálica, bien ajustada, de paredes verticales de 20 mm a 40 mm de altura. Mediante la vista en planta, las paredes de la tolva no deben sobrepasar las interiores del molde en más de 1 mm. Las paredes exteriores de la tolva deben estar provistas de medios de fijación para asegurar una posición correcta sobre el molde.

Para extender y enrasar el mortero, se deben facilitar dos espátulas y una regla metálica del tipo representado en la figura 3.

Medidas en milímetros

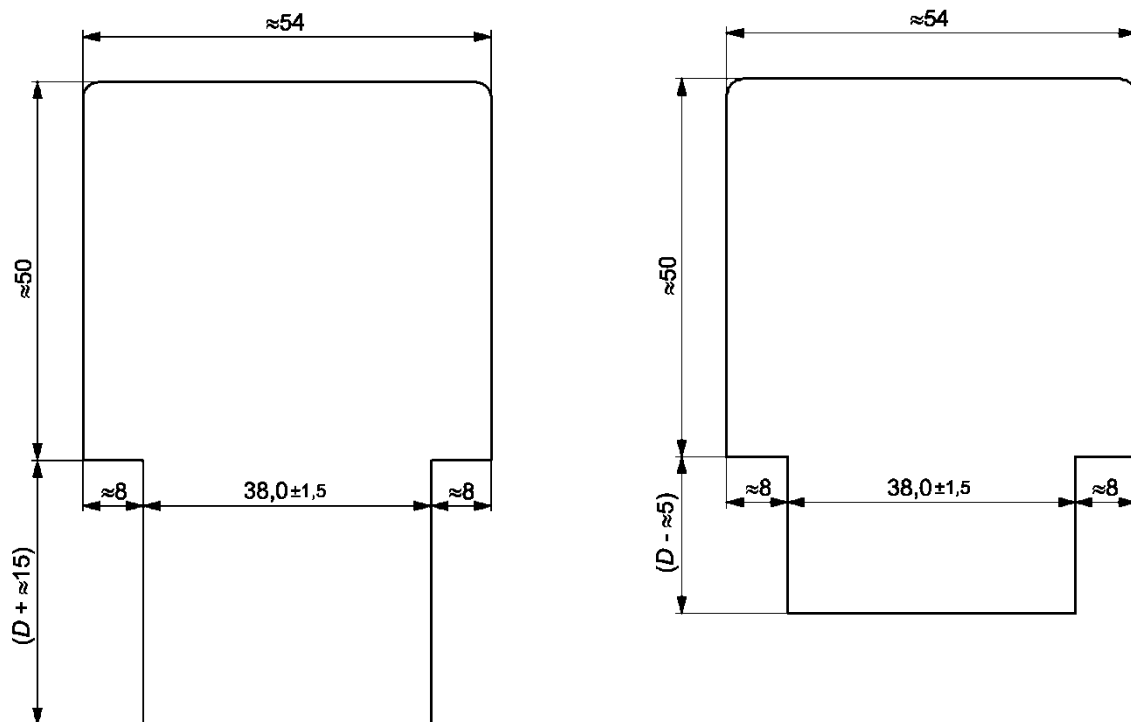


Leyenda

1 Indicación de la dirección de enrasado con movimiento de sierra

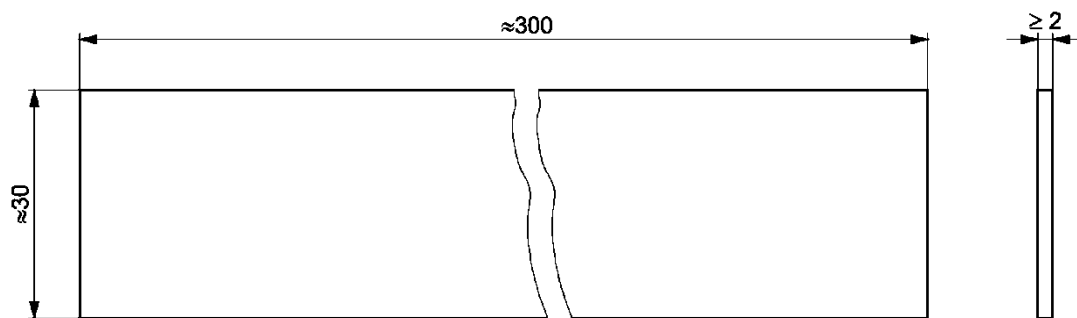
**Figura 2 - Ejemplo de molde típico**

Medidas en milímetros



a) Espátula grande

b) Espátula pequeña



c) Regla para enrasar

Leyenda

D    Altura de tolva

**Figura 3 - Ejemplo de espátula y de regla metálica plana típicas**

#### 4.6 Compactadora

La compactadora debe cumplir las siguientes condiciones (un diseño típico de compactadora se representa en la figura 4).



El equipo se compone esencialmente de una mesa rectangular unida rígidamente por dos brazos ligeros a un eje de rotación, que dista 800 mm del centro de la mesa. La mesa debe estar provista, en el centro de su cara inferior, de un martinete de superficie redondeada. Debajo del martinete debe existir un pequeño yunque, cuya cara superior sea plana. En posición de reposo, la perpendicular común que pasa por el punto de contacto del martinete y el yunque, debe ser vertical. Cuando el martinete reposa sobre el yunque, la cara superior de la mesa debe estar en posición horizontal, de forma que el nivel de cualquiera de las cuatro esquinas no se desvíe del nivel medio en más de 1,0 mm. La mesa debe tener la cara superior mecanizada y las medidas deben ser iguales o mayores que las de la placa base del molde. Debe facilitarse un sistema de fijación que proporcione al molde una sujeción firme a la mesa.

La masa total compuesta por la mesa, incluidos los brazos, el molde vacío, la tolva y el sistema de fijación, debe ser de  $(20,0 \pm 0,5)$  kg.

Los brazos que unen la mesa al eje de rotación deben ser rígidos y contruidos de tubo redondo, de un diámetro exterior comprendido entre 17 mm y 22 mm y elegidos entre los que figuran en la Norma ISO 4200. La masa total de los dos brazos, incluyendo cualquier rigidizador intermedio, debe ser de  $(2,25 \pm 0,25)$  kg. Los rodamientos del eje deben ser de bolas o rodillos y deben estar protegidos del polvo y de la arena. El desplazamiento horizontal del centro de la mesa, debido a la holgura del eje, no debe exceder de 1,0 mm.

El martinete y el yunque deben ser de acero templado de una dureza Vickers mínima de HV 500. La curvatura de la cara del martinete debe ser, aproximadamente, de  $0,01 \text{ mm}^{-1}$ .

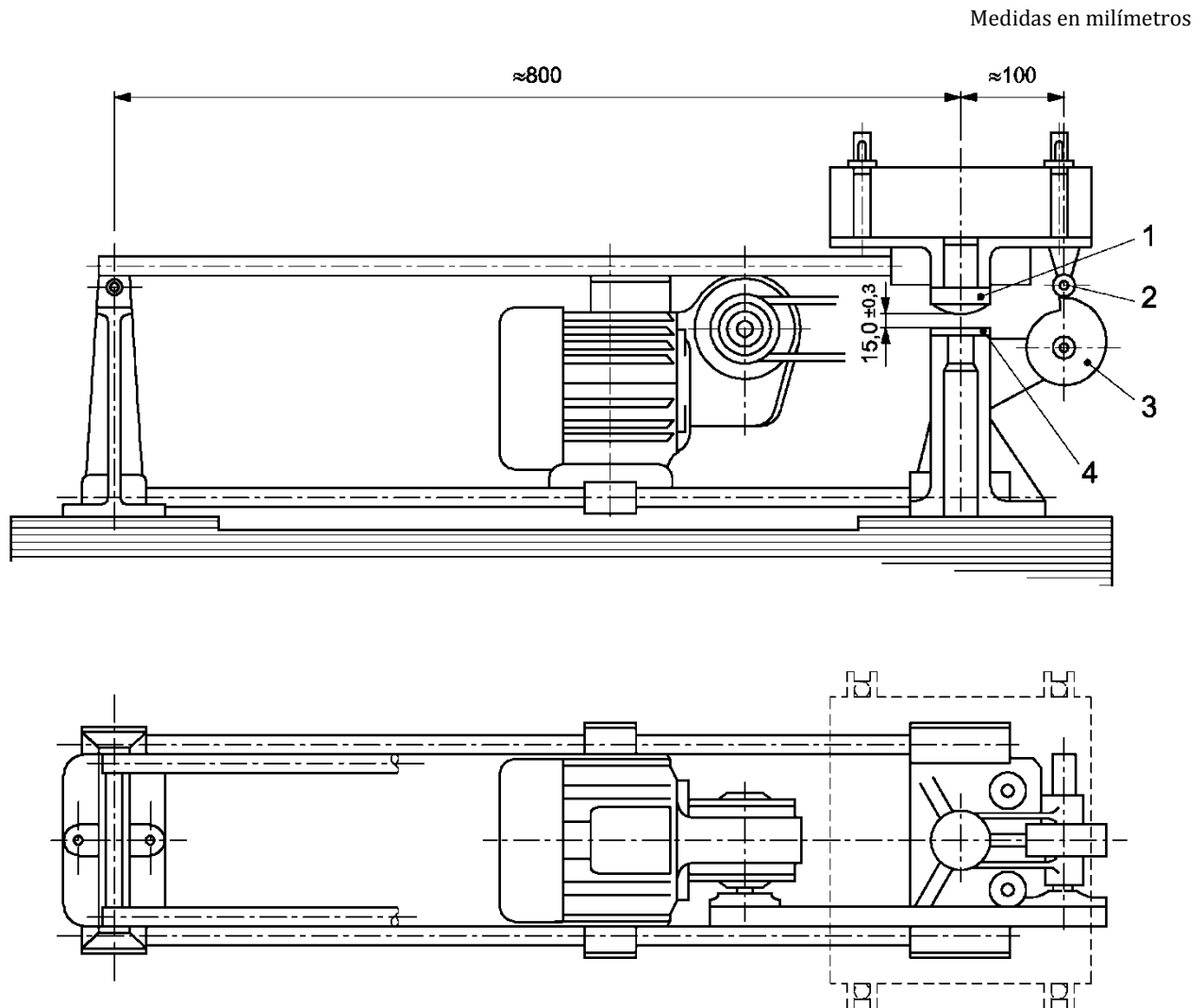
Durante el funcionamiento, la mesa es levantada por una leva que le permite una caída libre desde una altura de  $(15,0 \pm 0,3)$  mm, entre el martinete y el yunque.

