

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE FIBRAS METÁLICAS Y
SINTÉTICAS DOSIFICADAS EN TÉRMINOS DE SUPERFICIE
ESPECÍFICA EN CONCRETOS DE ULTRA ALTO
COMPORTAMIENTO”**

POR

SUNNY ABIGAIL MENDOZA PÉREZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA
EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

Mayo, 2026

**“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE FIBRAS METÁLICAS Y
SINTÉTICAS DOSIFICADAS EN TÉRMINOS DE SUPERFICIE
ESPECÍFICA EN CONCRETOS DE ULTRA ALTO
COMPORTAMIENTO”**

POR

SUNNY ABIGAIL MENDOZA PÉREZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

APROBADA POR:

DR. GERARDO DEL JESUS FAJARDO SAN MIGUEL
DIRECTOR DE TESIS

DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA
CODIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación SECIHTI, por el apoyo brindado para la realización de esta investigación, a las que han apoyado y seguirán apoyando. Así como al Instituto de Ingeniería Civil de la UANL y en especial al Laboratorio de Tecnología del Concreto, el cual fue parte importante de mi formación profesional y en donde aprendí más allá del concreto, como lo fue el compañerismo, la amistad, la solidaridad y la perseverancia.

También, agradezco profundamente al Dr. Alejandro Durán Herrera que siempre ha impulsado a sus alumnos a seguir aprendiendo y nos ha ayudado a encontrar distintas maneras de superarnos; al Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel por brindarnos una enseñanza competente y digna de una gran y reconocida institución y al Dr. Lucio Guillermo López Yépez, por creer en la investigación y los estudiantes de posgrado, y siempre brindarnos el apoyo cuando lo requerimos.

Gracias a los patrocinadores comerciales por los materiales con los que se pudo realizar esta investigación.

Por último, agradezco a cada persona, amigos, compañeros, profesores, que fueron parte de mi camino en este proyecto y que me apoyaron en una de las mejores etapas de mi vida.

DEDICATORIA

A mis abuelas,

Porque a pesar de ya no estar terrenalmente, son la razón de mi fortaleza, carácter y resiliencia ante cualquier adversidad. Están presentes siempre en mis padres, y sé que su crianza y experiencias han valido completamente la pena.

A mis padres,

Porque me han dado los cimientos para ser quién soy, me han enseñado lo mejor que pudieron para esta vida, y han estado siempre a mi lado apoyándome en cada decisión, cada felicidad, y cada tristeza. Estoy eternamente agradecida con ustedes, los amo.

A mi hermano,

Por llegar cuando más lo necesitaba, por hacerme muy feliz y ser quién eres. Gracias por alegrarme cuando mis días no son los mejores, y por darme la motivación para salir adelante solo porque tu existes. Te voy a cuidar siempre, y siempre estaré para ti.

A mis perritos,

Porque nunca será suficiente disfrutar de su amor incondicional y su presencia, mi Dagger y mi Shadow siempre los voy a tener en mi corazón.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	3
DEDICATORIA	4
INDICE GENERAL	5
LISTA DE FIGURAS	7
INTRODUCCIÓN	9
1.2 Clasificación de las fibras	10
1.2.1 Fibras de acero	10
1.2.2 Fibras de vidrio	11
1.2.3 Fibras sintéticas	11
1.2.4 Fibras naturales	12
ANTECEDENTES	13
2.1 Comportamiento mecánico del UHPC	13
2.2 Fibras de acero	17
2.3 Fibras sintéticas	18
2.3.1 Poliéster	18
2.3.2 Polietileno (PE)	19
2.3.3 Polipropileno (PP)	20
2.3.4 Polivinilo de Alcohol (PVA)	20
2.4 Superficie específica	21
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
3.1 Justificación	23
3.2 Hipótesis	24
3.3 Objetivo General	24
3.4 Objetivos específicos	24
MATERIALES Y MÉTODOS	25
4.1 Materiales	25
4.1.1 Cemento Tipo II	25
4.1.2 Microsílice	26
4.1.3 Agregado fino	27
4.1.4 Polvo de caliza	28
4.1.5 Aditivo superplastificante	28

4.1.6 Agua	29
4.1.7 Fibras	30
4.2 Metodología	31
4.2.1 Caracterización de materiales	32
4.2.2 Empaquetamiento óptimo	33
4.2.3 Optimización de mezcla	34
4.2.4 Determinación de la superficie específica	36
4.2.5 Procedimiento de mezclado	36
4.2.6 Pruebas al concreto en estado fresco	37
4.2.7 Pruebas al concreto en estado endurecido	39
RESULTADOS Y CONCLUSIONES	41
5.1 Resultados	41
5.1.1 Caracterización de los materiales	41
5.1.2 Empaquetamiento óptimo	42
5.1.3 Optimización de mezcla	43
5.1.4 Determinación de la superficie específica	45
5.1.5 Pruebas al concreto en estado fresco	48
5.1.6 Pruebas al concreto en estado endurecido	50
5.2 Conclusiones	79
REFERENCIAS	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento del UHPC en comparación con el concreto convencional en (a) compresión y (b) tensión. [7]	13
Figura 2. El comportamiento del concreto simple y del concreto reforzado con fibras: diagramas de carga-desplazamiento.....	14
Figura 3. Microsílice utilizada	26
Figura 4. Arena #4 y Arena#5.....	27
Figura 5. Polvo de caliza OMYA y Polvo de caliza CEMEX	28
Figura 6. Aditivo superplastificante utilizado	29
Figura 7. Fibras BCR50, BC48, BCMQ58, CE50, DMIX, TFSTR, de izquierda a derecha.	30
Figura 8. Mezcladora para la fabricación de los UHPC-FR	36
Figura 9. Flujo de extensibilidad.....	37
Figura 10. Contenido de aire.....	38
Figura 11. Especímenes para pruebas a compresión.....	39
Figura 12. Vigas para su ensaye a flexión.....	40
Figura 13. Flujo de revenimiento Mezcla CE50	48

RESUMEN

Los concretos de ultra alto comportamiento fibroreforzados (UHPC-FR) han sido desarrollados para contribuir al mejoramiento de las propiedades mecánicas mediante el uso de fibras que maximicen el desempeño del material en servicio.

Actualmente, las fibras de acero son las más utilizadas para reforzar este tipo compuestos ya que el uso de éstas reduce la naturaleza frágil del concreto al incrementar su resistencia a la flexión. Sin embargo, hoy en día existen en el mercado un sinnúmero de fibras sintéticas que compiten en su desempeño con el acero.

En este trabajo se evaluarán las fibras de acero que se utilizan en este material y una variedad de fibras sintéticas que serán dosificadas en términos de una superficie específica fija para todas ellas. Este criterio es una innovación en esta investigación ya que usualmente se adicionan fibras en porcentaje del volumen del concreto.

La justificación de esta sustitución recae en que las fibras sintéticas tienen diferentes propiedades físicas, mecánicas y elásticas en comparación a las fibras de acero, son menos densas y de menor costo, lo cual podría brindar un concreto más asequible para su uso en obras, sin cambiar de manera significativa el comportamiento mecánico y manteniendo la falla dúctil.

En este trabajo de investigación se produjo un UHPC-FR con matriz sumamente densa, la cual fue obtenida gracias al empaquetamiento óptimo brindado por el Método de Andersen & Andreasen, una relación agua/cementante de 0.25 y la utilización de distintos materiales de la región debido a su disponibilidad. Los diferentes tipos de fibras utilizados fueron en su mayoría de tipo sintéticas, y específicamente la fibra de referencia de acero, con la dosificación con base en su superficie específica, dando resultados en estado fresco de flujo de revenimiento con propiedades de un concreto autocompactable con un diámetro mayor del flujo de revenimiento de 500 mm, Y contenidos de aire menores a 3.5%, así como resultados en estado endurecido de resistencias a la compresión mayores a 120 MPa.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los materiales que se utiliza como refuerzo del concreto son las fibras, comúnmente de acero, esto ya que a pesar de las muchas ventajas que ofrece el concreto, éste sufre una serie de deficiencias, como la baja resistencia a la tensión, flexión y su comportamiento frágil, que consecuentemente conducen a la presencia de agrietamientos y a la falla.

Una de las razones para utilizar las fibras en el concreto se centra en aumentar sus propiedades mecánicas. En años recientes, se ha extendido el uso de éstas en los concretos de ultra alto comportamiento (UHPC, por sus siglas en inglés), los cuales son compuestos con relaciones a/c bajas (inferiores a 0.25), con matrices cementantes muy densas, que presentan un refinamiento de sus poros. Por lo que resulta un material durable, típicamente con una vida de servicio estimada superior a los 150 años; las fibras usualmente son utilizadas en estos compuestos para brindar un mejor comportamiento a la flexión.

El código ACI 239R-18 del American Concrete Institute define al UHPC como el concreto que usualmente consiste en cemento, humo de sílice, arena fina, aditivos superplastificantes y fibras, con una relación agua/cementante (a/cm) entre 0.15 y 0.25, una resistencia a la compresión mínima especificada de 150 MPa, con capacidad de ductilidad y requisitos de tenacidad; las fibras generalmente se adicionan para lograr los requisitos especificados.

La adición de fibras de acero da como resultado una mejor ductilidad y la capacidad de eliminar parte del refuerzo de acero que normalmente se encuentra en los elementos de concreto reforzado [1]. Es importante señalar que el UHPC puede ser reforzado con distintos tipos de fibras, en los años recientes se han evidenciado sus ventajas en las propiedades del concreto como lo es evitar la propagación de grietas, lo que en última instancia conduce a mejorar la capacidad de absorción de energía de las estructuras de concreto [2].

La influencia de las fibras en las propiedades de un UHPC varía con la fracción del volumen dosificado. Por su alto nivel de densificación, la matriz cementante en un UHPC

es hasta ahorita el sistema cementante producido a base de cemento portland que mejor adherencia puede ofrecerle a un refuerzo como las fibras, que a la vez por su alta resistencia también es el que transferirá los mayores esfuerzos posibles a las fibras, o en otras palabras es el sistema cementante que pone al máximo de sus prestaciones a las fibras. En esta investigación el UHPC ayudará a distinguir de manera comparativa el desempeño de diferentes fibras que se comercializan como refuerzo para el concreto, desempeño que se evaluará en términos de dosificación en términos de su superficie específica, en comparación a la dosificación por volumen, cuyo desempeño por lo tanto dependerá principalmente de las propiedades mecánicas y elásticas del material.

Existen numerosos tipos de fibras disponibles para uso comercial y experimental. La categoría principal de clasificación de las fibras es por su material, pueden ser de acero, vidrio, sintéticas y naturales.

1.2 Clasificación de las fibras

1.2.1 Fibras de acero

Las fibras de acero utilizadas para reforzar el concreto se definen como longitudes cortas, que tienen una relación de aspecto l/d (relación entre longitud y diámetro) de aproximadamente 20 a 100, pueden presentar distintas secciones transversales, y que son lo suficientemente pequeñas como para estar dispersas aleatoriamente en una mezcla de concreto fresco utilizando los procedimientos de mezclado habituales.

La norma ASTM A 820 proporciona una clasificación para cuatro tipos de fibras de acero según el producto utilizado en su manufactura:

- Tipo I: alambre trefilado en frío
- Tipo II: hoja cortada
- Tipo III: extraído en estado fundido
- Tipo IV: otras fibras

La composición de las fibras de acero generalmente incluye acero al carbono (o acero con bajo contenido de carbono, a veces con componentes de aleación) o acero inoxidable. Diferentes aplicaciones pueden requerir diferentes composiciones de fibra

1.2.2 Fibras de vidrio

Las fibras de vidrio comúnmente utilizadas al inicio de las investigaciones fueron de vidrio de borosilicato (vidrio E) y fibras de vidrio de sosa-cal-sílice (vidrio A).

Se descubrió que las composiciones de vidrio E y A, utilizadas como refuerzo, perdían resistencia con bastante rapidez debido a la muy alta alcalinidad ($\text{pH} \geq 12,5$) de la matriz a base de cemento [3,4]. Sin embargo, las nuevas investigaciones dieron como resultado el desarrollo de una fibra resistente a los álcalis (fibra de vidrio AR) que proporcionó una mayor durabilidad a largo plazo.

1.2.3 Fibras sintéticas

Los tipos de fibras que se han probado en matrices de concreto a base de cemento portland son: acrílicas, aramida, carbono, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno. Para muchas de estas fibras, hay poca investigación o experiencia de campo reportada, mientras que otras se encuentran en aplicaciones comerciales y han sido objeto de numerosos informes.

Estos son algunos tipos de fibras sintéticas utilizadas en la ingeniería civil:

1. Fibras de Polipropileno (PP)
2. Fibras de Polietileno (PE)
3. Fibras de Polietileno de Alta Densidad (HDPE)
4. Fibras de Poliéster
5. Fibras de Polivinilo de Alcohol
6. Fibras de Aramida
7. Fibras de Basalto
8. Fibras de Carbono

Estos son solo algunos ejemplos de fibras sintéticas que se utilizan en la construcción. La elección del tipo de fibra depende de las características específicas requeridas para cada proyecto y las condiciones ambientales en las que se va a utilizar el material.

Las fibras sintéticas son caracterizadas por el fabricante de acuerdo con su forma física:

- Clase Ia: Microfibras: $< 0,30$ mm de diámetro; monofilamento
- Clase Ib: Microfibras: $< 0,30$ mm de diámetro; fibrilado
- Clase II: Macrofibras: $> 0,30$ mm de diámetro

Las fibras de Clase II se utilizan generalmente cuando se requiere un aumento en la resistencia a la flexión residual.

1.2.4 Fibras naturales

Existen algunas fibras naturales que se han estudiado para su uso en concreto, principalmente con el objetivo de mejorar la sostenibilidad del material. Estas fibras naturales pueden incluir:

- Fibras de coco
- Fibras de cáñamo
- Fibras de celulosa

Es importante señalar que, aunque las fibras naturales pueden tener beneficios en términos de sostenibilidad, su uso en concreto suele ser limitado en comparación con las fibras sintéticas o metálicas, que ofrecen propiedades mecánicas más consistentes y controlables.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

Las investigaciones sobre concretos fibroreforzados (CFR) aparecieron en el año 1960, con Romualdi y Batson [5]. Esta investigación demostró, por primera vez, que el uso de fibras de acero reducía la naturaleza frágil del concreto al incrementar la resistencia de este a la tensión. En los UHPC se introdujeron macrofibras y microfibras en la mezcla para mitigar la fragilidad y mejorar el comportamiento de ductilidad sin comprometer las características de alto rendimiento [6].

2.1 Comportamiento mecánico del UHPC

En la década de 2000, se fabricaron los concretos de ultra alto comportamiento con fibras (UHPC-FR), que se caracterizan por su extraordinaria resistencia y durabilidad. Estos concretos a menudo contienen una alta concentración de fibras de acero, a veces combinadas con fibras sintéticas. Los UHPC-FR se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluidas infraestructuras críticas, reparación de estructuras, elementos prefabricados y proyectos arquitectónicos. La investigación y el desarrollo continúan para mejorar las formulaciones, la producción y la aplicación de estos concretos avanzados. En la Figura 1 se muestra el comportamiento mecánico del concreto convencional y el concreto de ultra alto comportamiento reforzado con fibras.