La leva debe ser de acero templado, de una dureza Vickers mínima de HV 400, y su eje debe montarse sobre rodamiento de bolas, de construcción tal que la caída libre sea siempre de  $(15,0 \pm 0,3)$  mm. El rodillo de la leva debe estar construido de manera que asegure un desgaste mínimo de la leva. La leva se debe accionar por un motor eléctrico de unos 250 W con un motor reductor a velocidad uniforme de una revolución por minuto. Se dispondrá de un mecanismo de control y un contador para asegurar una compactación exacta de 60 golpes en  $(60 \pm 3)$  s.

El molde debe colocarse sobre la mesa con la longitud mayor de los compartimientos paralela a la dirección de los brazos, y por tanto, perpendicular al eje de rotación de la leva. Se deben prever marcas adecuadas para facilitar la colocación del molde, de tal manera que el centro del compartimento central esté en la vertical del punto de impacto.

La compactadora debe montarse firmemente sobre un bloque de hormigón de unos 600 kg de masa y un volumen aproximado de  $0,25 \text{ m}^3$ , y de unas dimensiones que proporcionen una altura adecuada para el molde. La totalidad de la base del bloque debe descansar sobre una lámina elástica, por ejemplo, de caucho natural, que proporcione un adecuado aislamiento que evite las vibraciones externas que puedan afectar a la compactación.

La base de la compactadora debe fijarse al nivel del bloque de hormigón por pernos de anclaje, intercalando entre la compactadora y el hormigón, una capa delgada de mortero que asegure un contacto total sin vibraciones.



## Leyenda

- 1 Martinete
- 2 Rodillo de la leva
- 3 Leva
- 4 Tope yunque

**Figura 4 - Ejemplo de compactadora típica**

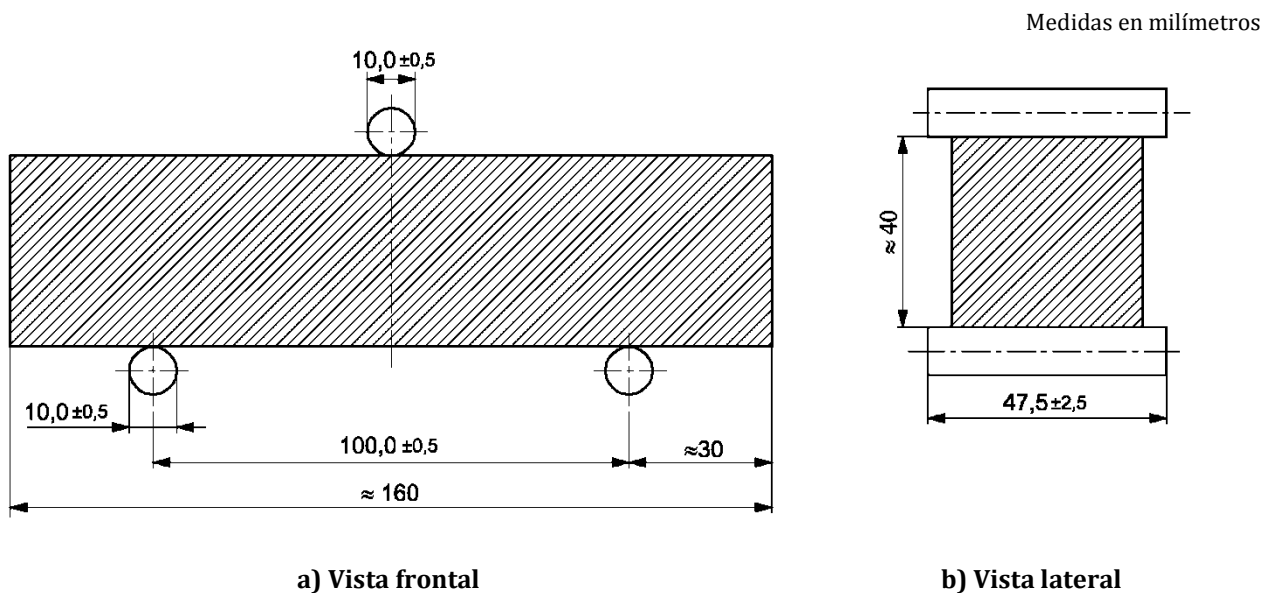
#### 4.7 Máquina de ensayo para resistencia a flexión

Este equipo es opcional. Si solamente se va a ensayar la resistencia a compresión, las probetas pueden romperse por otros medios adecuados que no las sometan a presiones no deseadas.

La resistencia a flexión puede medirse con una máquina de ensayo para resistencia a flexión o mediante un dispositivo apropiado en la máquina de ensayo a compresión. En cualquier caso, los equipos deben cumplir los siguientes requisitos:

La máquina de ensayo para la determinación de la resistencia a flexión debe ser capaz de aplicar cargas de hasta 10 kN, con una precisión de  $\pm 1,0\%$  de la carga registrada en las 4/5 partes superiores del rango utilizado, y con una velocidad de carga de  $(50 \pm 10)$  N/s.

La máquina debe estar provista de un dispositivo de flexión que incorpore dos rodillos de apoyo de acero de  $(10,0 \pm 0,5)$  mm de diámetro, distantes uno del otro  $(100,0 \pm 0,5)$  mm, y un tercer rodillo de carga de acero del mismo diámetro que los anteriores y equidistante de los otros dos. La longitud de estos rodillos debe estar comprendida entre 45 mm y 50 mm. El dispositivo de carga se muestra en la figura 5.



**Figura 5 – Dispositivo de carga para la determinación de la resistencia a flexión**

Los tres planos verticales que pasan por los ejes de los tres rodillos, deben ser paralelos y permanecer paralelos durante el ensayo, equidistantes y perpendiculares a la dirección de la probeta. Uno de los rodillos de apoyo y el de carga, deben poder oscilar ligeramente para permitir una distribución uniforme de la carga sobre el ancho de la probeta, sin someterla a esfuerzos de torsión.

#### 4.8 Máquina de ensayo para la resistencia a compresión

La máquina de ensayo para la determinación de la resistencia a compresión debe tener una capacidad adecuada al ensayo: debe tener una precisión de  $\pm 1,0\%$  de la carga registrada en las 4/5 partes superiores del rango utilizado, verificado de acuerdo con la Norma EN ISO 7500-1. Debe proporcionar una velocidad de aumento de carga de  $(2\ 400 \pm 200)$  N/s. Debe estar provista de un dispositivo indicador, construido de forma que el valor indicado en el momento de la rotura de la probeta permanezca indicado después que la máquina se descargue. Esto se consigue mediante un indicador máximo en el manómetro o con una memoria en un dispositivo digital. Las máquinas de ensayo en las que la carga se regula manualmente deben estar provistas de un dispositivo de medida que controle la velocidad de carga.

El eje vertical del pistón debe coincidir con el eje vertical de la máquina y, durante la puesta en carga, la dirección del movimiento del pistón debe ser paralela al eje vertical de la máquina. Además, la resultante de las fuerzas debe pasar por el centro de la probeta. La superficie del plato inferior de la máquina debe ser perpendicular al eje de la máquina y permanecer perpendicular durante la puesta en carga.

El centro de la rótula esférica del plano superior debe estar en el punto de intersección del eje vertical de la máquina con el plano de la superficie inferior del plato superior, con una tolerancia de  $\pm 1$  mm. El plato superior debe estar libre para alinearse en el momento del contacto con la probeta, pero durante la puesta en carga, la posición relativa de los platos superior e inferior debe permanecer inalterable.

Los platos de la máquina de ensayo deben ser de carburo de tungsteno, o de acero templado de una dureza Vickers de al menos HV 600. Estos platos deben ser como mínimo de 10 mm de espesor, de  $(40,0 \pm 0,1)$  mm de anchura y  $(40,0 \pm 0,1)$  mm de longitud. La tolerancia de planeidad de la totalidad de la superficie de contacto de los platos con la probeta, no debe ser mayor que 0,01 mm según la Norma EN ISO 1101. La textura superficial, conforme a la Norma EN ISO 1302, no debe ser inferior a N3 ni mayor de N6 cuando sea suministrada.