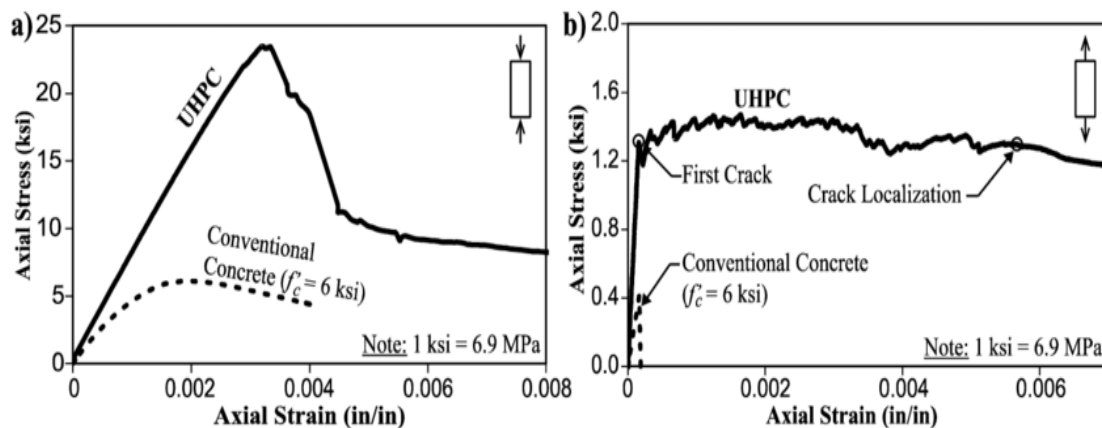


Figura 1. Comportamiento del UHPC en comparación con el concreto convencional en (a) compresión y (b) tensión. [7]

Después de alcanzar la resistencia del concreto (resistencia máxima), se produce una macro fisura, que rápidamente se abre y se alarga. En este punto, las fibras del concreto se activan y las tensiones se transfieren a estas fibras. El comportamiento a la flexión se puede definir de dos maneras, es decir, ablandamiento por deformación [8] y endurecimiento por deformación.

El hecho de que se produzca un ablandamiento o un endurecimiento por deformación depende principalmente del número de fibras, pero ciertamente también de la receta del concreto y del concreto reforzado con fibras. En ese caso, aparece otro pico en el diagrama de desplazamiento de carga, al que llamamos resistencia a la flexión residual. Cuando se alcanza este límite, la capacidad de tensión se agota. Se supera la resistencia a la tensión de la matriz o la resistencia a la tensión de la matriz con fibras y se aplica un ablandamiento por deformación lo cual es típico del concreto simple o del concreto reforzado con fibras con una fracción volumétrica baja de fibras. En la figura 2, se observa el comportamiento de endurecimiento o ablandamiento por deformación del concreto.

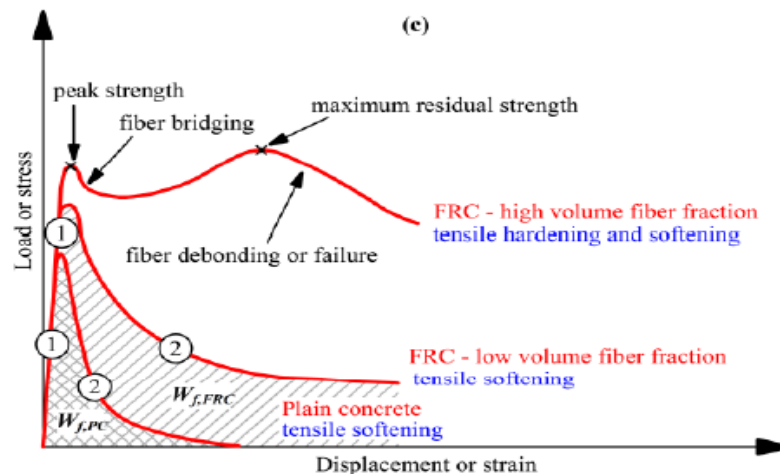


Figura 2. El comportamiento del concreto simple y del concreto reforzado con fibras: diagramas de carga-desplazamiento

Las fibras actúan como refuerzos en la matriz de UHPC. Cuando se aplican cargas al material, las fibras absorben energía y distribuyen las tensiones, lo que mejora significativamente la tenacidad del concreto. Esto resulta en una mayor capacidad para resistir la propagación de grietas y una mayor resistencia a la fractura.

La ductilidad se refiere a la capacidad del material para deformarse plásticamente antes de la ruptura. Las fibras proporcionan puntos de anclaje en la matriz de UHPC, permitiendo una mayor deformación antes de la falla. Esto contribuye a la ductilidad del material, siendo especialmente beneficioso en aplicaciones donde se requiere cierta capacidad de deformación antes de la fractura. La combinación de fibras y una matriz de alta resistencia resulta en un concreto de ultra alto comportamiento con un rendimiento excepcional en términos de fractura, tenacidad, resistencia a la tensión, ductilidad y capacidad de absorción de energía también conocida como tenacidad.

En la literatura disponible, hay estudios que investigan la influencia de fibras distintas de las fibras de acero en las propiedades mecánicas de los UHPC. Richard y Cheyrezy [9], en su investigación sugirieron el uso de una fracción de volumen del 2% de fibras de acero en un UHPC-FR.

La dosificación de fibras se expresa comúnmente como una proporción volumétrica en relación con el volumen total del concreto. Por lo general, las proporciones de fibras en un UHPC pueden variar desde aproximadamente el 1% hasta el 2% o más del volumen total del concreto. La proporción específica dependerá de los objetivos de rendimiento y las características del proyecto. En la Tabla 1 se menciona la clasificación del porcentaje que comúnmente se adiciona a la mezcla de concretos.

Tabla 1. Clasificación del porcentaje de fibras adicionado a la mezcla [10].

Clasificación	Volumen	Aplicaciones
Bajo	<1 %	Se adicionan en losas y pavimentos que tienen una gran superficie expuesta que conduce a un alto agrietamiento por contracción.
Moderado	1 -2 %	La presencia de fibras en esta fracción de volumen aumenta el módulo de ruptura, la tenacidad a la fractura y resistencia al impacto.
Alto	>2%	Las fibras utilizadas a este nivel conducen al endurecimiento por deformación de los compuestos.

La adición de fibras de acero a las matrices de UHPC aumenta con éxito la fractura, tenacidad, resistencia a la tensión, ductilidad y capacidad de absorción de energía de los UHPC, aunque el rendimiento es diferente según los tipos de fibra utilizados [11].

Las investigaciones han demostrado que la capacidad de absorción de energía mejora directa o indirectamente otras propiedades del concreto como el control de formación y propagación de fisuras, resistencia al impacto, comportamiento ante fallos o resistencia frente a ciclos de hielo y deshielo. Se ha demostrado que el aumento en la capacidad de absorción de energía puede cambiar el modo de falla del concreto de frágil a dúctil [12].

Zollo [13], afirma que, la matriz de concreto soporta la carga directamente y la transfiere a las fibras en donde éstas controlan el crecimiento de las grietas generadas, utilizando su capacidad de absorción de energía. Esta es la razón de la excelente resistencia al impacto y de las propiedades de tenacidad de los UHPC.

Las propiedades mecánicas de los UHPC, especialmente la capacidad de absorción de energía, dependen en gran medida de la longitud de la fibra [14], la fracción de volumen de la fibra [15] y la adherencia entre las fibras y la matriz [16,17]. Por lo tanto, el aumento de la superficie específica de las fibras aumenta el área total de contacto de las fibras con la matriz de concreto, lo que a su vez conduce a la mejora de la capacidad de absorción de energía de los concretos.

La longitud y el diámetro de las fibras también son factores importantes. Fibras más largas y delgadas pueden tener diferentes efectos en las propiedades del UHPC en comparación con fibras más cortas y gruesas. La relación longitud-diámetro (l/d) de las fibras también puede ser un factor crítico.

La reducción del diámetro de la fibra resulta en el aumento en la superficie específica de las fibras así tenemos una mayor área total de contacto entre la fibra y la matriz. Esto lleva a un aumento significativo en la absorción de energía de los concretos fibroreforzados [18].

2.2 Fibras de acero

Kim y colaboradores [19] investigaron los efectos de diferentes macrofibras de acero sobre los comportamientos de flexión del UHPC. Con base en los resultados de las pruebas, observaron que el uso de fibras de acero con extremos más largos en forma de gancho y fibras de acero corrugadas proporciona un mejor rendimiento a la flexión, incluida la capacidad de deflexión y la capacidad de absorción de energía, que el de las fibras de acero rectas.

Yoo et al. [20] estimaron las propiedades mecánicas y de fractura del UHPC de acuerdo con el contenido de fibra de acero e informaron que el rendimiento de flexión y la capacidad de absorción de energía del UHPC aumentaron casi linealmente con el contenido de fibra a pesar de una diferencia insignificante en las primeras propiedades de agrietamiento.

Aydın y Baradan [21] informaron que el rendimiento de flexión y la capacidad de absorción de energía mejoran notablemente con un aumento en la longitud de las fibras de acero lisas (o la relación de aspecto), lo que se atribuye a un aumento en el área de unión efectiva entre las fibras. y matriz.

Además, Wille y colaboradores [22] observaron que el uso de fibras de acero corrugadas mejora la resistencia a la tensión y la capacidad de deformación, aunque se adoptan contenidos de fibra más bajos en comparación con el de las fibras cortas de acero lisas. Estos resultados indican que el contenido de fibra requerido para satisfacer un cierto rendimiento de tensión o flexión a nivel del material se puede disminuir aumentando la longitud de las fibras de acero lisas y usando fibras de acero corrugadas.

Aunque las fibras de acero ofrecen muchas ventajas en términos de mejorar la resistencia del concreto, también existen algunas desventajas al utilizarlas en un concreto de ultra alto comportamiento (UHPC).

El precio de las fibras de acero es considerablemente elevado en comparación con los otros materiales para fabricar el UHPC, un ejemplo es un estudio en el que se utilizó 2% en volumen de fibras de acero lisas, éste ocupa aproximadamente el 33% del costo total de UHPC [23].

Por lo tanto, reducir el contenido de fibra de acero sin deteriorar su rendimiento a la tensión es uno de los desafíos clave para la tecnología UHPC.

A pesar de estas desventajas, las fibras de acero siguen siendo ampliamente utilizadas en UHPC debido a sus beneficios significativos en términos de resistencia, capacidad de absorción de energía y controlar la fisuración.

2.3 Fibras sintéticas

Las aplicaciones con fibras, de diámetro relativamente pequeño y relación de aspecto alta, comenzaron con porcentajes de volumen de fibra de aproximadamente una quinta parte de los que se habían utilizado con fibras más gruesas. Estas aplicaciones de bajo volumen aparecieron entre 0.1 y 0.3 por ciento. Sin embargo, incluso con estas adiciones de bajo volumen, el recuento de fibras (número de fibras en una unidad de volumen de matriz) y la superficie específica son comparables con los valores encontrados con porcentajes de volumen más altos de fibras de tamaño más grueso. La longitud y la configuración de la fibra son factores importantes en este contenido de fibra.

La durabilidad y la compatibilidad química de las fibras en la matriz deben determinarse individualmente. Las fibras indicadas a continuación generalmente han presentado un buen comportamiento en matrices de cemento portland. Los fabricantes y proveedores de fibras deben confirmar la idoneidad de sus fibras para la aplicación prevista mediante pruebas independientes de terceros.

Las investigaciones muestran que las macrofibras sintéticas con rangos de diámetro y longitud de 0,30 a 1,25 mm y 30 a 76 mm, respectivamente, se han utilizado ampliamente como refuerzos de concreto para mejorar sus propiedades mecánicas [24].

2.3.1 Poliéster

Las fibras de poliéster sólo están disponibles en forma de monofilamento. Las fibras de poliéster son hidrófobas (no absorben mucha agua) y se ha demostrado que no afectan la hidratación del concreto de cemento portland [25]. La unión de fibras de poliéster dentro de la matriz de cemento es mecánica. Las fibras de poliéster disponibles para la industria del concreto pertenecen al subgrupo de los poliésteres termoplásticos.

Todos los termoplásticos son sensibles a la temperatura. A temperaturas superiores a las temperaturas normales de servicio del concreto, las características de la fibra se alteran. Las temperaturas superiores a 280 °C provocan su descomposición molecular [26].

Las fibras de poliéster que tienen un módulo de elasticidad alto pueden proporcionar una mejora en la resistencia a la tenacidad. Los resultados reportados [27] indican que las fibras de poliéster proporcionan un mayor módulo de ruptura al comienzo del envejecimiento del concreto.

Pate y autores [28] estudiaron las propiedades del concreto reforzado con fibra de poliéster y concluyeron que para la adición de fibra de poliéster al 1% en volumen del concreto, la resistencia al impacto aumentaba en un 75%, la resistencia a la tensión aumentaba en un 9%, la resistencia a la flexión aumentó un 7% y la resistencia a la compresión aumentó un 5%. No hubo cambios en el módulo de elasticidad y la resistencia al corte. Las fibras de poliéster generalmente no son resistentes a los álcalis. Wang [29] estudió la fibra de poliéster en el concreto de cemento Portland y observaron que las fibras de poliéster pierden fuerza rápidamente en la matriz del cemento.

2.3.2 Polietileno (PE)

Una de las ventajas de la fibra de polietileno es que se puede producir con un módulo de elasticidad relativamente alto. Las fibras de PE de alto módulo tienen una resistencia a la tensión cercana a 2,6 GPa y un Módulo de Young de 117 GPa [30].

Las fibras de PE de alto módulo tienen propiedades deseables de retención de resistencia bajo exposición prolongada a ambientes agresivos (por ejemplo, agua de mar, álcalis y ácidos). Estas fibras también tienen una estabilidad térmica razonable, conservando un porcentaje significativo de sus propiedades a temperatura ambiente hasta temperaturas elevadas cercanas a los 80°C.

En su aplicación a pasta de cemento, la fibra de PE de alto módulo es muy eficaz para aumentar la resistencia a la flexión, las características de tenacidad y la resistencia al impacto del material.

Soroushian y colaboradores [31] estudiaron las propiedades mecánicas del concreto armado con fibras de PE de alto módulo. Se demostró que incluir un 0.1% en volumen de

fibras de PE aumentaba las resistencias a la flexión y al impacto del concreto en un 21% y 5.8 veces, respectivamente. La resistencia a la compresión promedio fue algo menor que los valores correspondientes para el concreto simple.

2.3.3 Polipropileno (PP)

Actualmente las fibras de polipropileno (PP) se fabrican en diversas geometrías y configuraciones; Se pueden producir como monofilamentos, haces de fibras fibriladas intercaladas y películas continuas.

Las fibras de PP tienen algunas propiedades únicas que las hacen adecuadas para su incorporación en matrices de concreto. Son químicamente inertes y muy estables en el ambiente alcalino del concreto.

El polipropileno tiene una superficie hidrofóbica que no absorbe agua. Las desventajas incluyen poca resistencia al fuego, sensibilidad a la luz solar y al oxígeno, un módulo de elasticidad bajo y una mala unión con la matriz del concreto, aunque estas desventajas no son necesariamente críticas. El empotramiento en la matriz proporciona una cubierta protectora, lo que ayuda a minimizar la sensibilidad a la luz solar y otros efectos ambientales. El uso de fibras de PP de módulo relativamente bajo de manera similar a la de otros tipos de fibras, como el vidrio o el acero, no produce propiedades de resistencia sustancialmente mejoradas.

Las microfibras de PP pueden mejorar significativamente la resistencia a la flexión, la tenacidad y la ductilidad del concreto armado. El estrecho espacio entre dichas fibras les permite funcionar eficientemente como supresores de grietas. Además, el pequeño diámetro y, en consecuencia, la gran superficie específica de estas fibras puede conducir a una mejora de la fuerza de unión entre la matriz y las fibras [32,33].

2.3.4 Polivinilo de Alcohol (PVA)

Las fibras de PVA utilizadas para producir productos de concreto reforzado tienen varias ventajas, como las siguientes: alta relación de aspecto, alta resistencia máxima a la tensión, buena compatibilidad química con el cemento portland, buena afinidad con el agua, entre otras. Estas fibras tienen un efecto positivo en la resistencia a la flexión de sus compuestos, debido a una buena unión interfacial entre las fibras y la matriz de cemento.

Las fibras de PVA tienen una alta resistencia química, lo que las hace adecuadas para entornos corrosivos o donde se necesita una mayor resistencia a productos químicos. Estas fibras tienen una baja conductividad térmica, lo que significa que no conducen el calor de manera eficiente. Esto puede ser beneficioso en aplicaciones donde se busca minimizar la transferencia de calor, como en elementos aislados.

Las deficiencias de las fibras de PVA incluyen: mala capacidad de retención de partículas de cemento; la resistencia a la tensión y el módulo de Young de las fibras pueden disminuir considerablemente en condiciones de autoclave.

2.4 Superficie específica

La superficie específica de las fibras se refiere a la medida de la extensión de la superficie de una fibra.

La adhesión de la fibra a una matriz cementante, como en este caso en los UHPC-FR es un aspecto crítico para garantizar un comportamiento estructural eficiente y mejorar las propiedades del material compuesto. A continuación, se describen algunos de los factores y mecanismos involucrados en la adhesión de las fibras a una matriz cementante:

- Las fibras mecánicamente ancladas en una matriz cementante se adhieren a través de la resistencia física proporcionada por las irregularidades superficiales de las fibras y la matriz.
- La rugosidad y la forma de las fibras, tal como lo son sus características físicas, pueden permitir que la matriz cementante se agarre físicamente a las fibras, lo que mejora la resistencia a la flexión y la capacidad de carga del concreto.

Cabe destacar que la superficie específica es una medida teórica y simplificada que puede variar según la estructura y la rugosidad de la superficie de la fibra. Los cálculos pueden proporcionar estimaciones útiles, pero las propiedades exactas pueden depender de las características específicas del material y la fabricación de la fibra.

CAPÍTULO 3

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los concretos de ultra alto comportamiento fibroreforzados (UHPC-FR) uno de los factores que afectan significativamente su desempeño mecánico son las fibras. El tipo de fibra, geometría, longitud, contenido de volumen, y la orientación son algunos de los factores importantes que afectan las propiedades del UHPC-FR. En la actualidad la mayoría de los trabajos de investigación suelen dosificar las fibras al concreto por volumen lo que conlleva a no tomar en cuenta las propiedades físicas de la fibra.

Por tal motivo, este tema representa un vacío que se considera que debe ser investigado, ya que el efecto de las propiedades físicas de las fibras asociadas a su superficie específica resulta de gran interés, puesto que, es el factor directo que controla las propiedades de las fibras como refuerzo embebido en una matriz cementante de ultra alto comportamiento. Se encontraron varios artículos de investigación en los que se especifica el método de dosificación, algunos de ellos están descritos en la Tabla 2.

Tabla 2. Método de dosificación utilizados en investigaciones

Artículo	Año	Método de dosificación
“State-of-Art on Workability and Strength of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete: Influence of Fiber Geometry, Material Type, and Hybridization”	2025	Volumen
“ The effects of steel, polypropylene, and high-performance macro polypropylene fibers on mechanical properties and durability of high-strength concrete”	2023	Volumen
“Improving flexural toughness of foamed concrete by mixing polyvinyl alcohol-polypropylene fibers: An experimental study”	2023	Volumen
“Flexural behavior of hybrid ultra-high-performance concrete Flexural behavior of hybrid ultra-high-performance concrete”	2020	Volumen
“Mechanical behavior of ultra - high performance concrete (UHPC) reinforced with hybrid fibers and with reduced cement consumption”	2019	Volumen
“The effect of specific surface area of macro fibers on energy absorption capacity of concrete”	2018	Volumen

Fuente: autor

La bibliografía sobre el tema muestra que hasta el momento no existen trabajos sobre investigaciones enfocados a evaluar los efectos de la dosificación de la fibra, por superficie específica, para distintos tipos de fibras en las propiedades mecánicas del UHPC, sin embargo, se encontró un artículo que habla sobre la influencia de la superficie específica en las propiedades del concreto, aunque la dosificación fue realizada por volumen.

3.1 Justificación

Debido a que la dosificación tradicional de las fibras se hace respecto al volumen de concreto, no se consideran las propiedades físicas de las fibras a utilizarse tales como longitud, diámetro y superficie específica, las cuales tienen efecto directo en la capacidad de absorción de energía (tenacidad) en los concretos de ultra alto comportamiento. Por lo tanto, se requiere de un procedimiento de dosificación que contemple las propiedades físicas, mecánicas y elásticas de cada fibra. Al dosificar las fibras con base con su superficie específica se tienen en consideración las propiedades antes mencionadas

En este trabajo de investigación se aportará al estado del arte de los concretos de ultra alto comportamiento información respecto a las ventajas de dosificar las fibras en términos de superficie específica. Esta matriz de UHPC, se está utilizando principalmente para magnificar la adherencia entre la propia matriz cementante y las fibras por estudiar, ya que por las bajas relaciones a/cm que típicamente se utiliza en estos compuestos, la adherencia potencial entre las fibras y la matriz es la máxima posible con base en el estado del conocimiento actual.

Es importante mencionar que la fibra de acero es la que más se ha utilizado y estudiado en los UHPC, con éstas la resistencia a la tensión del UHPC suele estar dentro del rango de 15 a 20 MPa, valor que casi duplica el valor de resistencia a la tensión del UHPC sin fibras [34].

Actualmente, investigaciones en distintas universidades del mundo, han estudiado el efecto de fibras de distintos materiales a las de acero, como las de vidrio, carbón, polipropileno, polivinilo de alcohol, entre otros. Por esta razón es necesario estudiar los distintos tipos de fibra que existen en el mercado de la industria de la construcción para

así dar a conocer las ventajas de ellas como refuerzo del concreto y promocionar su uso en la industria.

3.2 Hipótesis

La comparación de fibras metálicas y sintéticas, en la fabricación de los concretos de ultra alto comportamiento (UHPC), en términos de superficie específica, conducirá a establecer un mejor análisis, conforme a la capacidad de absorción de energía (tenacidad), que ayude a seleccionar el tipo de fibra y la cantidad de fibra más apropiadas para un desempeño objetivo particular.

3.3 Objetivo General

Realizar un estudio comparativo sobre el desempeño mecánico de diferentes fibras en términos de superficie específica como refuerzo, utilizando una matriz de concreto de ultra alto comportamiento.

3.4 Objetivos específicos

- Evaluar diferentes parámetros de empaquetamiento y sinergia entre los componentes (aditivo base policarboxilato y cemento) que conduzca a una mezcla óptima de un concreto UHPC-FR.
- Determinar el desempeño mecánico de los diferentes UHPC-FR, mediante vigas ranuradas al centro y ensayadas de acuerdo con la norma UNE-EN 14651, realizando un análisis comparativo de la absorción de energía (tenacidad).

CAPÍTULO 4

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales típicos para la fabricación de un UHPC-FR son: cemento, microsílíce, arena, fibras, aditivo superplastificante, fillers y agua.

Según su definición, los diseños de mezclas UHPC exhiben las propiedades de 3 tipos diferentes de mezclas de concreto especiales. En primer lugar, la capacidad de fluidez y capacidad de paso del concreto autocompactable (SCC), también conocido como concreto autocompactante; en segundo lugar, la resistencia superior y el rendimiento a largo plazo del concreto de alto comportamiento (HPC), y, en tercer lugar, la ductilidad y resistencia post-fisuración del concreto reforzado con fibras (FRC). La inclusión de las propiedades del concreto antes mencionadas da como resultado un concreto autocompactable reforzado con fibras de ultra alto comportamiento (UHPC-FR).

La formulación general del UHPC consta de un alto contenido de aglutinantes que incluye cemento Portland y materiales cementantes suplementarios como humo de sílice y polvo de cuarzo. El agregado grueso se elimina de las mezclas de UHPC para evitar la formación de grandes vacíos y crear una zona de transición interfacial densificada alrededor de los agregados, eliminando así la región más débil dentro de la matriz [35,36].

4.1 Materiales

4.1.1 Cemento Tipo II

Los cementos tipo II están limitados en C150/M 85 a un máximo de 8% en masa de aluminato tricálcico (una fase de cemento, a menudo abreviada C3A), lo que afecta la resistencia al sulfato del cemento. El aluminato tricálcico es conocido por contribuir a la rápida adquisición de resistencia temprana del concreto. Cuando se utilizan aditivos superplastificantes, que mejoran la trabajabilidad y la capacidad de fluidez del concreto, es posible ajustar la manipulación del tiempo de fraguado.

El cemento que se utiliza en la fabricación de estos concretos debe tener contenidos bajos de aluminato tricálcico, debido a que el cemento con alto contenido de C3A inhibe la efectividad de los aditivos superplastificantes (SP) [37].

En este trabajo se utilizó un Cemento tipo II de la empresa CEMEX.

4.1.2 Microsílice

La incorporación de microsílice en el concreto da como resultado un mayor contenido de aglutinantes, lo que mejora la resistencia a la compresión del concreto. Las partículas de microsílice de tamaño extremadamente pequeño (0,5 micrómetros) dan como resultado una matriz cementante con un empaquetamiento alto y una proporción de huecos reducida [38].

El contenido promedio de microsílice en las mezclas de UHPC está entre el 20 % y el 30 % en masa de materiales cementantes [39]. Estudios han encontrado que esta cantidad de microsílice puede disminuir el contenido de hidróxido de calcio en la mezcla, mejorar las uniones fibra-matriz y aumentar las resistencias a la compresión y flexión del concreto [40].

En la figura 3 se presenta la microsílice utilizada que proviene de la empresa Grupo Cementos Chihuahua, que tiene por nombre Microsilex.



Figura 3. Microsílice utilizada

4.1.3 Agregado fino

Según Richard y Cheyrezi uno de los problemas principales en el concreto es la falta de homogeneidad por lo que propone lo siguiente [9]:

- Eliminación de los agregados gruesos, reemplazados con arena fina, de 600 micrómetros de tamaño máximo.
- Mejoramiento de las propiedades mecánicas de la pasta.
- Reducción en la relación agregado/matriz

De acuerdo con Richard [9], los agregados en el concreto conforman un conjunto de inclusiones rígidas en la matriz. Cuando se aplica una fuerza de compresión aparecen esfuerzos de tensión y cortantes en la interfase pasta/agregado que genera micro agrietamientos en la pasta. Para los UHPC, con una reducción en el tamaño del agregado más grueso por un factor de 50 (por ejemplo 400 micrómetros en vez de 20 mm), se obtiene una importante reducción en el tamaño de las micro fisuras.

Es por ello que, en esta investigación se utilizó agregado calizo de granulometría #4 y #5 provenientes de la región, mostradas en la figura 4.



Figura 4. Arena #4 y Arena#5

4.1.4 Polvo de caliza

La piedra caliza es la piedra más común, el polvo de piedra caliza como aditivo para concreto puede mejorar la estructura del concreto, reforzar la trabajabilidad y mejorar la resistencia a los sulfatos del concreto a bajas temperaturas.

El material puzolánico inerte como el polvo de caliza no reacciona con el agua de la mezcla, por lo que la reología de la mezcla no se altera, actuando como un filler dentro de la matriz. Sin embargo, su adición mejora el orden de empaquetamiento del aglutinante y da como resultado una mezcla más densa, lo que mejora las propiedades físicas de la mezcla.

Se utilizó el polvo de caliza marca OMYA y polvo de caliza CEMEX, mostrados en la figura 5.



Figura 5. Polvo de caliza OMYA y Polvo de caliza CEMEX

4.1.5 Aditivo superplastificante

La relación agua material cementante en los UHPC varía desde 0.15 a 0.25, lo cual hace imposible su producción sin el uso de un aditivo superplastificante (SP). Los SP son aditivos reductores de agua de alto rango. Se usan típicamente en mezclas de concreto como un aditivo para la retención de agua y para mejorar simultáneamente la fluidez y la trabajabilidad de los materiales cementantes [41].

Las mezclas de UHPC requieren dosis relativamente altas de aditivos químicos, principalmente reductores de agua de alto rango también conocidos comercialmente como superplastificantes.

El aditivo superplastificante utilizado fue el Flowcon P01 de marca EUCOMEX, que se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Aditivo superplastificante utilizado

4.1.6 Agua

El agua potable debe ser adecuada, como se utiliza habitualmente para el concreto ordinario. La cantidad de agua debe ser suficiente para completar el proceso de hidratación y mantener la trabajabilidad. El exceso de agua, no utilizada en la hidratación, desarrollaría huecos en la mezcla de concreto, lo que aumentaría la permeabilidad y reduciría la resistencia del concreto. En este proyecto fue utilizada agua potable de la red municipal.

4.1.7 Fibras

Distintos tipos de fibras fueron utilizadas en este proyecto. En su mayoría sintéticas, de material polipropileno-polietileno, poliolefina, polietileno, y de acero. Seis tipos de fibra fueron utilizados de diferentes marcas comerciales utilizadas en la industria de la construcción, éstas son ilustradas en la figura 7.



Figura 7. Fibras BCR50, BC48, BCMQ58, CE50, DMIX, TFSTR, de izquierda a derecha.

4.2 Metodología

En la tabla Tabla 3 se muestra la metodología a utilizar, dividida en 2 etapas y especificando en cada una las normas y procedimientos a seguir.

Tabla 3. Metodología experimental

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	
Primera etapa	Caracterización de materiales
	• Densidad del aditivo y contenido de sólidos • ASTM C188 - Método de prueba estándar para la densidad del cemento hidráulico • Densidad de la micro sílice • ASTM C128 - Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino • Distribución del tamaño de partícula de los agregados • Caracterización de las fibras
	Empaquetamiento óptimo
	• Método de Andrearsen & Andersen
	Optimización de la mezcla
	• Punto de saturación del aditivo • ASTM C185 - Contenido de aire del mortero de cemento hidráulico • ASTM C109 - Método de prueba estándar para resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico
	Determinación de la superficie específica
	• Cálculo de la superficie específica total a utilizar
Segunda etapa	Pruebas al concreto en estado fresco
	• ASTM C1611 - Método de prueba estándar para el flujo de revenimiento del concreto autocompactable • ASTM C185 - Contenido de aire del mortero de cemento hidráulico
	Pruebas al concreto en estado endurecido
	• ASTM C1856 - Método de prueba estándar para la fabricación y ensayo de muestras de concreto de ultra alto rendimiento • UNE-EN 14651 - Método de ensayo para concreto con fibras determinación de la resistencia a la tracción por flexión ensayados a 28 días

4.2.1 Caracterización de materiales

4.2.1.1 Densidad del aditivo y contenido de sólidos

En la determinación de la densidad del aditivo superplastificante fue utilizado un frasco de Le Chatelier, registrando el volumen desplazado en la escala de graduación del frasco y su peso en una báscula electrónica.

El contenido de sólidos fue aplicado al aditivo superplastificante Flowcon P01, de la marca EUCOMEX. El procedimiento de obtención del contenido de sólidos se realizó colocando aproximadamente 190 g de aditivo en un recipiente, el cual fue puesto en un horno a 110 °C por 1 día y medio, el peso del residuo expresado en porcentaje de la muestra original corresponde al contenido de sólidos en el aditivo.

4.2.1.2 Densidad del cemento portland

De acuerdo con la norma ASTM C188 – Método de prueba estándar para la densidad del cemento hidráulico fue determinada la densidad del cemento utilizado para este proyecto el cual es designado como Cemento Portland Tipo II.

4.2.1.3 Densidad de la micro sílice

Para la obtención de la densidad de la micro sílice, la cual es de la marca microsilex, se utilizó un picnómetro de helio, el cual es un recipiente de volumen estable que se llena con un fluido de densidad conocida (He en este caso). Cuando posteriormente se introduce la muestra cuya densidad, ésta desplaza un cierto volumen de fluido equivalente al volumen de la muestra objeto de estudio. Conocida la masa o el peso de la muestra con gran exactitud, es posible calcular su densidad o su peso específico respectivamente.

4.2.1.4 Densidad del agregado fino y polvo de caliza

La determinación de la densidad de los polvos de caliza y la arena no. 5 se calculó por el método mencionado anteriormente, con el picnómetro de helio. La arena no. 4 se obtuvo su densidad de acuerdo con la norma ASTM C128 - Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.

4.2.1.5 Distribución del tamaño de partícula de los agregados

Las muestras de los agregados utilizados los cuales son polvos de caliza, arena no. 4 y arena no. 5 fueron sometidos a el análisis de tamaño de partícula en el equipo Microtrac, obteniendo la distribución de tamaño de partícula, así como sus respectivas gráficas.

4.2.1.6 Caracterización de fibras

Las propiedades físicas de las fibras fueron medidas con un vernier digital para así corroborar su longitud y diámetro especificado por las fichas técnicas brindadas por los fabricantes.