Alternativamente, pueden utilizarse dos placas auxiliares de carburo de tungsteno, o de acero endurecido con una dureza Vickers de al menos HV 600 y de 10 mm de espesor como mínimo, y que cumplan los requisitos exigidos a los platos. Se deberían tomar precauciones para centrar las placas auxiliares con relación al eje del sistema de carga con una precisión de  $\pm 0,5$  mm. Se deberían tomar precauciones para alinear las placas auxiliares con una tolerancia no mayor de  $\pm 0,5$  mm desde el centro de una a la otra.

Cuando la máquina de compresión no disponga de rótula esférica, o cuando ésta esté bloqueada, o cuando el diámetro de la rótula sea mayor que 120 mm, se debe utilizar un dispositivo conforme al apartado 4.9.

La máquina de ensayos puede estar provista de dos o más escalas de carga. El valor más alto de la escala inferior debería ser aproximadamente 1/5 del valor más alto de la escala inmediatamente superior.

La máquina de ensayo debería estar provista de un dispositivo automático para el ajuste de la velocidad de carga y un dispositivo para el registro de los resultados.

La rótula esférica de la máquina puede lubricarse para facilitar el ajuste al contacto con la probeta, pero solamente hasta tal punto que, bajo carga, durante el ensayo, el plato no se mueva. No es aconsejable el uso de lubricantes de acción efectiva bajo altas presiones.

Los términos “vertical”, “inferior” y “superior” se refieren a las máquinas de ensayo convencionales que están alineadas normalmente con el eje vertical. Sin embargo, también se aceptan máquinas de ensayo cuyo eje no sea vertical.

#### **4.9 Dispositivo para la máquina de ensayo de resistencia a compresión**

Cuando, según el apartado 4.8, sea necesaria la utilización de un dispositivo de compresión (véase la figura 6), éste se debe colocar entre los platos de la máquina, de forma que transmita la carga de la máquina a las superficies de compresión de la probeta de mortero.

En este dispositivo se debe emplear una placa inferior, que puede ir incorporada al plato inferior de la máquina. El plato superior recibe la carga del plato superior de la máquina por medio de una rótula esférica. Esta rótula forma parte de un conjunto que debe poder deslizarse verticalmente sin rozamiento apreciable en el dispositivo que guía su movimiento. El dispositivo de compresión se debe mantener perfectamente limpio y la rótula esférica debe tener libertad de movimiento de tal forma que el plato se adapte inicialmente por sí mismo a la forma de la probeta, y posteriormente permanezca fijo durante el ensayo. Todas las prescripciones establecidas en el apartado 4.8 se aplican igualmente cuando se utiliza un dispositivo de compresión.

La rótula esférica del dispositivo de compresión puede ser lubricada, pero solamente hasta el punto que, bajo carga, durante el ensayo, el plato no se mueva. No es apropiado el uso de lubricantes de acción efectiva bajo altas presiones.

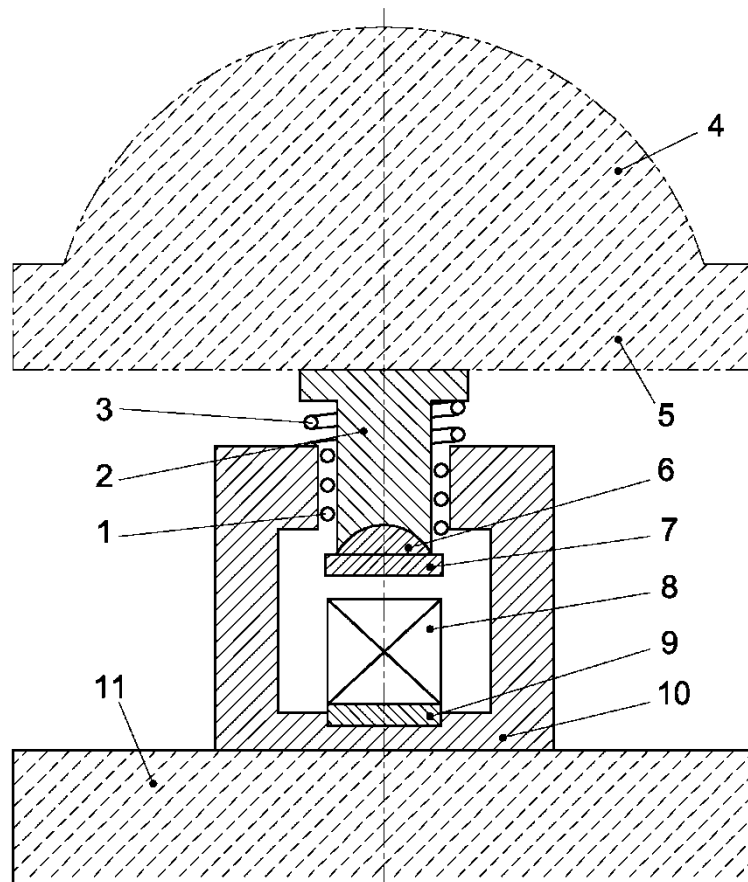
Es conveniente que el conjunto vuelva automáticamente a su posición inicial después de la rotura de la probeta.

#### **4.10 Balanza**

Balanza, capaz de pesar con una precisión de  $\pm 1$  g.

#### **4.11 Temporizador**

Temporizador, capaz de medir con una precisión de  $\pm 1$  s.



## Leyenda

- 1 Rodamiento de bolas
- 2 Conjunto deslizante
- 3 Muelle de recuperación
- 4 Rótula esférica de la máquina
- 5 Plato superior de la máquina
- 6 Rótula esférica del dispositivo
- 7 Plato superior del dispositivo
- 8 Probeta
- 9 Plato inferior del dispositivo
- 10 Dispositivo
- 11 Plato inferior de la máquina

**Figura 6 – Ejemplo de dispositivo típico para ensayos de resistencia a compresión**

## 5 Componentes del mortero

### 5.1 Arena

#### 5.1.1 Generalidades

Para determinar la resistencia del cemento de acuerdo con esta norma, se deben utilizar arenas normalizadas CEN, que son producidas en varios países. La "arena normalizada CEN EN 196-1" debe cumplir con los requisitos establecidos en el apartado 5.1.3. Los productores de la arena normalizada CEN deben aplicar los ensayos de verificación que deben inspeccionarse por el organismo de certificación.

A la vista de las dificultades para caracterizar la arena normalizada CEN, debe validarse frente a la arena de referencia CEN descrita en el apartado 5.1.2 por medio de ensayos de certificación y verificación, según se describe en el capítulo 11.

#### 5.1.2 Arena de referencia CEN

La arena de referencia CEN, de la que se mantiene un stock limitado como material de referencia por el fabricante, es una arena natural, silíceo, de granos redondeados, y cuyo contenido en sílice es al menos del 98%.

Su distribución granulométrica está comprendida entre los límites definidos en la tabla 3.

**Tabla 3 – Distribución granulométrica de la arena de referencia CEN**

<b>Dimensiones malla cuadrada (mm)</b>	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
<b>Residuo acumulado sobre tamices (%)</b>	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

NOTA Puede obtenerse información sobre esta arena de referencia en Normensand GmbH, D-59269 Beckum, Alemania.

#### 5.1.3 Arena normalizada CEN

La arena normalizada CEN debe cumplir con la distribución granulométrica especificada en el apartado 5.1.2, determinada mediante análisis por tamizado de una muestra de arena representativa del total de masa, no inferior a 1 345 g. El tamizado debe continuar hasta que la totalidad de la muestra que pasa por cada tamiz sea inferior a 0,5 g/min.

El contenido de humedad debe ser inferior a 0,2%, determinado como la pérdida de masa de una muestra representativa de arena después de secarse entre 105 °C y 110 °C hasta masa constante, y expresada como porcentaje en masa sobre muestra seca.

Durante la producción, estas determinaciones se deben realizar, como mínimo, una vez al día. Estos requisitos son insuficientes para asegurar que la arena normalizada CEN proporciona un comportamiento equivalente al de la arena de referencia. Esta equivalencia debe iniciarse y mantenerse con los ensayos de validación descritos en el capítulo 11.

La arena normalizada CEN debe estar preenvasada en bolsas con un contenido de (1 350 ± 5) g; la naturaleza del material utilizado para las bolsas no debe afectar a los resultados de los ensayos de resistencia y el contenido de cada bolsa debe cumplir con la distribución granulométrica especificada en el apartado 5.1.2.

La arena normalizada CEN debería almacenarse cuidadosamente para evitar daños o contaminación, particularmente de humedad, anteriormente a su empleo.

## 5.2 Cemento

El cemento a ensayar debe exponerse al aire ambiental el menor tiempo posible. Si van a transcurrir más de 24 h entre la toma de muestras y los ensayos, el cemento debe conservarse en recipientes completamente llenos y herméticos, fabricados con material que no reaccione con el cemento.

La muestra de laboratorio debe homogeneizarse por medio de algún equipo o por otros medios descritos en la Norma EN 196-7, antes de tomar submuestras para los ensayos.