4.2.2 Empaquetamiento óptimo

El trabajo fundamental de Fuller y Thomsen [42] demostró que el empaquetamiento de los agregados del concreto afecta las propiedades del concreto producido. Concluyeron que una clasificación geométrica continua de los agregados en la mezcla de concreto compuesta puede ayudar a mejorar las propiedades del concreto. Basado en la investigación de Fuller y Thompson [42] y Andreassen y Andersen [43], teóricamente se puede lograr una porosidad mínima mediante una distribución óptima del tamaño de partículas de todos los materiales de partículas aplicados en la mezcla.

Para lograr la densificación de la matriz, se realizó un empaquetamiento óptimo de acuerdo con el método de Andrearsen & Andersen, el cual, con su ecuación modificada mostrada en la Ecuación 1, se obtienen los porcentajes del tamaño de partícula en donde resulta el acomodo óptimo de éstas.

Ecuación 1.

$$P(D) = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q}$$

En donde,

D = tamaño de partícula

P(D)= porcentaje de sólidos totales con tamaño inferior a D

Dmax = tamaño máximo de la partícula en μm

Dmin= tamaño mínimo de partícula en μm

q= representa el exponente de Fuller, según bibliografía de 0.25 a 0.5

4.2.3 Optimización de mezcla

Para el proporcionamiento de mezcla, se establecieron distintos parámetros que fueron obtenidos de las distintas pruebas realizadas a los materiales a utilizar, las cuales se detallan a continuación.

4.2.3.1 Prueba para definir el punto de saturación del aditivo superfluidificante

La determinación del punto de saturación para cada combinación aditivo-cementante se basa en la evaluación de la fluidez de pastas preparadas con diferentes dosis de aditivos de acuerdo con el ensayo del cono de Marsh. El método consiste en llenar el cono de Marsh con 800 ml de pasta y medir el tiempo que tarda en escurrir 200 ml a través de una boquilla de 8 mm de diámetro y 60 mm de longitud, considerando que cada lectura resulta del promedio de 3 mediciones.

4.2.3.2 ASTM C1240 - Especificación estándar para humo de sílice utilizado en mezclas de cemento hidráulico

Esta norma establece requisitos y métodos de prueba para la microsílce activa, una puzolana comúnmente utilizada para mejorar las propiedades del concreto.

La norma aborda aspectos como la pérdida por ignición, el contenido de carbono, la finura, la densidad, la reactividad puzolánica y otros aspectos que afectan la calidad y el rendimiento del concreto

Es fundamental seguir las pautas de la norma ASTM C1240 para garantizar que la sílice activa cumpla con los estándares necesarios y optimice las propiedades del concreto en términos de resistencia y durabilidad.

En este caso se utilizó esta norma para evaluar la capacidad de la sílice activa para reaccionar con el hidróxido de calcio y formar compuestos químicos que mejoran las propiedades del concreto.

4.2.3.3 ASTM C230 - Fluidez de morteros de cemento hidráulico

La norma ASTM C230 se refiere a la fluidez de los morteros de cemento hidráulico y establece los procedimientos de prueba para evaluar esta propiedad.

Se preparó un mortero de cemento hidráulico de acuerdo con las especificaciones de la norma. El mortero se colocó en una mesa de fluidez diseñada específicamente para esta prueba, la mesa de fluidez se levanta y se deja caer desde una altura específica, lo que permite que el mortero se extienda por la mesa.

Se mide la distancia que alcanza el mortero desde el centro de la mesa, proporcionando una indicación de la fluidez del material.

4.2.3.4 ASTM C185 - Contenido de aire del mortero de cemento hidráulico

El contenido de aire en el mortero de cemento hidráulico influye directamente en la durabilidad del concreto. El contenido de aire también puede influir en la trabajabilidad y la manipulación del concreto fresco. Un cierto nivel de aire puede mejorar la plasticidad y la cohesión del mortero, facilitando su colocación y compactación.

Se utilizó un aparato específico de 400 mL para determinar el contenido de aire. Este dispositivo mide el volumen de aire atrapado en el mortero en relación con su volumen total. El contenido de aire se calcula como porcentaje del volumen total del mortero.

4.2.3.5 ASTM C109 - Método de prueba estándar para resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico

Se prepararon especímenes de mortero con dimensiones cúbicas específicas de 50 mm de lado, y los especímenes se curan en condiciones específicas de temperatura y humedad para simular condiciones de servicio.

Después del período de curado, los especímenes se sometieron a pruebas de compresión. La carga máxima soportada antes de la falla se registra como la resistencia a la compresión. Se realizaron los ensayos a 7, 14 y 28 días.

4.2.4 Determinación de la superficie específica

La dosificación por superficie específica (S.E) tiene como objetivo que la fracción de adición de fibras sea la misma, con el fin de comparar de mejor manera el desempeño que le atribuye cada fibra al UHPC, se considera la fibra como un cilindro debido a la morfología de las fibras a utilizar. Se utilizaron las ecuaciones 1 y 2, para la determinación de la S.E.

Ecuación 2. $P = \pi * d$

Ecuación 3. $S.E. = P * l$

Donde,

P= perímetro

d = diámetro

S.E. = superficie específica

l = longitud

4.2.5 Procedimiento de mezclado

Todos los ingredientes sólidos, como lo son, el cemento, microsílce, polvos de caliza y agregados finos se mezclaron por 2 minutos. Luego, se agregó el agua y aditivo, para el siguiente mezclado por 4 minutos. Se procedió a incluir las fibras a la mezcladora, verificando una correcta distribución en toda la mezcla, y por último se dio un tiempo de mezclado de 2 minutos. Para la fabricación de las mezclas se utilizó una mezcladora circular de eje horizontal con capacidad de 40 Litros, mostrada en la figura 8.



Figura 8. Mezcladora para la fabricación de los UHPC-FR

4.2.6 Pruebas al concreto en estado fresco

4.2.6.1 ASTM C1611 - Método de prueba estándar para el flujo de revenimiento del concreto autocompactable

El flujo de revenimiento es una medida clave de la capacidad de flujo del concreto autocompactable. Esta propiedad es esencial para garantizar que el UHPC-FR pueda llenar eficientemente los moldes y lograr una distribución uniforme sin segregación.

El concreto se colocó en un molde con forma de cono truncado con la base menor en una placa, y se mide el flujo de revenimiento, que es la extensión horizontal máxima del concreto desde el centro del molde después de retirar el mismo, ejemplificado en la figura 9.

La trabajabilidad está estrechamente vinculada a las proporciones de los componentes en la mezcla de UHPC, incluidos los materiales cementantes, los agregados, las fibras y los aditivos. La dosificación precisa es crucial para lograr las propiedades deseadas de trabajabilidad.



Figura 9. Flujo de extensibilidad

4.2.6.2 ASTM C185 - Contenido de aire del mortero de cemento hidráulico

Aunque cierto contenido de aire en el concreto es beneficioso para mejorar su resistencia al hielo y deshielo, un exceso de aire atrapado puede tener desventajas significativas.

Un alto contenido de aire puede reducir la resistencia mecánica del concreto. La presencia excesiva de aire puede debilitar la estructura y afectar negativamente su capacidad para soportar cargas. Un exceso de aire puede comprometer la durabilidad del concreto al reducir su capacidad para resistir ataques químicos y ambientales. Puede conducir a una mayor permeabilidad y una menor resistencia a la abrasión. En la figura 10 se muestra la prueba del contenido de aire en el mortero.



Figura 10. Contenido de aire

4.2.7 Pruebas al concreto en estado endurecido

4.2.7.1 ASTM C1856 - Método de prueba estándar para la fabricación y ensayo de muestras de concreto de ultra alto comportamiento

Esta práctica cubre procedimientos para fabricar y probar muestras en el laboratorio y en el campo utilizando una muestra representativa de concreto de ultra alto comportamiento (UHPC), con el fin de determinar las propiedades del material. Esta práctica es aplicable a un UHPC con una resistencia a la compresión especificada de 120 MPa, con un tamaño nominal máximo de agregado de menos de 5 mm.

Se fabricaron cilindros de 75 mm de diámetro por 150 mm de longitud, mostrados en la figura 11, y se llevaron al cuarto de curado para su correcto almacenamiento con una temperatura estándar de 20 ± 2 °C y una humedad relativa del $95 \pm 5\%$, para cada dosificación de fibra se ensayaron 3 cilindros a los 28 días.



Figura 11. Especímenes para pruebas a compresión

4.2.7.2 UNE-EN 14651 - Método de ensayo para concreto con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tensión por flexión

El comportamiento a la tensión del concreto con fibras metálicas se evalúa en términos de valores de resistencia a la tensión a flexión residual determinados a partir de la curva carga-desplazamiento de la apertura de la grieta o la curva carga-deflexión obtenida aplicando una carga en el punto central sobre un prisma simplemente apoyado.

Los especímenes fueron almacenados en el cuarto de curado con una temperatura estándar de 20 ± 2 °C y una humedad relativa del $95 \pm 5\%$ hasta su ensaye. Para cada ensaye por dosificación de fibra se ensayaron 3 vigas, como lo son mostradas en la figura 12.



Figura 12. Vigas para su ensaye a flexión

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1 Resultados

5.1.1 Caracterización de los materiales

En la caracterización de materiales se obtuvieron la densidad de cada material a utilizar y en la Tabla 4 se muestran las densidades obtenidas.

Tabla 4. Densidad de los materiales

Material	Densidad (g/cm ³)
Cemento	3.13
Microsílice	2.02
Arena no. 4	2.64
Arena no. 5	2.71
Polvo de caliza OMYA	2.82
Polvo de caliza CEMEX	2.70
Aditivo superfluidificante	1.10
Aditivo ocluser	1.00

El contenido de sólidos se obtuvo para restar el agua que aporta el aditivo superplastificante a la mezcla. Se obtuvo el resultado de 3 pesos del crisol con aditivo y el peso del aditivo ya seco, dando como resultado un promedio de 51 % de contenido de sólidos. Por lo tanto, el total del agua añadida en la dosificación del aditivo es del 49 %.

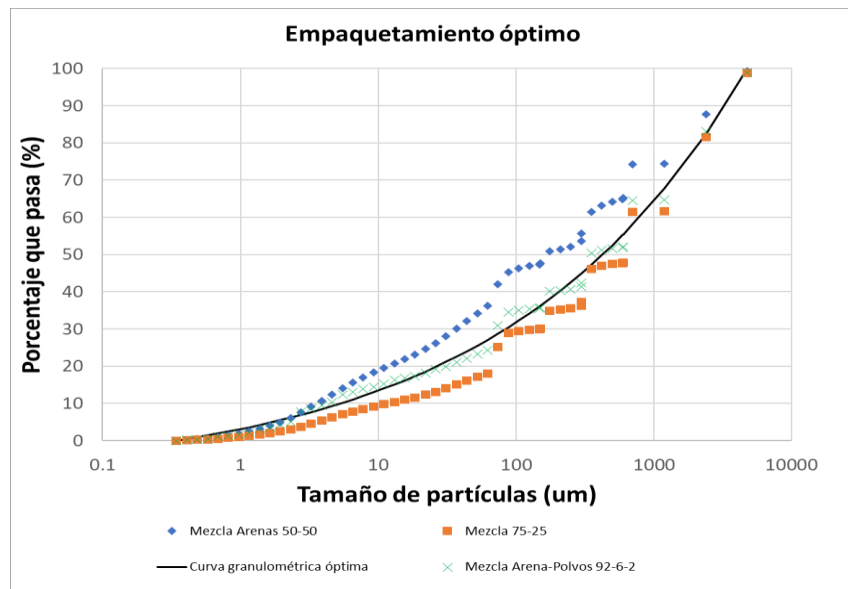
Las fibras brindadas por los distintos fabricantes se encuentran listadas en la siguiente tabla.

Tabla 5. Caracterización de las fibras

Nombre	Material	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	l/d	Densidad (g/cm ³)
BCM58	Polipropileno-polietileno	19	0.35	54	0.90
BCR50	Polipropileno	16	1.64	9.75	0.89
BC48	Polipropileno	16	1.30	12.30	0.89
TFSTR	Polipropileno-Polietileno	17	0.7	24	0.92
CE50	Poliolefina	15	0.5	30	0.91
DMIX	Acero	30	0.38	79	7.8

5.1.2 Empaquetamiento óptimo

Se obtuvo la curva granulométrica óptima con el Método de Andreasen & Andersen, con la cual se buscó la mejor dosificación en porcentaje de los agregados, mostrada en la Gráfica 1.



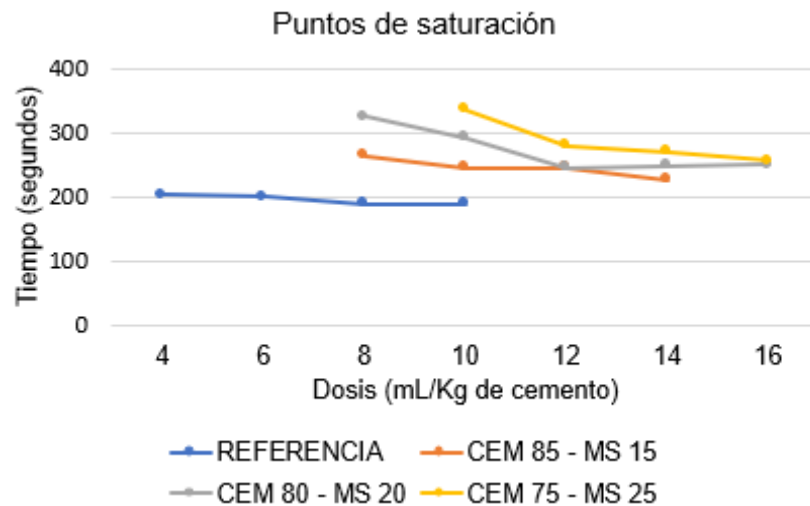
Gráfica 1. Empaquetamiento óptimo de los agregados

5.1.3 Optimización de mezcla

Para fines prácticos se utilizó la simbología CEM para referir al Cemento Portland Tipo II y MS para referir a la microsílíce Microsilix; y REF a la mezcla de referencia.

5.1.3.1 Punto de saturación del aditivo superfluidificante

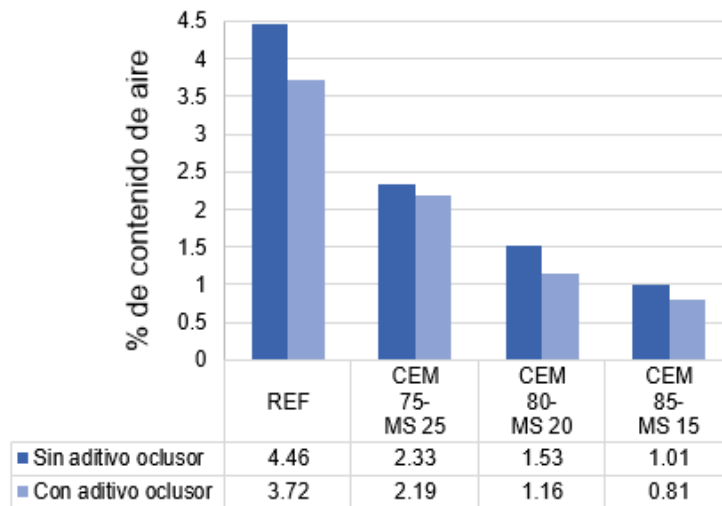
De acuerdo con las gráficas obtenidas del punto de saturación de las distintas mezclas realizadas, se seleccionó la dosis adecuada para cada mezcla, eligiendo las dosis para la mezcla de referencia de 9 mL/kg cem, para la mezcla CEM 75 - MS 25 se seleccionó 15 mL/kg cem, para la mezcla CEM 80 - MS 20 una dosis de 14 mL/kg cem, y para la mezcla CEM 85 - MS 15 se tiene una dosis de 12 mL/kg cem.



Gráfica 2. Punto de saturación de la mezcla de referencia

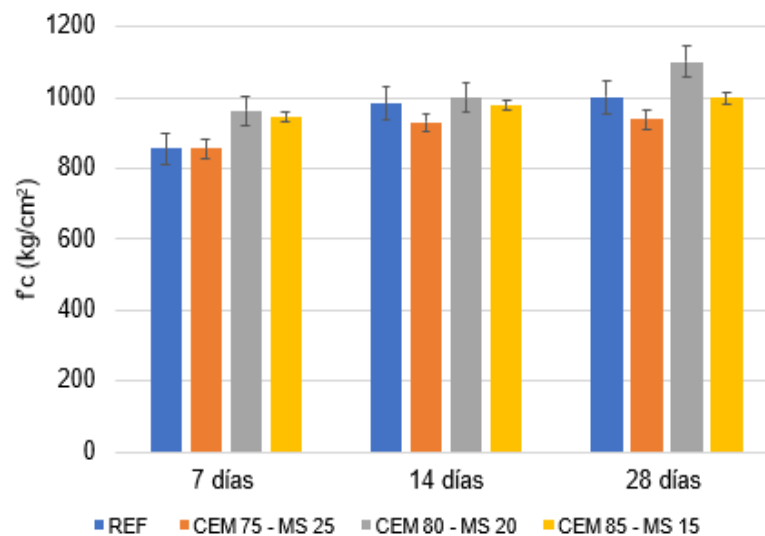
5.1.3.2 Sustitución parcial del Cemento Portland Tipo II

Para la selección del porcentaje de sustitución del cemento se midió el contenido de aire de las 4 mezclas elaboradas y se ensayaron cubos de 50*50 mm ensayados a compresión conforme a la norma ASTM C109, en donde se observó en la Gráfica 3 que a menor contenido de microsílíce se obtuvieron menores porcentajes de contenido de aire.



Gráfica 3. Contenido de aire de morteros

En la Gráfica 4 se observan resultados que presentan las mezclas en la resistencia a la compresión en la cual se obtuvo un incremento significativo específicamente en la mezcla CEM 80 - MS 20, de 14 a 28 días.



Gráfica 4. Resistencia a la compresión de morteros

5.1.4 Determinación de la superficie específica

Se obtuvieron los tres valores de superficie específica (S.E.) de acuerdo con la fibra del diámetro medio, en este caso la fibra TFSTR, de acuerdo a la dosificación en porcentaje de 2%, 2.5% y 3%.

- S.E.-2%

Fibra	Dimensiones (mm)		Superficie específica S.E. (cm ²)	Volumen		Densidad (g/cm ³)
	largo	diámetro		(mm ³)	(cm ³)	
TFSTR	13	0.68	0.363168111	6.17385788 3	0.0061	0.92

Peso 1 filamento (g)	Peso para 2%/m ³ (g)	No. de filamentos	S.E. total (cm ²)	S.E. total (m ²)
0.005679949	18,400.00	3,239,465.56	1,176,470.59	1,176.47

- S.E.-2.5%

Peso 1 filamento (g)	Peso para 2.5%/m ³ (g)	No. de filamentos	S.E. total (cm ²)	S.E. total (m ²)
0.005679949	23,000.00	4,049,331.95	1,470,588.24	1,470.58

- S.E.- 3%

Peso 1 filamento (g)	Peso para 3%/m³ (g)	No. de filamentos	S.E. total (cm²)	S.E. total (m²)
0.005679949	27,600.00	6,354,336.30	1,764,705.88	1,764.70

Con estos valores de S.E. total se igualó la superficie específica de las demás fibras y se obtuvo el peso a utilizar.

Cabe señalar que debido a la magnitud más grande del diámetro de las fibras BC48 y BCR50, y al obtener volúmenes de fibra muy altos, se tomó como superficie específica la mitad del valor obtenido de la fibra referencia, esto con el objetivo de producir una mezcla trabajable y sin aglomeraciones de fibra.

- S.E. – 2%

Fibra	S.E. total (m²)	S.E. de 1 filamento (cm²)	No. de filamentos	Peso de 1 filamento (g)	Peso total / m³ (g)
BCMQ58	1,176.47	0.208915911	5,631,311.56	0.001663493	9,367.65
CE50		0.204203522	5,761,264.91	0.002322815	13,382.35
DMIX		0.358141563	3,284,931.75	0.02653829	87,176.47
BC48	588.23	0.653451272	1,800,395.28	0.019325821	17,397.06
BCR50		0.824353912	1,427,142.60	0.030080674	21,464.705

- S.E. – 2.5%

Fibra	S.E. total (m²)	S.E. de 1 filamento (cm²)	No. de filamentos	Peso de 1 filamento (g)	Peso total / m³ (g)
BCM58	1,470.58	0.208915911	5,631,311.56	0.001663493	11,709.56
CE50		0.204203522	5,761,264.91	0.002322815	16,727.94
DMIX		0.358141563	3,284,931.75	0.02653829	108,970.59
BC48	735.29	0.653451272	1,800,395.28	0.019325821	21,746.32
BCR50		0.824353912	1,427,142.60	0.030080674	26,830.88

- S.E. – 3%

Fibra	S.E. total (m²)	S.E. de 1 filamento (cm²)	No. de filamentos	Peso de 1 filamento (g)	Peso total / m³ (g)
BCM58	1,764.70	0.208915911	5,631,311.56	0.001663493	14,051.47
CE50		0.204203522	5,761,264.91	0.002322815	20,073.53
DMIX		0.358141563	3,284,931.75	0.02653829	130,764.71
BC48	882.35	0.653451272	1,800,395.28	0.019325821	26,095.59
BCR50		0.824353912	1,427,142.60	0.030080674	32,197.06

5.1.5 Pruebas al concreto en estado fresco

Para fines prácticos se definieron las siguientes claves para la facilidad de lectura de los diferentes tipos de fibras y, su dosificación está definida por el volumen de la S.E. de la fibra de referencia, los cuales son S.E.-2%, S.E.-2.5% y S.E.-3%. Y para cada mezcla se utilizó el código MZ junto con el código de fibra y su dosificación.

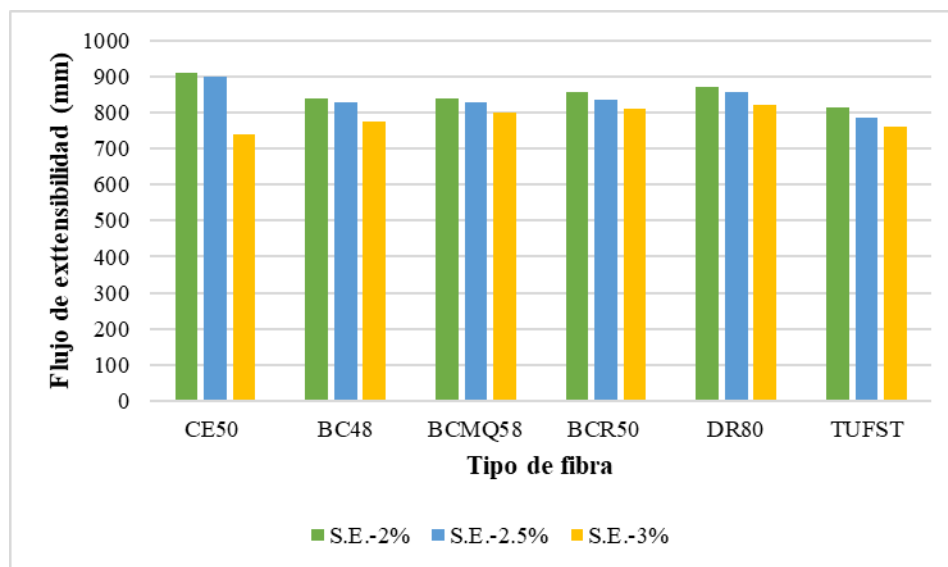
5.1.5.1 Flujo de revenimiento

Se obtuvo el flujo de revenimiento de acuerdo con la norma ASTM C1611.



Figura 13. Flujo de revenimiento Mezcla CE50

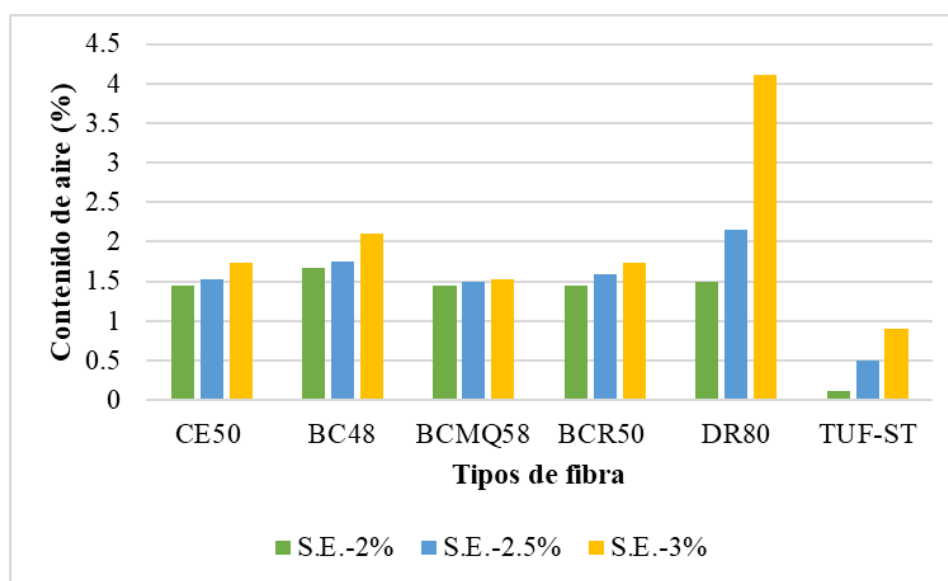
En la Gráfica 5 podemos observar el comportamiento del flujo de revenimiento del UHPC-FR con los tres valores de S.E. de las distintas fibras utilizadas, las cuales nos brinda valores de flujo de revenimiento arriba de 500 mm para considerar a los UHPC-FR fabricados como autocompactables según la norma ASTM C1611. También se observa en todas las mezclas, que a mayor cantidad de fibra dosificada se pierde mayor fluidez.



Gráfica 5. Flujo de revenimiento de los UHPC-FR con distintos tipos de fibra

5.1.5.2 Contenido de aire

Los valores de contenido de aire se obtuvieron conforme a la norma ASTM C185. Y en la Gráfica 6 se puede observar que las mezclas con fibra generan más porcentaje de aire que en mezclas sin contenido de fibra, y en todos los casos a mayor dosificación de fibra mayor contenido de aire en la matriz.



Gráfica 6. Contenido de aire de los UHPC-FR con distintos tipos de fibra

Todos los tipos de fibra presentan un contenido de aire menor del 3.5% lo cual es un valor aceptable para los UHPC-FR, a excepción de la fibra de acero.

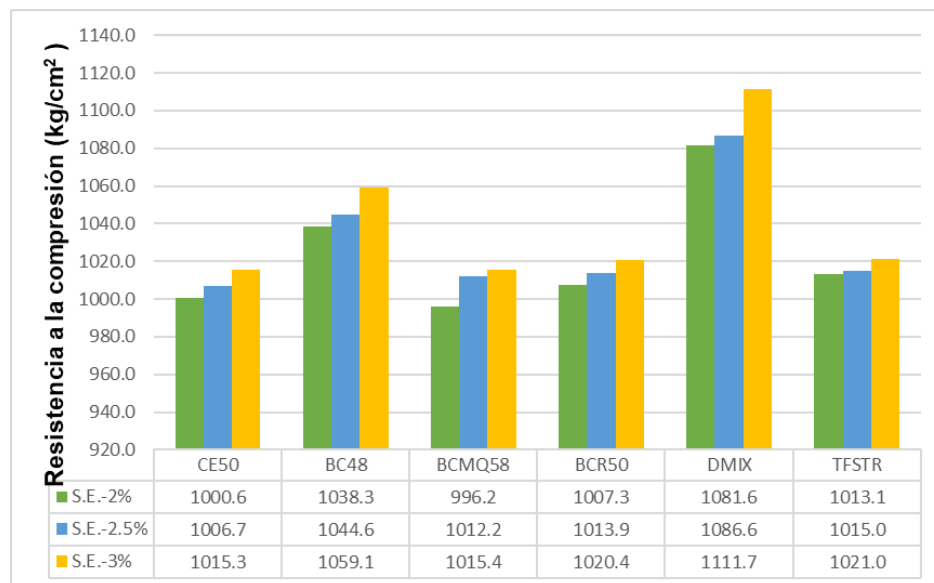
La fibra de acero contribuyó a incrementar considerablemente el contenido de aire en el concreto esto debido a que cuenta con una morfología con ganchos en los extremos, lo que podría haber causado una mayor retención de aire.

5.1.6 Pruebas al concreto en estado endurecido

5.1.6.1 Resistencia a la compresión

Para la fabricación de cilindros de 75 x 150 mm se siguió la norma ASTM C1758. Se elaboraron 3 especímenes para cada ensayo, durante el proceso de colocación, los moldes fueron vibrados durante 1 minuto y al día siguiente de su fabricación todas las muestras se desmoldaron y metieron en el cuarto de curado, a una temperatura estándar de 20 ± 2 °C y una humedad relativa del $95 \pm 5\%$.

Como resultado de los ensayos de la resistencia a compresión a los 28 días, se muestra en la siguiente gráfica el promedio de 3 especímenes por cada dosificación de cada tipo de fibra.



Gráfica 7. Resistencia a la compresión de los UHPC-FR fabricados.

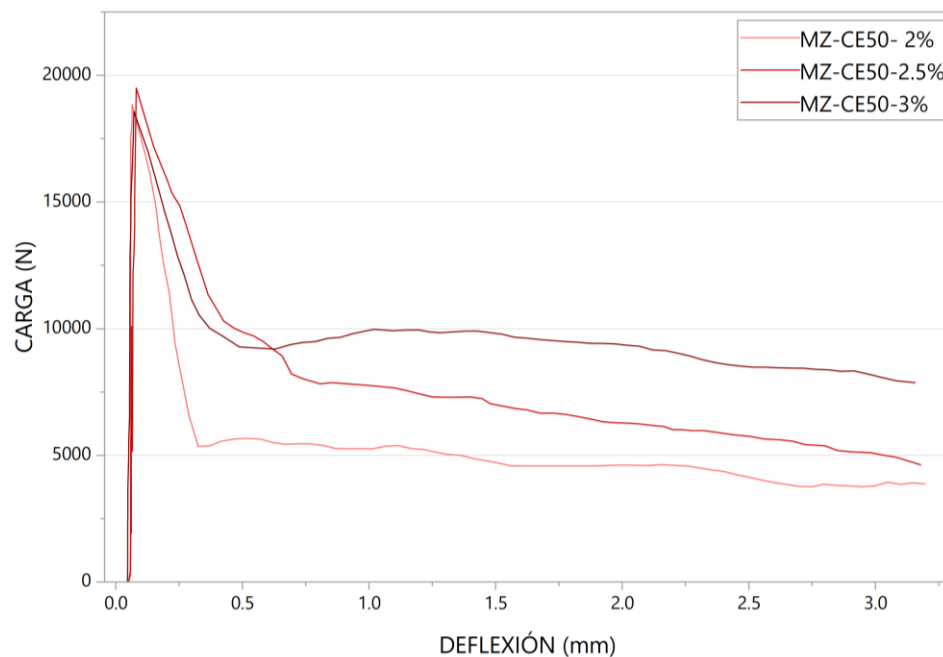
El mejor desempeño mecánico en resistencia a compresión fue el de la fibra de acero DMIX, desarrollando resistencia de hasta 1111.7 kg/cm², específicamente con la mayor dosificación de fibra, por detrás se encuentra la fibra sintética BC48 que presentó mejor desempeño de entre todas las fibras sintéticas superando a la de menor desempeño, la cual fue la BCMQ58, en un 5%, y la fibra de acero superándola en un 10%.