## 5.3 Agua

Para los ensayos de validación se debe utilizar agua destilada, o desionizada. Para otros ensayos se puede utilizar agua potable. En caso de litigio se debe emplear agua destilada o desionizada.

# 6 Preparación del mortero

## 6.1 Composición del mortero

La composición en masa debe ser una parte de cemento (5.2), tres partes de arena normalizada CEN (5.1) y media parte de agua (5.3) (relación agua/cemento 0,50).

Cada amasada para tres probetas debe estar compuesta de  $(450 \pm 2)$  g de cemento,  $(1\ 350 \pm 5)$  g de arena y  $(225 \pm 1)$  g de agua.

## 6.2 Amasado del mortero

Se pesa el cemento y el agua con una balanza (4.10). Cuando el agua se añade en volumen, éste debe prepararse con una precisión de  $\pm 1$  ml. Se mezcla cada lote de mortero mecánicamente, utilizando la amasadora (4.4). Los tiempos de las diferentes etapas de amasado se refieren a los tiempos de marcha/paro de la amasadora y deben mantenerse dentro de los  $\pm 2$  s.

El procedimiento de amasado debe ser el siguiente:

- a) Se vierte el agua y el cemento dentro del recipiente, teniendo cuidado para evitar pérdidas de agua o de cemento; el vertido debe completarse en un plazo de 10 s;
- b) Inmediatamente después de entrar en contacto el agua y el cemento, se pone en marcha la amasadora a velocidad lenta (véase la tabla 2), mientras se inician los tiempos de amasado. Adicionalmente se registra el tiempo, al minuto más cercano, como "tiempo cero". Después de 30 s de amasado, se añade regularmente la arena durante los 30 s siguientes. Se pone la amasadora a la velocidad rápida (véase la tabla 2) y se continua el amasado durante otros 30 s.

NOTA "Tiempo cero" es la referencia a partir de la cual se calculan los tiempos de desmoldeado de las probetas (véase 8.2) y para la determinación de la resistencia (véase 8.4).



- c) Se para la amasadora durante 90 s. En los primeros 30 s, se retira por medio de una espátula de goma o de plástico todo el mortero adherido a las paredes laterales y al fondo del recipiente y se coloca en el centro de la amasadora;
- d) Se continua el amasado a velocidad rápida durante 60 s.

Normalmente estas operaciones de amasado se llevan a cabo de forma automática. También puede emplearse un control manual para estas operaciones.

## **7 Preparación de las probetas de ensayo**

### **7.1 Tamaño de las probetas**

Las probetas deben ser prismáticas de 40 mm × 40 mm × 160 mm.

### **7.2 Enmoldado de las probetas**

Se enmoldan las probetas inmediatamente después de la preparación del mortero. Con el molde y la tolva firmemente unidos a la mesa de la compactadora, se introduce directamente de la cubeta de la amasadora, en una o varias veces, con una cuchara adecuada, la primera de las dos capas de mortero (cada una aproximadamente de 300 g) en cada compartimento del molde.

Se extiende la capa uniformemente, utilizando la espátula grande (véase la figura 3), mantenida verticalmente y con sus ensanchamientos en contacto con el borde superior de la tolva, pasándola a lo largo de cada compartimento del molde, hacia delante y hacia atrás. A continuación se compacta la primera capa de mortero con 60 golpes con la compactadora (4.6). Se introduce la segunda capa de mortero, asegurándose de que hay excedente de mortero, se iguala con la espátula pequeña (véase la figura 3), y se compacta la capa con otros 60 golpes.

Se retira con precaución el molde de la mesa de sacudidas y se separa la tolva. Inmediatamente, se quita el exceso de mortero con la regla plana (véase la figura 3), manteniéndola casi vertical pero inclinada en la dirección del movimiento, con lentos movimientos transversales de sierra, una vez en cada dirección. Se repite este procedimiento con la regla plana mantenida a un ángulo más agudo para alisar la superficie.

NOTA El número de pasadas y el ángulo de la regla dependerán de la consistencia del mortero; morteros más rígidos requerirán más pasadas y ángulos más agudos; se requiere un número menor de pasadas para el alisado que para la eliminación del exceso de mortero (véase figura 2).

Se quita el mortero que quede en el perímetro del molde como consecuencia del enrasado.

Se etiquetan o marcan los moldes para identificar las probetas.

## **8 Acondicionamiento de las probetas**

### **8.1 Manipulación y conservación antes de desmoldear**

Se coloca sobre el molde una lámina de vidrio de aproximadamente 210 mm × 185 mm × 6 mm de espesor. Se puede utilizar una chapa de acero o de otro material impermeable que no reaccione con el cemento.

Por razones de seguridad, asegurarse que las placas de vidrio utilizadas tienen los bordes redondeados.

Sin pérdida de tiempo, se coloca cada molde cubierto sobre una superficie horizontal, en la cámara o armario húmedo (véase 4.1). El aire húmedo debe tener acceso a todos los lados del molde. Los moldes no se deben apilar uno sobre otro. Cada molde se debe sacar de la cámara húmeda a la hora prevista para el desmoldeo.

## **8.2 Desmoldeo de las probetas**

Se lleva a cabo el desmoldeo sin dañar las probetas. Para el desmoldeo se pueden utilizar martillos de plástico o de goma, o bien otros utensilios especiales. Para los ensayos a 24 h, el desmoldeo se realizará, como máximo, 20 min antes de que las probetas vayan a ser ensayadas. Para los ensayos a edades superiores a 24 h, el desmoldeo se realizará entre 20 h y 24 h después del enmoldado.

El desmoldeo se puede retrasar 24 h si el mortero no ha adquirido a las 24 h la resistencia suficiente para ser manejado sin riesgo de daño. En el informe del ensayo se debería mencionar este retraso en el desmoldeo.

Las probetas desmoldeadas, elegidas para ensayar a 24 h (o a 48 h cuando el retraso en el desmoldeo haya sido necesario) se mantienen cubiertas con un paño húmedo hasta el momento del ensayo. Las probetas seleccionadas para curado en agua, deben marcarse adecuadamente para su identificación posterior, por ejemplo, con lápiz o tinta resistente al agua.

Se recomienda pesar las probetas de cada molde como control del contenido de aire del mortero y de las operaciones de mezclado y compactación.

## **8.3 Curado de las probetas en agua**

Se sumergen rápidamente las probetas marcadas, de manera adecuada, colocadas horizontal o verticalmente, en agua a  $(20,0 \pm 1,0)$  °C en los depósitos adecuados. Si el almacenamiento es horizontal, se deben mantener verticales las caras que en el molde eran verticales.

Se colocan las probetas sobre emparrillados (véase 4.1), y se mantienen separadas unas de otras, de forma que el agua tenga libre acceso a las seis caras de las probetas. En ningún momento durante la conservación, la separación entre probetas y la lámina de agua sobre la cara superior de las mismas, debe ser menor que 5 mm.

En cada depósito solamente se deben almacenar probetas fabricadas con cementos de similar composición química, a menos que se haya demostrado que la composición del cemento a ensayar no influye en el desarrollo de la resistencia de otros cementos en ensayo; cementos conocidos con un contenido superior al 0,10% en cloruros, deben almacenarse de forma separada.

Se utilizará agua potable para el llenado de los depósitos y para las posibles adiciones para mantener un nivel de agua razonablemente constante. Durante la conservación de las probetas no se permite cambiar más del 50% del agua.

La instalación debe asegurar una temperatura uniforme de conservación; si se utiliza un sistema de circulación dentro del depósito de almacenamiento, la velocidad del flujo debe ser tan baja como sea posible para no causar turbulencias visibles.

Las probetas que deben ensayarse a una edad determinada (distinta de 24 h, o 48 h en caso de retraso en el desmoldeado), deberán sacarse del agua como máximo 15 min antes de la realización del ensayo. Se quita cualquier sedimento que se haya depositado en las caras del ensayo. Se cubren las probetas con un trapo húmedo hasta el momento del ensayo.

#### 8.4 Edad de las probetas para los ensayos de resistencias mecánicas

Se calcula la edad de las probetas desde el “tiempo cero” (véase 6.2). Se realizarán ensayos de resistencia a diferentes edades dentro de los siguientes límites:

- 24 h ± 15 min;
- 48 h ± 30 min;
- 72 h ± 45 min;
- 7 d ± 2 h;
- ≥ 28 d ± 8 h.

### 9 Procedimientos de ensayo

#### 9.1 Resistencia a flexión

Se utiliza el método de carga de los tres puntos con uno de los equipos descritos en el apartado 4.7.

Se coloca el prisma en la máquina de ensayo (4.7), con una cara lateral sobre los rodillos soporte y con su eje longitudinal normal a los soportes. Se aplica la carga verticalmente mediante los rodillos de carga sobre la cara lateral opuesta del prisma y se incrementa uniformemente, a una velocidad de (50 ± 10) N/s hasta rotura.

Se mantienen las mitades del prisma cubiertas con un paño húmedo hasta el ensayo de compresión.

Se calcula la resistencia a flexión,  $R_f$ , en megapascales, mediante la siguiente fórmula:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (1)$$

donde

$R_f$  es la resistencia a flexión (en megapascales);

$b$  es el lado de la sección cuadrada del prisma (en milímetros);

$F_f$  es la carga aplicada en la mitad del prisma en la rotura (en newtons);

$l$  es la distancia entre soportes (en milímetros).