5.1.6.2 Resultados de capacidad de absorción de energía (tenacidad)

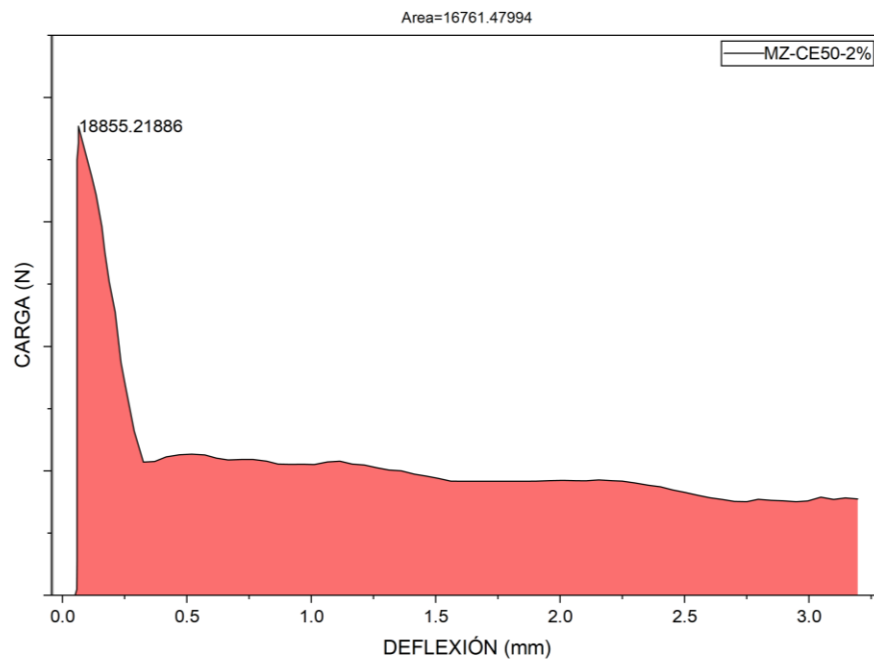
Para la obtención de los resultados de tenacidad, se realizó la fabricación de vigas de 150 x 150 x 600 mm de acuerdo a la norma europea EN-14651. Se elaboraron 3 vigas para cada dosificación de cada fibra, durante el proceso de colocación, se llenaron las vigas en 2 capas de igual espesor y los moldes fueron vibrados durante aproximadamente 1 minuto por cada capa y al día siguiente de su fabricación todas las muestras se desmoldaron y metieron en el cuarto de curado, a una temperatura estándar de 20 ± 2 °C y una humedad relativa del $95 \pm 5\%$.

1. MZ-CE50

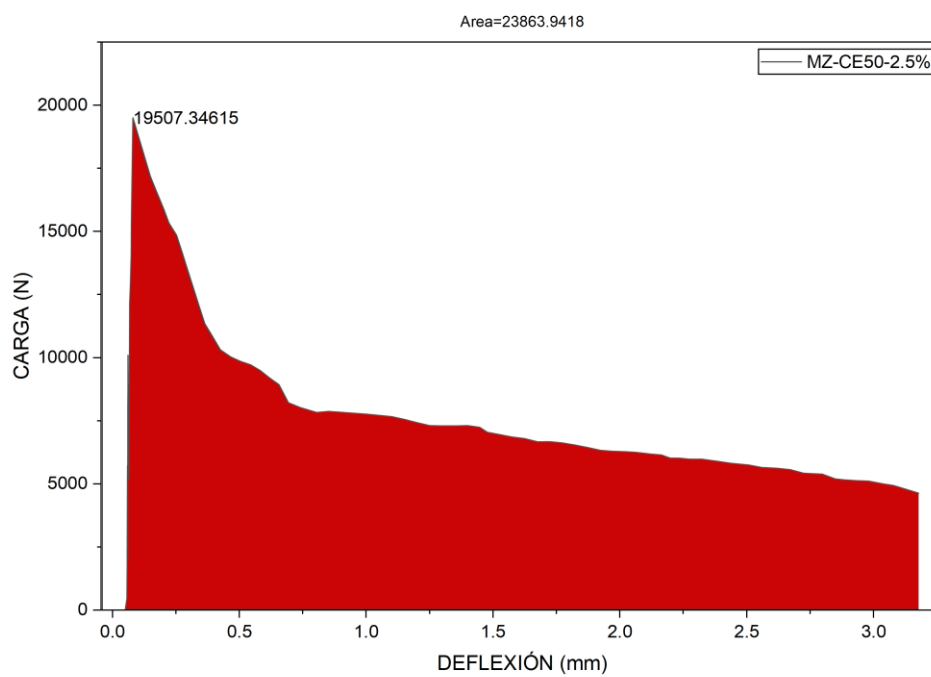
En la Gráfica 8 se muestra la curva carga vs deflexión de la fibra CE50 de las 3 dosificaciones, en la cual se puede observar el comportamiento a flexión de cada una. En las gráficas 9, 10 y 11 se muestra la carga máxima dando como resultado 18,855 N, 19,507 N y 18,579 N respectivamente. Las tenacidades obtenidas fueron de 16.76 J, 23.86 J y 30.71 J.



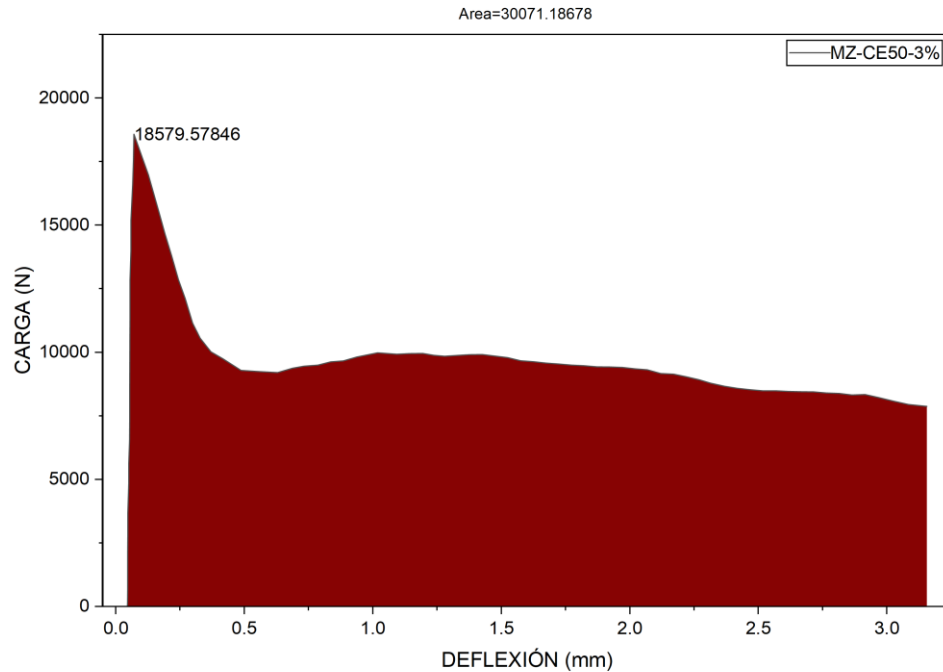
Gráfica 8. Curvas carga vs deflexión MZ-CE50-2%,2.5%,3%



Gráfica 9. Carga máxima y área bajo la curva MZ-CE50-2%



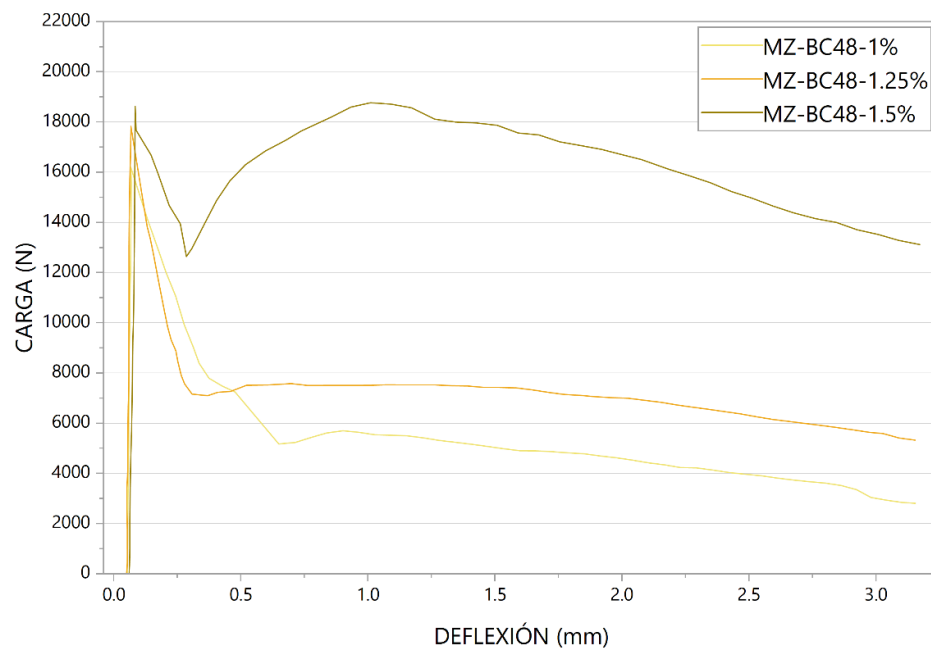
Gráfica 10. Carga máxima y área bajo la curva MZ-CE50-2.5%



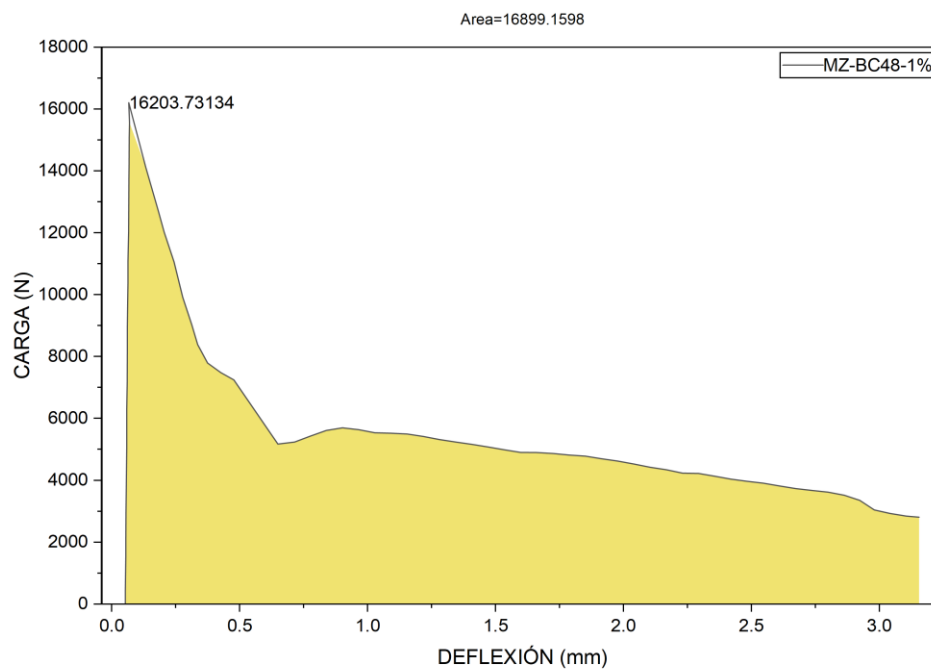
Gráfica 11. Carga máxima y área bajo la curva MZ-CE50-3%

2. MZ-BC48

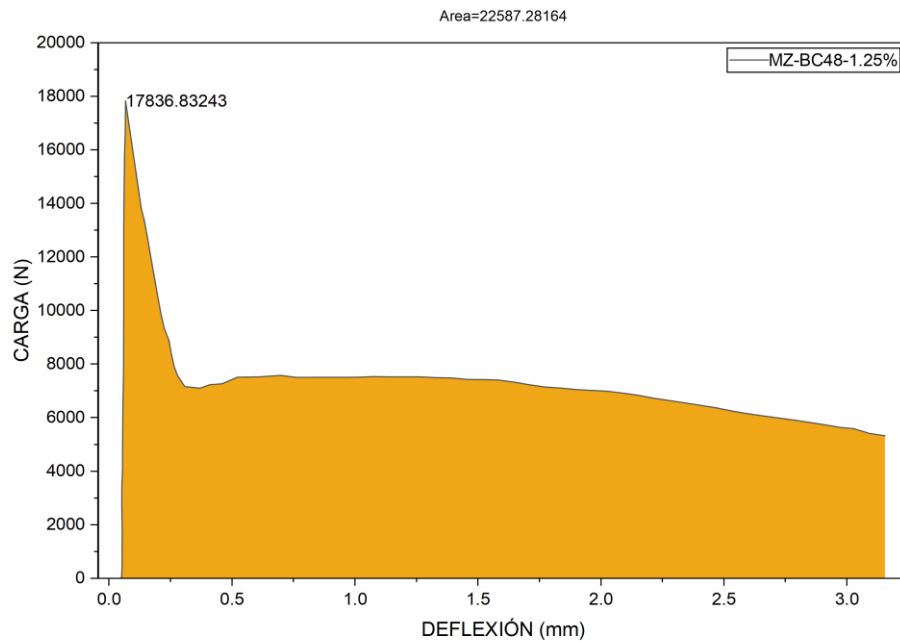
Para la fibra BC48 se utilizó la mitad de la superficie específica de referencia en las 3 dosificaciones, resultando en el 1%, 1.25% y 1.5% del volumen de la fibra de referencia. En la Gráfica 12 se puede observar el comportamiento a flexión de cada una. En las gráficas 13, 14 y 15 se muestra la carga máxima dando como resultado 16,203 N, 17,836 N y 18,769 N respectivamente. Las tenacidades obtenidas fueron de 16.89 J, 22.58 J y 50.38 J.



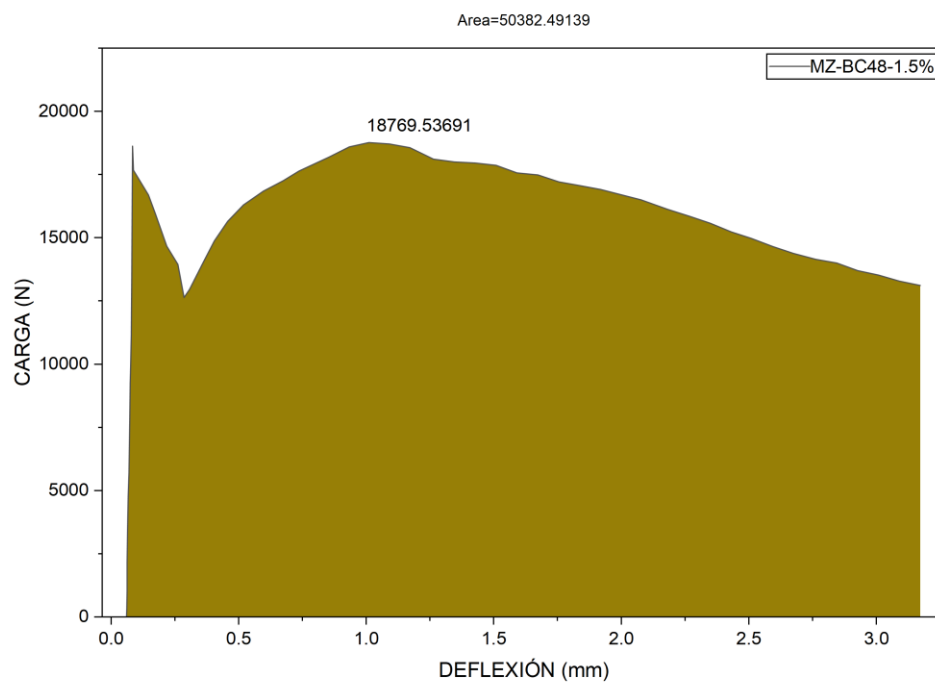
Gráfica 12. Curvas carga vs deflexión MZ-BC48-1%,1.25%,1.5%