## 9.2 Resistencia a compresión

Se ensayan los semiprismas rotos con ayuda del equipo especificado en el apartado 9.1 o bien utilizando medios adecuados que no sometan los semiprismas a ningún daño.

Se ensaya cada semiprisma cargando sus caras laterales con ayuda del equipo especificado en los apartados 4.8 y 4.9.

Se centra cada semiprisma lateralmente con relación a los platos de la máquina a  $\pm 0,5$  mm, y longitudinalmente de forma que la base del prisma no sobresalga de los platos o placas auxiliares más de unos 10 mm.

Se aumenta la carga uniformemente a una velocidad de  $(2\ 400 \pm 200)$  N/s durante todo el tiempo de aplicación de la carga hasta la rotura.

Cuando el incremento de carga se regula a mano, se debería tener cuidado al ajustar la disminución de la velocidad de carga cerca de la carga de rotura, ya que puede afectar significativamente al resultado.

Se calcula la resistencia a compresión  $R_c$  (en megapascales) mediante la fórmula siguiente:

$$R_c = \frac{F_c}{1\ 600} \quad (2)$$

donde

$R_c$  es la resistencia a compresión (en megapascales);

$F_c$  es la carga máxima de rotura (en newtons);

1 600 = 40 mm  $\times$  40 mm, es la superficie de los platos o placas auxiliares (en milímetros cuadrados).

## 10 Resultados

### 10.1 Resistencia a flexión

#### 10.1.1 Cálculo y expresión de los resultados del ensayo

Se calcula el resultado del ensayo de resistencia a flexión como la media aritmética de los tres resultados individuales, expresados, cada uno de ellos, redondeados al 0,1 MPa más cercano, y obtenidos de la determinación realizada sobre un conjunto de tres probetas.

Se expresa la media aritmética redondeada al 0,1 MPa más cercano.

#### 10.1.2 Informe de resultados

Se registran todos los resultados individuales. Se informa de la media calculada.

## **10.2 Resistencia a compresión**

### **10.2.1 Cálculo y expresión de los resultados del ensayo**

Se calcula el resultado del ensayo de resistencia a compresión como la media aritmética de los seis resultados individuales, expresados, cada uno, redondeados al 0,1 MPa más cercano, obtenidos de las seis determinaciones realizadas sobre un conjunto de tres probetas.

Si uno de los resultados de las seis determinaciones varía en más de  $\pm 10\%$  respecto a la media, se descarta este resultado y se calcula la media aritmética de los cinco resultados restantes. Si uno de los resultados de los cinco resultados restantes varía en más de  $\pm 10\%$  respecto a su media, se descarta la totalidad de los resultados y se repite la determinación.

Se expresa la media aritmética redondeada al 0,1 MPa más cercano.

### **10.2.2 Informe de resultados**

Se registran todos los resultados individuales. Se informa de la media calculada y sobre cualquier resultado descartado según el apartado 10.2.1.

### **10.2.3 Estimación de la precisión del método de resistencia a compresión**

#### **10.2.3.1 Repetibilidad a corto plazo**

La repetibilidad a corto plazo para el método de ensayo de resistencia a compresión proporciona el grado de aproximación entre resultados obtenidos sobre muestras de cemento nominalmente idénticas, utilizando la misma arena normalizada CEN, ensayadas en el mismo laboratorio, por el mismo operador y empleando el mismo equipamiento a intervalos cortos de tiempo.

En el caso de las resistencias a compresión a los 28 días, la repetibilidad a corto plazo para un “comportamiento normal” que se puede obtener en las condiciones anteriores, debería ser inferior al 2,0% cuando se exprese como coeficiente de variación.

NOTA 1 La experiencia indica que se obtienen mejores resultados y que esto puede encontrarse de forma habitual en algunos laboratorios. Se corresponde al valor de 1% para la repetibilidad a corto plazo, cuando se expresa como coeficiente de variación.

NOTA 2 La experiencia ha demostrado que la repetibilidad es del 3,0% para la resistencia a compresión a 2 días y de 2,5% para la resistencia a compresión a 7 días, cuando se expresa como coeficiente de variación.

La repetibilidad a corto plazo es una medida de la precisión del método de ensayo cuando se emplea para el ensayo de validación de la arena normalizada CEN y el equipo de compactación alternativo.

#### **10.2.3.2 Repetibilidad a largo plazo**

La repetibilidad a largo plazo para el método de ensayo de resistencia a compresión proporciona el grado de aproximación entre resultados obtenidos de ensayos frecuentes sobre diferentes muestras tomadas de la misma muestra de cemento homogeneizada, ensayada en el mismo laboratorio, en las siguientes condiciones: posibles operadores diferentes, equipos diferentes, misma arena normalizada CEN y en largos períodos de tiempo (hasta un año).

En el caso de la resistencia a compresión a los 28 días, la repetibilidad a largo plazo para un “comportamiento normal” que se puede obtener en las condiciones anteriores, debería ser inferior al 3,5% cuando se exprese como coeficiente de variación.

NOTA La experiencia indica que se obtienen mejores resultados y que esto puede encontrarse de forma habitual en algunos laboratorios. Se corresponde al valor de 2,5% para la repetibilidad a largo plazo, cuando se expresa como coeficiente de variación.

La repetibilidad a largo plazo es una medida de la precisión del ensayo cuando se emplea para el ensayo de autocontrol del cemento o los ensayos mensuales de verificación de la arena normalizada CEN y para la evaluación del mantenimiento de la precisión del laboratorio en el tiempo.

### **10.2.3.3 Reproducibilidad**

La reproducibilidad del método de ensayo de la resistencia a compresión, proporciona el grado de aproximación entre resultados obtenidos sobre muestras idénticas de cemento ensayadas por diferentes laboratorios en las condiciones siguientes: diferentes operadores, equipos diferentes, posiblemente arenas normalizadas CEN diferentes y posiblemente en momentos diferentes.

En el caso de la resistencia a compresión a 28 días, la reproducibilidad entre laboratorios para un "comportamiento normal" que se puede obtener en las condiciones anteriores, debería ser inferior al 4,0% cuando se expresa como coeficiente de variación.

NOTA1 La experiencia indica que se obtienen mejores resultados y que esto puede encontrarse de forma habitual en algunos laboratorios. Se corresponde con el valor de 3% para la reproducibilidad, cuando se expresa como coeficiente de variación.

NOTA 2 Resultados de ensayos interlaboratorios a nivel internacional han indicado que la reproducibilidad es de 5,5% para la resistencia a compresión a 2 días y de 4,5% para la resistencia a compresión a 7 días, cuando se expresa como coeficiente de variación.

La reproducibilidad es una medida de la precisión del ensayo cuando se emplea para la evaluación de la conformidad del cemento o de la arena normalizada CEN.

## **11 Ensayos de validación de la arena normalizada CEN y del equipo alternativo de compactación**

### **11.1 Generalidades**

Una arena normalizada CEN que cumpla con el apartado 5.1.3 o bien un equipo de compactación alternativo pueden emplearse, según el capítulo 3, siempre que se demuestre que proporcionan resultados de resistencia del cemento que no difieren significativamente de aquellos obtenidos empleando arena de referencia CEN (5.1.2) o el equipo de compactación de referencia (4.6) y el procedimiento respectivo.

Este capítulo describe las condiciones bajo las cuales las arenas normalizadas CEN y los equipos alternativos de compactación pueden validarse. La validación debe proporcionarla un organismo de certificación y debe basarse en los resultados de ensayos llevados a cabo por un laboratorio de ensayo designado por el organismo de certificación.

Los laboratorios de ensayo nominados deberían participar en programas de ensayo interlaboratorios para asegurar que los ensayos de validación se realizan en niveles de ensayo comparables.

Los métodos de ensayo que se describen y que deben aplicarse están basados en resultados de ensayos comparativos de resistencia a compresión a la edad de 28 días.

## **11.2 Ensayos de validación de la arena normalizada CEN**

### **11.2.1 Principio**

Los ensayos de validación de la arena normalizada CEN comprenden:

- a) ensayos de certificación llevados a cabo bajo la autoridad de un organismo de certificación;
- b) ensayos de verificación llevados a cabo por el productor de la arena.

Los ensayos de certificación de la arena normalizada CEN se describen en el apartado 11.2.2. Incluyen un ensayo de certificación inicial (11.2.2.1) y un ensayo de confirmación anual (11.2.2.2). Cuando se cumplan los requisitos del apartado 11.2.3.3, el organismo de certificación debe emitir un certificado de conformidad con esta norma después de los ensayos iniciales de certificación y un certificado de renovación después del ensayo de confirmación anual.

Los ensayos de verificación de la arena normalizada CEN se describen en el apartado 11.2.4. Basados en los ensayos de autocontrol realizados por el productor de la arena, y siempre que cumplan los requisitos del apartado 11.2.5.3, aseguran que una arena normalizada CEN certificada es conforme con esta norma. Los resultados de los ensayos de autocontrol son inspeccionados por el organismo de certificación dentro del plan anual de ensayos de confirmación.

Una arena validada debe designarse como “arena normalizada CEN EN 196-1”.