Gráfica 13. Carga máxima y área bajo la curva MZ-BC48-1%



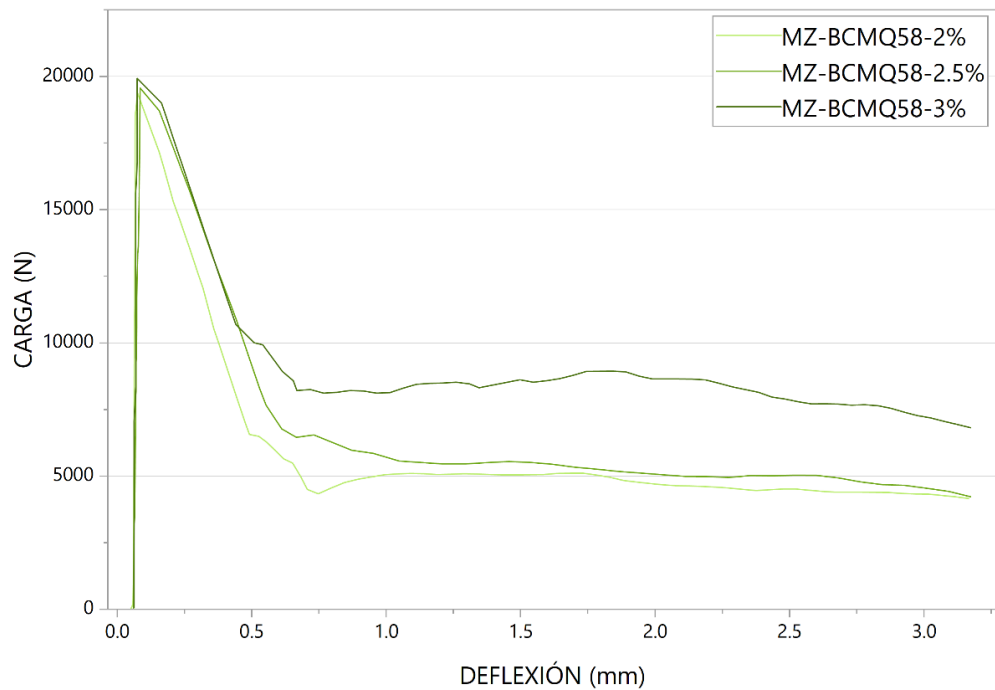
Gráfica 14. Carga máxima y área bajo la curva MZ-BC48-1.25%



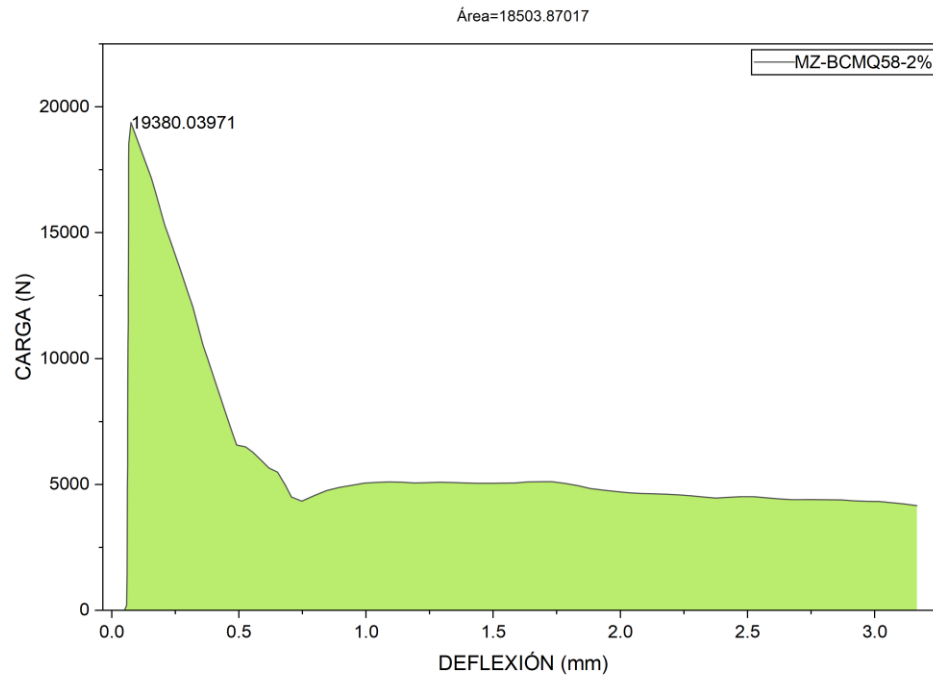
Gráfica 15. Carga máxima y área bajo la curva MZ-BC48-1.5%

3. MZ-BCM58

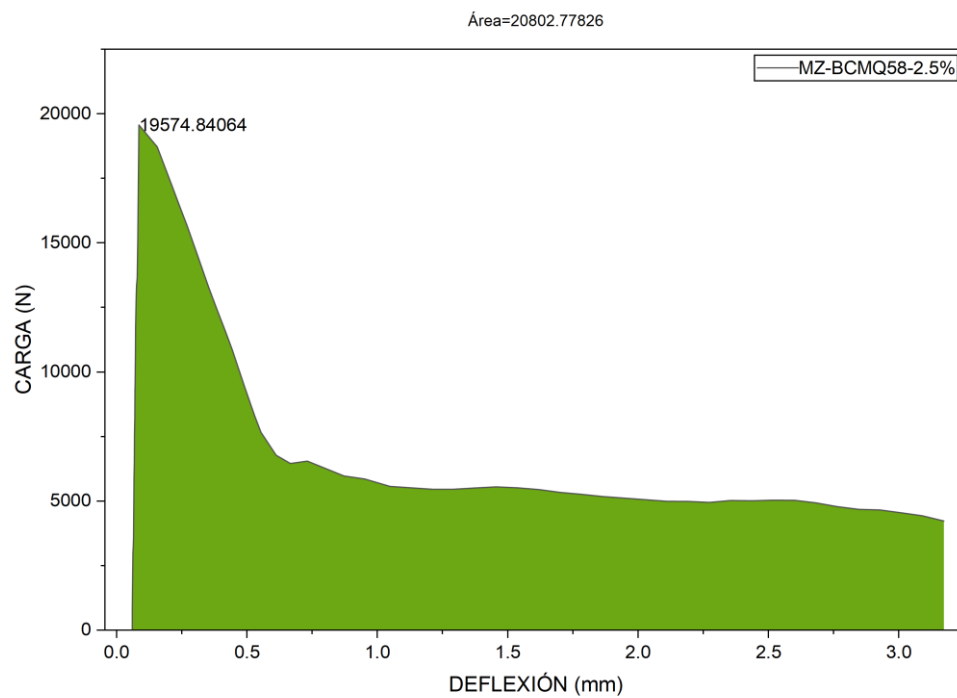
Para la fibra BCMQ58 se obtuvieron las curvas carga vs deflexión mostradas en la Gráfica 16, con sus tres dosificaciones. Posteriormente se calculó la carga máxima y la tenacidad dando como resultado 19,380 N y 18.50 J en la dosificación S.E.-2%, 19,574 N y 20.80 J en la dosificación S.E.-2.5%, y 19,932 N y 28.70 J en la dosificación S.E.-3%, resultados mostrados en las gráficas 17, 18 y 19.



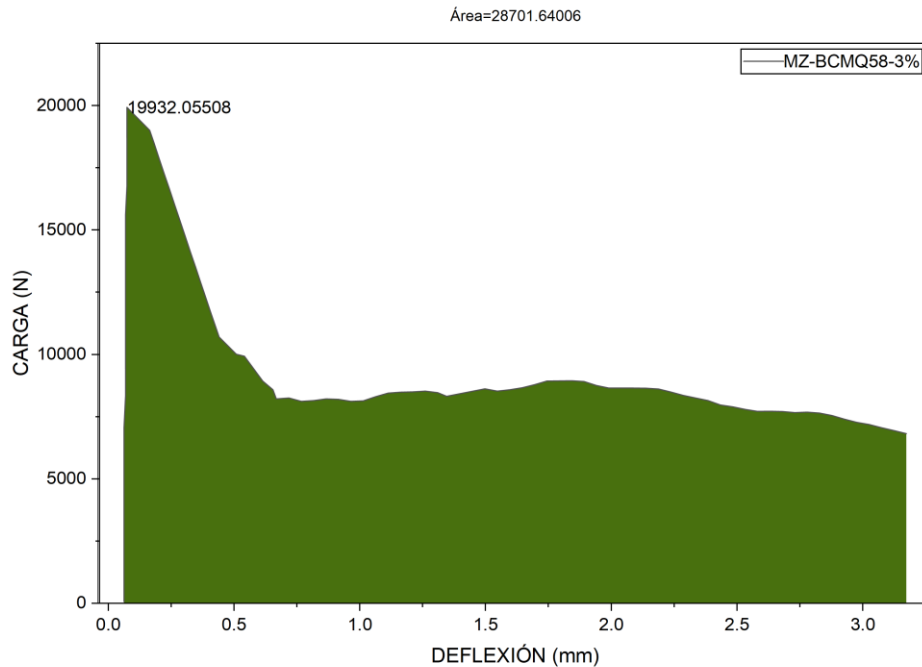
Gráfica 16. Curvas carga vs deflexión MZ-BCM58-2%,2.5%,3%



Gráfica 17. Carga máxima y área bajo la curva MZ-BCM58-2%



Gráfica 18. Carga máxima y área bajo la curva MZ-BCM58-2.5%

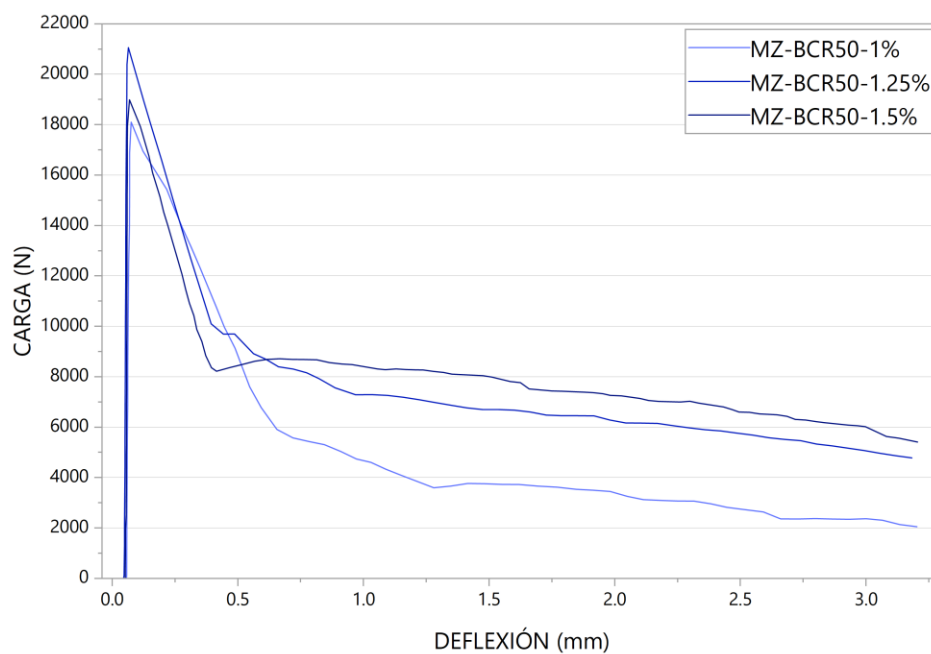


Gráfica 19. Carga máxima y área bajo la curva MZ-BCM58-3%

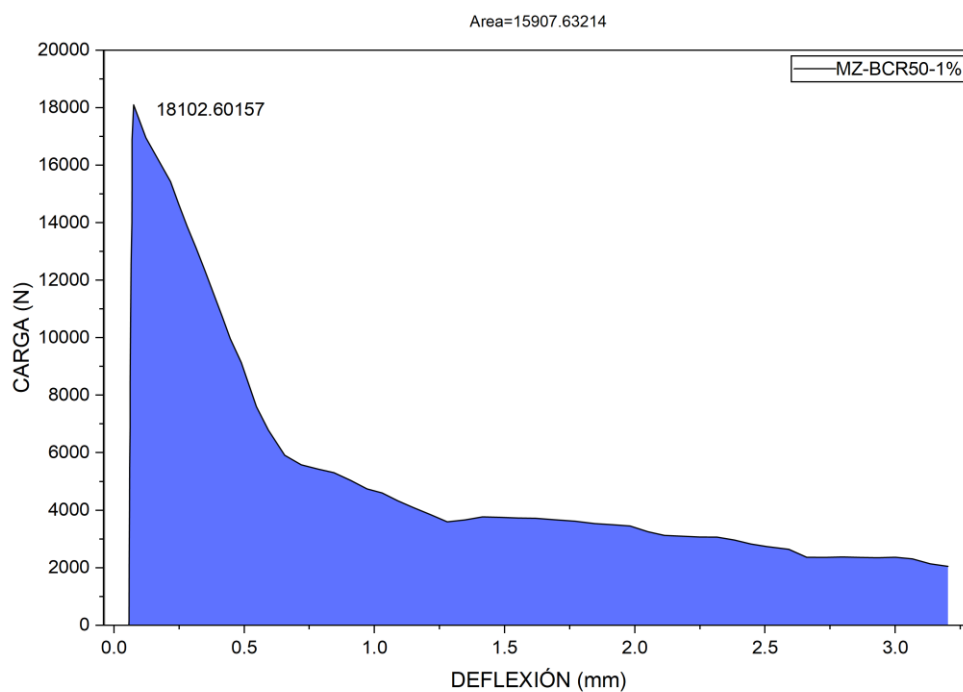
4. MZ-BCR50

En la dosificación de la fibra BCR50 se utilizó la mitad de la superficie específica, resultando en los volúmenes del 1%, 1.25% y 1.5% de la fibra de referencia.

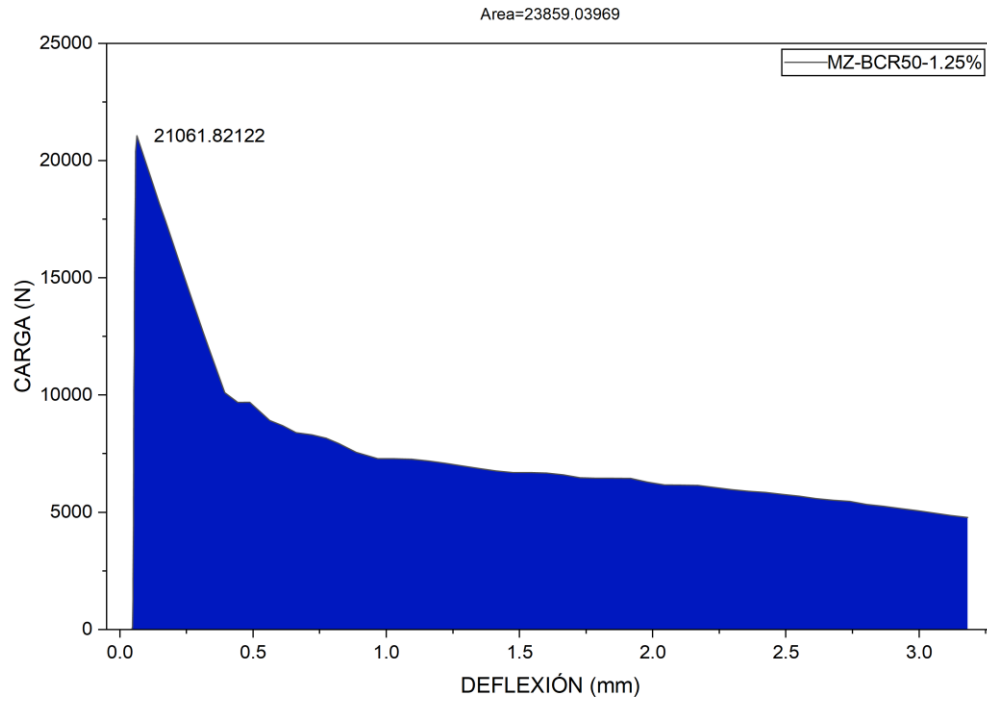
En la Gráfica 20 se muestra el desempeño a flexión de las 3 dosificaciones, obteniendo la carga máxima la dosificación de la S.E.-1.25%, pero aumentando la tenacidad en la dosificación de la S.E.-1.5%. Se pueden observar estos valores en las gráficas 21, 22 y 23, presentándose cargas máximas de 18,102 N, 21,061 N y 18,989 respectivamente. Así como tenacidades de 15.90 J, 23.85 J y 25.51 J.