### **11.2.2 Ensayos de certificación de la arena normalizada CEN**

#### **11.2.2.1 Ensayos de certificación inicial**

El productor de arena debe demostrar que la planta de producción es operativa antes de aplicarle el organismo de certificación los ensayos de certificación inicial de la arena.

Durante un período de producción de al menos tres meses, deben tomarse tres muestras de arena independientes en el punto de expedición bajo la autoridad del organismo de certificación. El número de bolsas a tomar de cada una de estas tres muestras debe calcularse para tener la cantidad suficiente de arena requerida por el método de ensayo de certificación según el apartado 11.2.3.1. Además, el tamaño de una de las tres muestras debe ser suficientemente grande como para tener la cantidad de arena requerida por el método del ensayo de verificación según el apartado 11.2.5.1 durante un período de al menos un año. Para este propósito, esta muestra debe dividirse bajo la autoridad del organismo de certificación y las submuestras a emplear para los ensayos de verificación debe guardarlas el productor de la arena.

Cada una de las tres muestras debe ensayarse frente a la arena de referencia CEN, aplicando el método descrito en el apartado 11.2.3, empleando un cemento diferente de los tres tipos de clases de resistencias normalizadas, seleccionados bajo la autoridad del organismo de certificación. Los ensayos deben llevarse a cabo en un laboratorio de ensayos designado (véase 11.1).

Cuando cada uno de los resultados obtenidos de las tres muestras, expresadas como se indica en el apartado 11.2.3.2, cumplan los requisitos del apartado 11.2.3.3, la arena debe ser validada y el organismo de certificación debe emitir un certificado de conformidad (véase 11.2.1).

### **11.2.2.2 Ensayo anual de confirmación**

La renovación del certificado concedido a un productor de arena será el resultado de las acciones siguientes del organismo de certificación:

- a) inspección de los registros de ensayos de verificación llevados a cabo por el productor de la arena de acuerdo con el apartado 11.2.4 y, siempre que se cumplan los requisitos de los apartados 5.1.3 y 11.2.5.3;
- b) ensayo del laboratorio designado (véase 11.1) de una muestra tomada al azar frente a la arena de referencia CEN, aplicando el método descrito en el apartado 11.2.3, empleando un cemento CEM I 42,5N, 42,5R o 52,5N conforme a la Norma EN 197-1, seleccionado bajo supervisión del organismo de certificación.

La muestra de arena tomada al azar debe ser tomada en el punto de expedición bajo la supervisión del organismo de certificación. El número de sacos que se tomarán debe calcularse para tener la cantidad de arena suficiente requerida por el método de ensayo de certificación de acuerdo con el apartado 11.2.3.1 y por el método de ensayo de verificación según el apartado 11.2.5.1 durante un período de al menos un año. Para este propósito, la muestra debe dividirse bajo la supervisión del organismo de certificación, y la submuestra a utilizar en el ensayo de verificación debe guardarse por el productor de la arena.

Cuando los resultados de los ensayos de verificación, a) cumplan los requisitos de los apartados 5.1.3 y 11.2.5.3, y los apartados de los ensayos de certificación, y b) cumplan los requisitos del apartado 11.2.3.3, la arena debe ser validada y el organismo de certificación debe emitir la renovación del certificado de conformidad (véase 11.2.1).

### **11.2.3 Método de los ensayos de certificación**

#### **11.2.3.1 Procedimiento**

Se preparan 20 pares de lotes de mortero empleando una muestra del cemento seleccionado (véanse 11.2.2.1 y 11.2.2.2). Se emplea la arena a validar para uno de los lotes y la arena de referencia CEN para el otro. Se preparan los dos lotes de cada par en orden aleatorio, uno inmediatamente después del otro, según lo indicado en esta norma.

Se ensayan las probetas a resistencia a compresión a la edad de 28 días, y se registran todos los resultados individuales.

#### **11.2.3.2 Cálculo y expresión de los resultados**

Para cada par de resultados, se calculan y expresan los resultados de la resistencia a compresión de acuerdo con el apartado 10.2.1 y se registran según el apartado 10.2.2, como  $x$  para los resultados obtenidos con la arena a validar e  $y$  para el resultado obtenido con la arena de referencia CEN.

Se calcula el coeficiente de variación para cada uno de los dos conjuntos de resultados y se comprueba que cumplen con los requisitos de repetibilidad a corto plazo según el apartado 10.2.3.1.

Si los dos conjuntos de resultados no cumplen este requisito, se descartan todos los resultados y se repite la totalidad del procedimiento de ensayo.



Si uno de los juegos de resultados no cumple este requisito, se procede como sigue:

- a) Se calcula el valor medio de los 20 resultados,  $\bar{x}$  o  $\bar{y}$ .
- b) Se calcula la desviación típica de los 20 resultados,  $s$ .
- c) Se calcula la diferencia aritmética entre cada resultado y el valor medio, sin tener en cuenta el signo.
- d) Cuando una de estas diferencias sea mayor de  $3s$ , se descarta el resultado correspondiente y se calcula el valor medio de los 19 resultados restantes; cuando dos o más de estas diferencias sean mayores de  $3s$ , se descartan todos los resultados y se repite la totalidad del procedimiento de ensayo; cuando no existan diferencias superiores a  $3s$ , se mantienen los 20 resultados.

Se calcula el criterio de validación,  $D$ , utilizando la fórmula:

$$D = 100 \frac{(\bar{x} - \bar{y})}{\bar{y}} \quad (3)$$

donde

$D$  es el criterio de validación, en porcentaje;

$\bar{x}$  es el valor medio de los resultados obtenidos con la arena a validar, en megapascales;

$\bar{y}$  es el valor medio de los resultados obtenidos con la arena de referencia CEN, en megapascales.

Se registra ( $D$ ) redondeado a 0,1% más próximo, sin considerar el signo.

### 11.2.3.3 Requisitos

Para validar una arena según el procedimiento de ensayo de certificación inicial (véase 11.2.2.1), cada uno de los tres valores del criterio de validación,  $D$ , calculados y expresados según el apartado 11.2.3.2, debe ser inferior al 5,0%. Cuando uno o más de los valores de  $D$  calculados sea igual o superior al 5,0%, la arena no debe ser validada.

Para validar una arena normalizada CEN de acuerdo con el procedimiento de ensayo anual de confirmación (11.2.2.2), el valor del criterio de validación,  $D$ , calculado y expresado según el apartado 11.2.3.2, debe ser inferior al 5,0%. Cuando el valor calculado de  $D$  sea igual o superior al 5,0%, la arena normalizada CEN no debe ser validada, se debe identificar la causa y se debe llevar a cabo el procedimiento de ensayo de certificación inicial (11.2.2.1) para una posterior validación.

### 11.2.4 Ensayos de verificación de la arena normalizada CEN

Para demostrar que la arena normalizada CEN es conforme con esta norma, el productor de la arena debe llevar a cabo continuos ensayos de autocontrol, los cuales deben comprender:

- a) ensayo diario de la distribución granulométrica y contenido de humedad, según el apartado 5.1.3;

- b) ensayos mensuales según el apartado 11.2.5 de una muestra de la arena normalizada CEN producida, frente a una muestra de la misma arena normalizada CEN tomada bajo la inspección del organismo de certificación (véanse 11.2.2.1 y 11.2.2.2).

Para este propósito, las muestras deben tomarse por el productor de la arena en el punto de la expedición, una vez al día para los ensayos diarios y una vez al mes para los ensayos mensuales.

El productor de la arena debe comprobar que se cumplen las especificaciones de los apartados 5.1.3 y 11.2.5.3 y debe informar al organismo de certificación de cualquier no conformidad.

Se deben registrar todos los resultados, teniéndolos a disposición del organismo de certificación para inspección, y manteniéndolos durante, al menos, tres años.

### **11.2.5 Método de ensayo de verificación para la arena normalizada CEN**

#### **11.2.5.1 Procedimiento**

Se preparan 10 pares de lotes de mortero utilizando una muestra de cemento seleccionada bajo la inspección del organismo de certificación para el ensayo por el laboratorio seleccionado (11.2.2.2b)). Se utiliza la muestra tomada una vez al mes por el productor (11.2.4) para un lote y la muestra tomada una vez al año bajo la inspección del organismo de certificación (11.2.2.1 y 11.2.2.2) para el otro. Se preparan los dos lotes en cada par por orden aleatorio, uno después del otro, según esta norma.

Se ensayan las probetas a resistencia a compresión a los 28 días y se registran todos los resultados individuales.

#### **11.2.5.2 Cálculo y expresión de los resultados**

Para cada par de lotes, se calculan y expresan los resultados de resistencia a compresión según el apartado 10.2.1 y se indican según el apartado 10.2.2, como  $x$  para el resultado obtenido con la muestra tomada por el productor e  $y$  para el resultado obtenido con la muestra tomada bajo la inspección del organismo de certificación.

Se calcula el coeficiente de variación para cada uno de los dos conjuntos de resultados y se aplica el procedimiento del apartado 11.2.3.2 adaptado a los 10 pares de lotes.

NOTA Cuando un conjunto de resultados falla en el cumplimiento de los requisitos de repetibilidad a corto plazo, el procedimiento establecido en el apartado 11.2.3.2 se llevará a cabo en lotes de 10 resultados, reduciéndolo a un mínimo de 9 resultados para los propósitos de la evaluación basada en el punto d) del apartado 11.2.3.2.