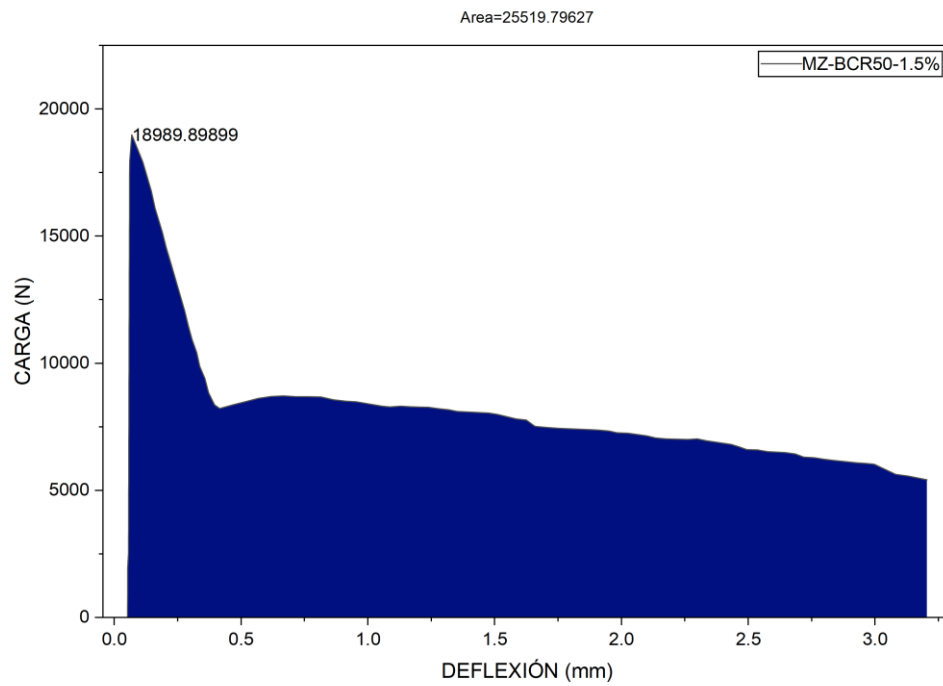
Gráfica 20. Curvas carga vs deflexión MZ-BCR50-1%,1.25%,1.5%



Gráfica 21. Carga máxima y área bajo la curva MZ-BCR50-1%



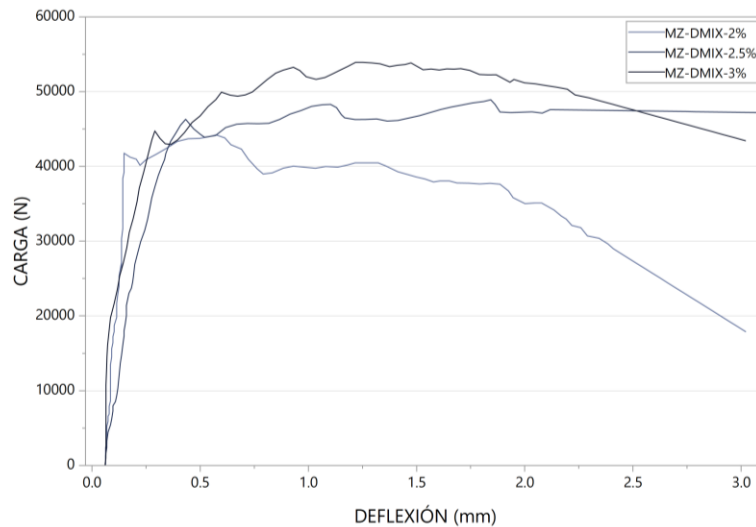
Gráfica 22. Carga máxima y área bajo la curva MZ-BCR50-1.25%



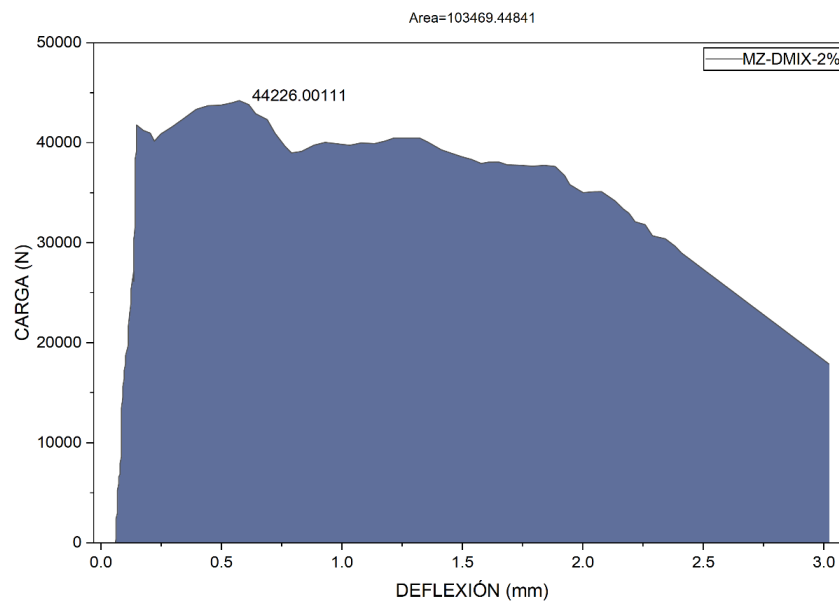
Gráfica 23. Carga máxima y área bajo la curva MZ-BCR50-1.5%

5. MZ-DMIX

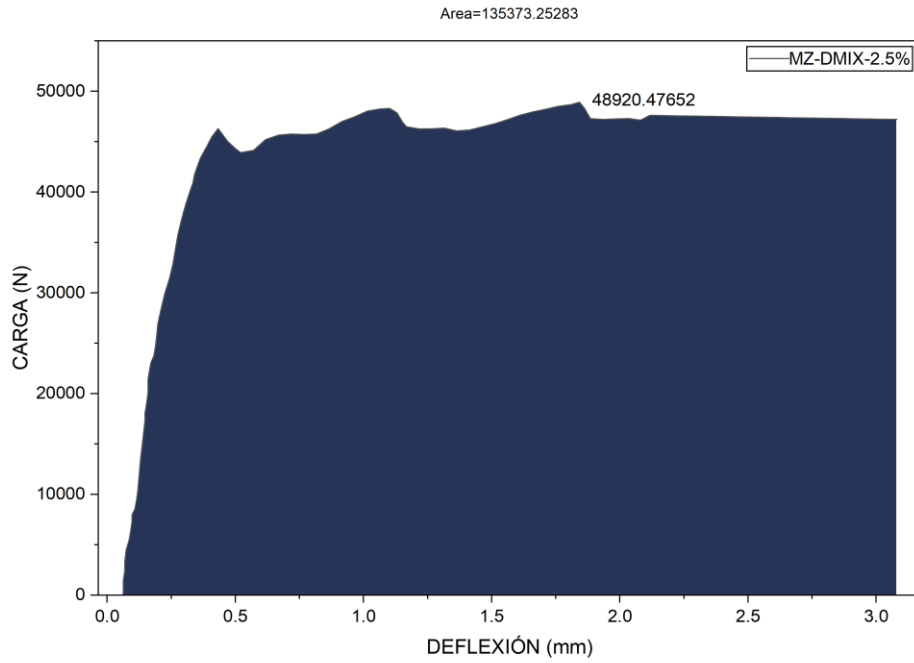
Esta fibra en específico presentó un endurecimiento por deformación, el cual es un comportamiento típico en los UHPC-FR dosificados con fibras de acero, en la Gráfica 24 se muestran las 3 dosificaciones de esta fibra. En las gráficas 25, 26 y 27 se muestran las cargas máximas dando como resultado 44,226 N, 48,920 N y 53,921 N.



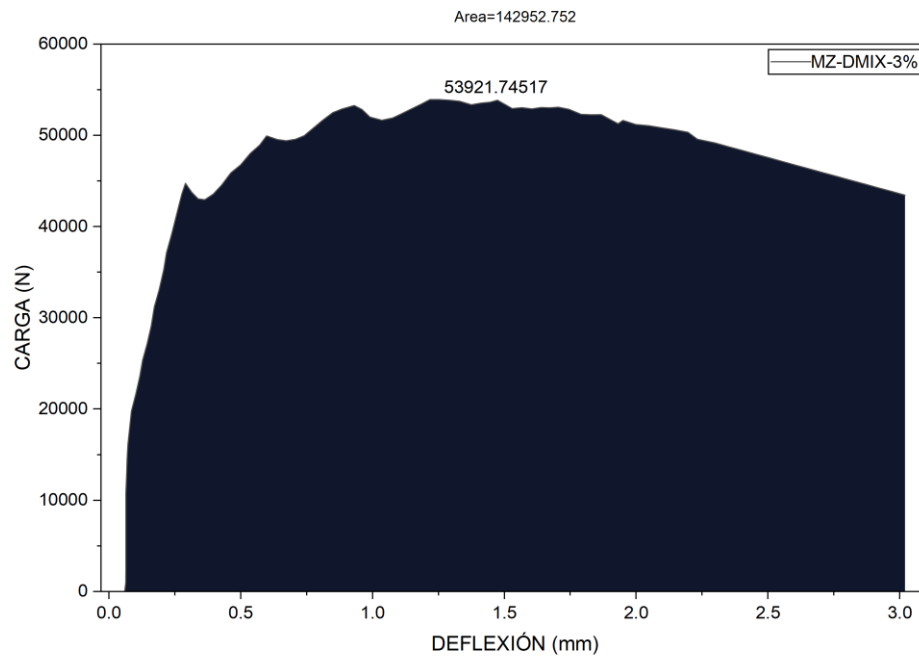
Gráfica 24. Curvas carga vs deflexión MZ-DMIX-2%,2.5%,3%



Gráfica 25. Carga máxima y área bajo la curva MZ-DMIX-2%



Gráfica 26. Carga máxima y área bajo la curva MZ-DMIX-2.5%

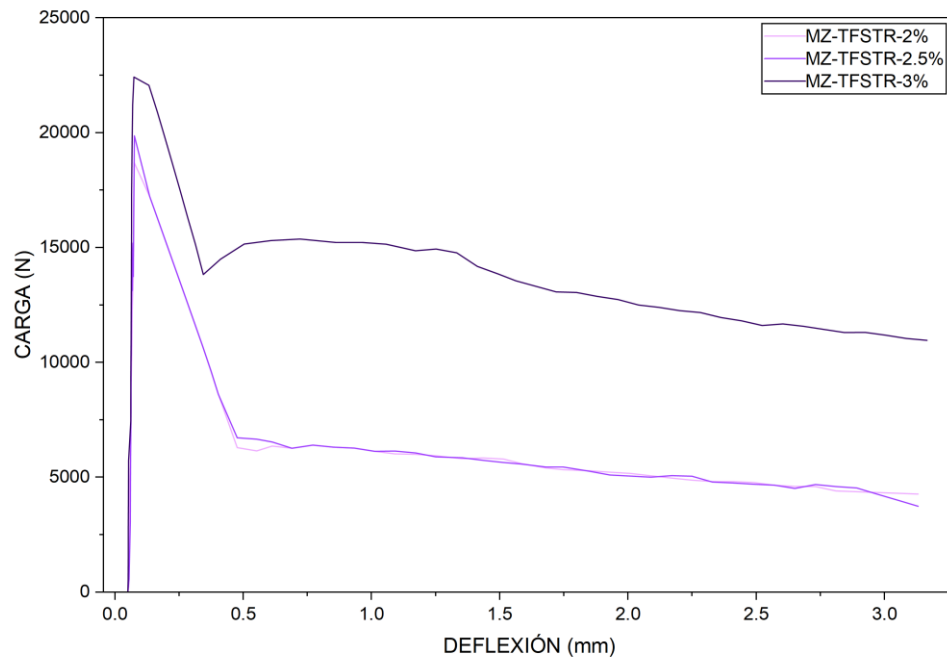


Gráfica 27. Carga máxima y área bajo la curva MZ-DMIX-3%

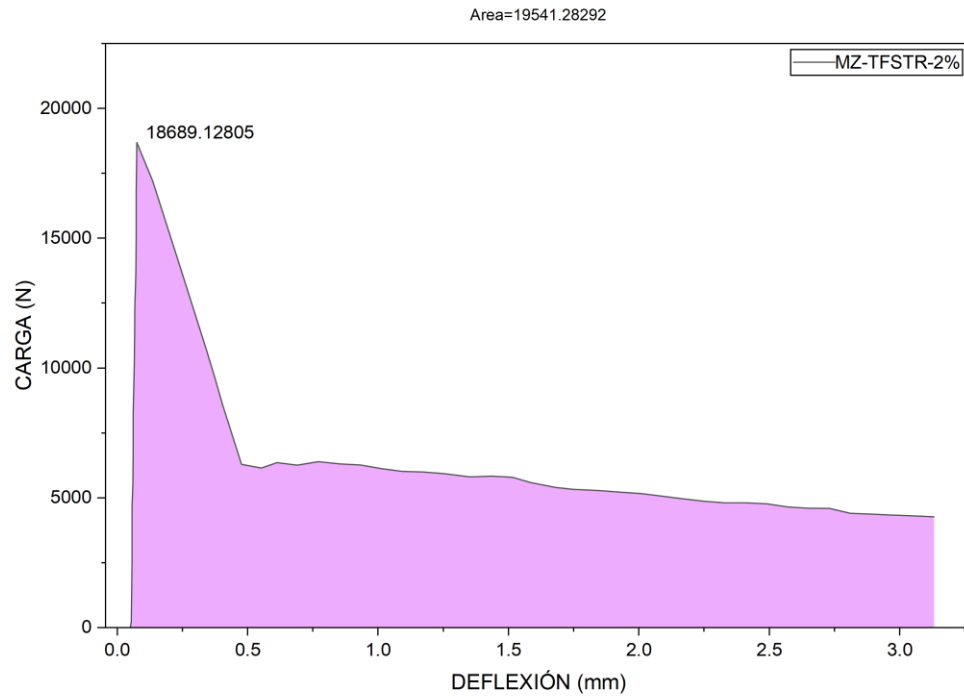
6. MZ-TFSTR

La fibra TFSTR se utilizó como la fibra de referencia, utilizando volúmenes de 2%, 2.5% y 3%, en la Gráfica 28 se muestra el comportamiento a flexión de las tres dosificaciones.

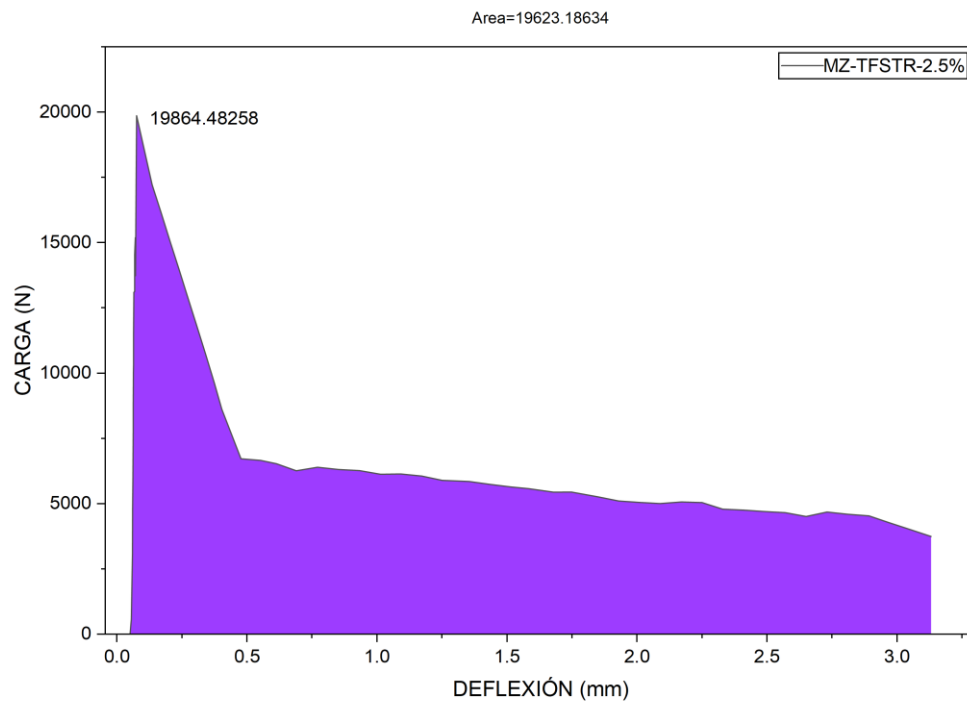
En las gráficas 29, 30 y 31 se obtuvieron las cargas máximas y la tenacidad de cada dosificación, obteniendo 18,689 N, 19,864 N y 22,419 N de cargas máximas.