Se calcula y registra el criterio de validación,  $D$ , según lo descrito en el apartado 11.2.3.2.

#### **11.2.5.3 Requisitos**

En una serie de 12 ensayos mensuales consecutivos, el criterio de validación,  $D$ , calculado y expresado de acuerdo con el apartado 11.2.5.2, no debe exceder 2,5% más de dos veces. Si más de dos valores de  $D$  son superiores a 2,5%, el organismo de certificación debe ser informado, identificándose la causa y debiéndose llevar a cabo el procedimiento de ensayo de certificación inicial (11.2.2.1) para una posterior validación.

## **11.3 Ensayos de validación del equipo alternativo de compactación**

### **11.3.1 Requisitos generales**

Cuando se requiera un ensayo de validación para un equipo alternativo de compactación, se debe suministrar la siguiente documentación al organismo de certificación.

- a) descripción detallada del procedimiento de compactación;
- b) descripción detallada del equipo de compactación (diseño y construcción);
- c) instrucciones del servicio, incluyendo comprobaciones para asegurar su correcto funcionamiento.

El organismo de certificación debe seleccionar tres lotes de equipos comercialmente disponibles para validarlos. Los tres lotes de equipos se deben ensayar frente al equipo de referencia conforme a los requisitos del apartado 4.6. Para ello, se deben colocar en un laboratorio de ensayo elegido por el organismo de certificación.

Bajo la supervisión del organismo de certificación, el laboratorio de ensayo debe comparar las características de los equipos a validar con la descripción enviada. Cuando se verifique la correspondencia de uno con otro, el laboratorio de ensayo elegido debe realizar tres ensayos comparativos según el procedimiento del apartado 11.3.2, empleando para cada equipo a validar un cemento diferente. Para ello, se deben seleccionar tres cementos de diferentes clases resistentes bajo la supervisión del organismo de certificación.

Cuando los resultados de cada uno de los tres ensayos comparativos cumplan con los requisitos del apartado 11.3.2.3, el organismo de certificación debe validar el equipo alternativo de compactación.

A continuación, la descripción técnica del equipo y la descripción del procedimiento de compactación deben considerarse como una alternativa validada a los apartados 4.6 y 7.2 respectivamente.

La descripción técnica del equipo alternativo y la descripción del procedimiento alternativo de compactación que han sido validados se incluyen en el anexo A (normativo) de esta norma.

### **11.3.2 Método de ensayo del equipo alternativo de compactación**

#### **11.3.2.1 Procedimiento**

Se preparan 20 lotes de mortero empleando uno de los cementos seleccionados (véase 11.3.1) y la arena de referencia CEN. Se preparan los dos lotes en cada par en orden aleatorio, uno inmediatamente después del otro, según lo descrito en esta norma.

Se compactan las probetas utilizando un conjunto completo del equipo alternativo para un lote y el equipo de compactación de referencia (4.6) para el otro.

Después de la compactación, se procede según lo indicado en esta norma.

Se ensayan las probetas a compresión a los 28 días y se registran todos los resultados individuales.

### 11.3.2.2 Cálculo y expresión de los resultados

Para cada par de lotes, se calculan y expresan los resultados de resistencia a compresión según el apartado 10.2.1 y se indican según el apartado 10.2.2, como  $x$  para el resultado obtenido con el conjunto del equipo alternativo de compactación a validar e  $y$  para el resultado obtenido con el equipo de compactación de referencia.

Se calcula el coeficiente de variación para cada uno de los dos conjuntos de resultados y se comprueba que cumplen el requisito de repetibilidad a corto plazo expresado en el apartado 10.2.3.1.

Si los dos conjuntos de resultados no cumplen este requisito, se descartan todos los resultados y se repite el procedimiento completo de ensayo.

Si uno de los resultados no cumple con este requisito, se procede como sigue:

- a) Se calcula el valor medio de los 20 resultados,  $\bar{x}$  o  $\bar{y}$ .
- b) Se calcula la desviación típica de los 20 resultados,  $s$ .
- c) Se calcula la diferencia aritmética entre cada resultado y el valor medio, sin tener en cuenta el signo.

Cuando una de estas diferencias sea superior a  $3s$ , se descarta el resultado correspondiente y se calcula el valor medio de los 19 resultados restantes; cuando dos o más de estas diferencias sean superiores a  $3s$ , se descartan todos los resultados y se repite la totalidad del ensayo; cuando no exista diferencia superior a  $3s$ , se mantienen los 20 resultados.

Se calcula el criterio de validación ( $D$ ) empleando la fórmula:

$$D = 100 \frac{(\bar{x} - \bar{y})}{\bar{y}} \quad (4)$$

donde

$D$  es el criterio de validación, en porcentaje;

$\bar{x}$  es el valor medio de los resultados obtenidos con el equipo alternativo de compactación a validar, en megapascales;

$\bar{y}$  es el valor medio de los resultados obtenidos con la compactadora de referencia, en megapascales.

Se indica ( $D$ ) aproximándolo al 0,1% más próximo, sin tener en cuenta el signo.

### 11.3.2.3 Requisitos

Los tres valores del criterio de validación,  $D$ , calculados y expresados según el apartado 11.3.2.2, correspondientes a cada uno de los tres cementos seleccionados y a cada uno de los tres conjuntos de equipos a validar, deben ser inferiores a 5,0%. Cuando uno o más de los valores calculados de  $D$  sea igual o superior a 5,0%, el equipo alternativo de compactación no debe validarse.

## Anexo A (Normativo)

### Equipo alternativo de vibración, compactación y procedimientos validados como equivalentes al equipo de compactación de referencia y su procedimiento

#### A.1 Generalidades

La compactadora de referencia se describe en el apartado 4.6. Sin embargo, el capítulo 1 permite emplear procedimientos y equipo alternativos " ... siempre y cuando hayan sido validados de acuerdo a lo indicado en esta norma".

Para la validación, se describe, en el capítulo 11, un procedimiento para validar alternativas al procedimiento de referencia. Se han llevado a cabo programas de ensayo de validación sobre mesas de vibración y procedimientos de compactación, identificadas como A y B en los capítulos A.2 y A.3. Son, por tanto, ejemplos de equipos alternativos de compactación validados.

De acuerdo con el apartado 11.3.1, cada descripción técnica (véanse A.2.1 y A.3.1) debe considerarse como una alternativa validada al equipo del apartado 4.6 y cada descripción del procedimiento de compactación (véanse A.2.2 y A.3.2) debe considerarse como una alternativa validada al apartado 7.2.

#### A.2 Mesa de vibración, A

##### A.2.1 Descripción técnica

La mesa de vibración A, que puede utilizarse como equipo alternativo de compactación, comprende:

- a) Método de operación:           vibrador electromagnético con una vibración sinusoidal nominal.
- b) Suministro eléctrico:
  - 1) voltaje:           230/240 V
  - 2) fase:            monofásica
  - 3) corriente:       máx. 6,3 A
  - 4) frecuencia:     nominal 50 Hz
- c) Masa vibrante (incluido molde vacío, tolva y anclajes pero excluyendo el vibrador):  

(35,0 ± 1,5) kg
- d) Amplitud de operación vertical de pico a pico: (0,75 ± 0,05) mm, medida en el centro que separa las paredes y las esquinas exteriores del molde vacío.

NOTA 1 La mesa vibrante está diseñada para producir solamente vibraciones verticales uniaxiales. La amplitud vertical de vibración está continuamente mostrada.

NOTA 2 La aceleración, medida en el centro equidistante de las paredes y esquinas exteriores del molde vacío, puede tener características alternativas para describir la operación de vibración de la mesa. El valor de (26,0 ± 3,0) m/s<sup>2</sup> corresponde al valor dado en el punto d) del apartado A.2.1.

- e) Frecuencia natural de la masa vibrante (53,00 ± 0,25) Hz.
- f) Placa vibrante: placa con un acabado terminado pulido como superficie de trabajo; dimensiones mínimas nominales de 400 mm × 300 mm compuesta de:
- 1) bien una chapa rígida sencilla de acero inoxidable, con soporte, o,
  - 2) una doble chapa rígida de metal (espesor mínimo de 20 mm), la superior hecha de acero inoxidable con espesor mínimo de 2 mm, unida de forma permanente a la capa inferior por medio de una conexión trabada y de fricción.

Se recomienda que el centro de gravedad de la masa vibrante (incluidos los anclajes pero sin incluir el molde vacío y la tolva), esté marcado sobre la superficie de trabajo de la base vibrante en la intersección de dos ejes verticales ortogonales.

- g) Puntos de fijación ajustables: tres puntos de fijación ajustables que permiten la sujeción del molde sobre la base vibrante de tal forma que su centro de gravedad coincida con el centro de gravedad de la mesa vibrante, marcada en la superficie de trabajo de la mesa de vibración.
- h) Abrazadera para los moldes: accesorios de fijación adecuados para los moldes de 40 mm × 40 mm × 160 mm, incluyendo la tolva montada.
- i) Masa de la mesa vibrante: superior a 100 kg.

En el caso de que la mesa vibrante se construya sobre muebles del laboratorio, es recomendable que el vibrador electromagnético esté permanentemente fijado a la masa de hormigón de, al menos 200 kg, sobre un material aislante de la vibración, para minimizar la transferencia de vibración a cualquier otro equipo.

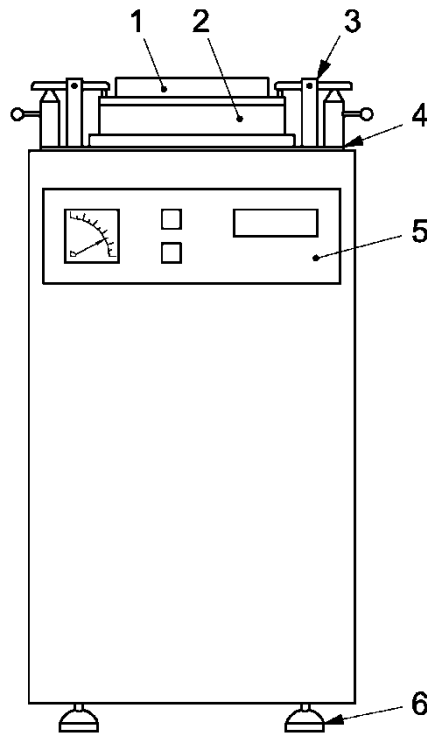
- j) Soportes antivibración: muelles de goma situados entre el plato de vibración y el marco, con:
- 1) dureza Shore: 45
  - 2) rango del muelle: 145 MPa
  - 3) dimensiones, diámetro: 50 mm
- altura: 45 mm
- k) Nivelación de la mesa de vibración: con la ayuda de tornillos ajustables (véase la figura A.1) situados en la superficie inferior, se coloca la mesa de vibración de tal forma que la superficie de trabajo del plato de vibración no se desvíe de la horizontal en más de 1 mm/m.
- l) Temporizador automático: temporizador capaz de ponerse a 120 s y con precisión de ± 1 s en las lecturas de tiempo.

### A.2.2 Procedimiento de compactación empleando la mesa de vibración, A

Se preparan las probetas inmediatamente después de la preparación del mortero.

Se monta el molde firmemente con la tolva en el centro de la mesa de vibración. Se pone el temporizador automático para que se detenga a los  $(120 \pm 1)$  s. Se pone en marcha el vibrador. Se rellenan los compartimentos del molde con dos capas de mortero en un máximo de 45 s, procediendo como sigue a continuación.

Se trabaja de un extremo al otro, introduciendo la primera capa de mortero, empleando un cazo adecuado, en los compartimentos del molde en 15 s, de tal forma que los compartimentos queden llenos aproximadamente a la mitad.



#### Leyenda

- 1 Tolva
- 2 Molde
- 3 Abrazadera
- 4 Mesa de vibración
- 5 Panel de control con indicación de la amplitud, configurador de la amplitud, temporizador e interruptor principal
- 6 Tornillos ajustables

**Figura A.1 - Esquema de una mesa típica de vibración, tipo A**

Después de un intervalo de 15 s, se introduce la segunda capa de mortero en el molde en no más de 15 s, siempre trabajando de un extremo al otro, en la misma dirección que la primera capa introducida. Se emplea la totalidad del mortero.

Cuando el vibrador se haya parado después de los  $(120 \pm 1)$  s, se levanta suavemente el molde de la mesa de vibración y se retira la tolva.

Se siguen los procedimientos de desmontaje, limpieza y etiquetado de los moldes descritos en el apartado 7.2.

### A.3 Mesa de vibración, B

#### A.3.1 Descripción técnica

La mesa de vibración B, que puede utilizarse como equipo de compactación alternativo, comprende:

- a) Método de operación: vibrador electromagnético con una vibración sinusoidal nominal.
  - b) Suministro eléctrico:
    - 1) voltaje: 230/240 V
    - 2) fase: monofásica
    - 3) corriente: aproximadamente 6,3 A
    - 4) frecuencia: nominal 50 Hz
  - c) Masa vibrante (incluyendo molde vacío y tolva, pero excluyendo el vibrador):  
(43,0  $\pm$  2,0) kg
  - d) Aceleración de operación vertical: (4,50  $\pm$  0,25) g rms, medida en la base del molde en el centro del compartimento del medio.
- NOTA La aceleración máxima en cualquier dirección horizontal es 0,5 g rms.
- e) Frecuencia natural de la masa vibrante: (55,50  $\pm$  0,25) Hz
  - f) Placa vibrante: placa, con una superficie pulida como superficie de trabajo; de dimensiones nominales de 630 mm  $\times$  250 mm consistente en:
    - 1) una placa rígida sencilla de acero suave de espesor (13  $\pm$  2) mm.
    - 2) soportes de apoyo y placa guía.
  - g) Abrazadera para los moldes: accesorios de fijación adecuados para moldes de 40 mm  $\times$  40 mm  $\times$  160 mm, incluyendo la tolva montada.
  - h) Nivelación de la placa vibrante: la placa vibrante está permanentemente fijada al suelo y nivelada de forma que la superficie de trabajo de la placa no se desvíe de la horizontal en más de 1 mm/m.
  - i) Temporizador automático: temporizador capaz de ponerse a 120 s y con precisión de  $\pm$  1 s en las lecturas de tiempo.



### A.3.2 Procedimiento de compactación empleando la mesa vibrante, B

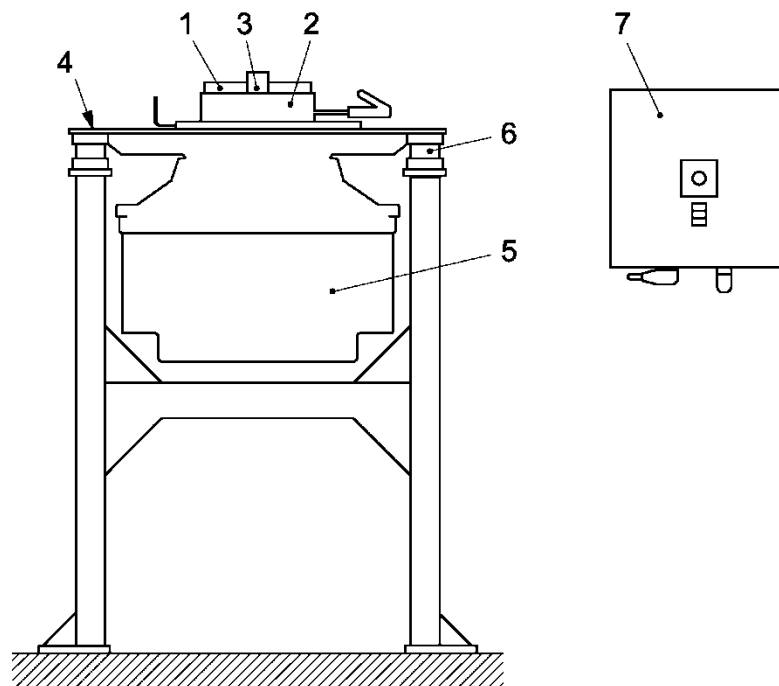
Se pone la mesa vibrante horizontal y se limpia. Se prepara y se ensambla el molde de acuerdo al apartado 4.5. Se asegura que la superficie inferior del apoyo de la base del molde está limpia. Se sujeta el molde, se pone la tolva firmemente sobre la mesa vibrante y se pone la aceleración de la mesa a  $(4,50 \pm 0,25)$  g rms.

Se preparan las probetas inmediatamente después de la preparación del mortero. Cuando se utilice el temporizador automático, se coloca para que se apague después de  $(120 \pm 1)$  s. Se enciende el vibrador. Se rellenan inmediatamente los compartimentos del molde con mortero, completando la operación en un máximo de 45 s, procediendo como sigue a continuación.

Se rellenan los compartimentos del molde, utilizando un cazo adecuado, en los 15 s siguientes, hasta aproximadamente la mitad de profundidad. Sin apagar el vibrador, y después de una pausa de 15 s, se añade la segunda capa en los siguientes 15 s, en la misma secuencia. El molde debería estar solo ligeramente sobrellenado. Después de un período total de  $(120 \pm 1)$  s, se deja que el vibrador se apague automáticamente, o se apaga de forma manual.

Se levanta suavemente el molde de la mesa vibrante y se retira la tolva.

Se siguen los procedimientos de desmontaje, limpieza y etiquetado de los moldes descritos en el apartado 7.2.



Leyenda

- |   |                   |   |                           |
|---|-------------------|---|---------------------------|
| 1 | Tolva             | 5 | Vibrador electromagnético |
| 2 | Molde             | 6 | Soportes antivibración    |
| 3 | Abrazadera        | 7 | Panel de control          |
| 4 | Mesa de vibración |   |                           |

**Figura A.2 – Esquema de una mesa típica de vibración, tipo B**

Para información relacionada con el desarrollo de las normas contacte con:

Asociación Española de Normalización  
Génova, 6  
28004 MADRID-España  
Tel.: 915 294 900  
info@une.org  
www.une.org

Para información relacionada con la venta y distribución de las normas contacte con:

AENOR INTERNACIONAL S.A.U.  
Tel.: 914 326 000  
normas@aenor.com  
www.aenor.com



organismo de normalización español en:

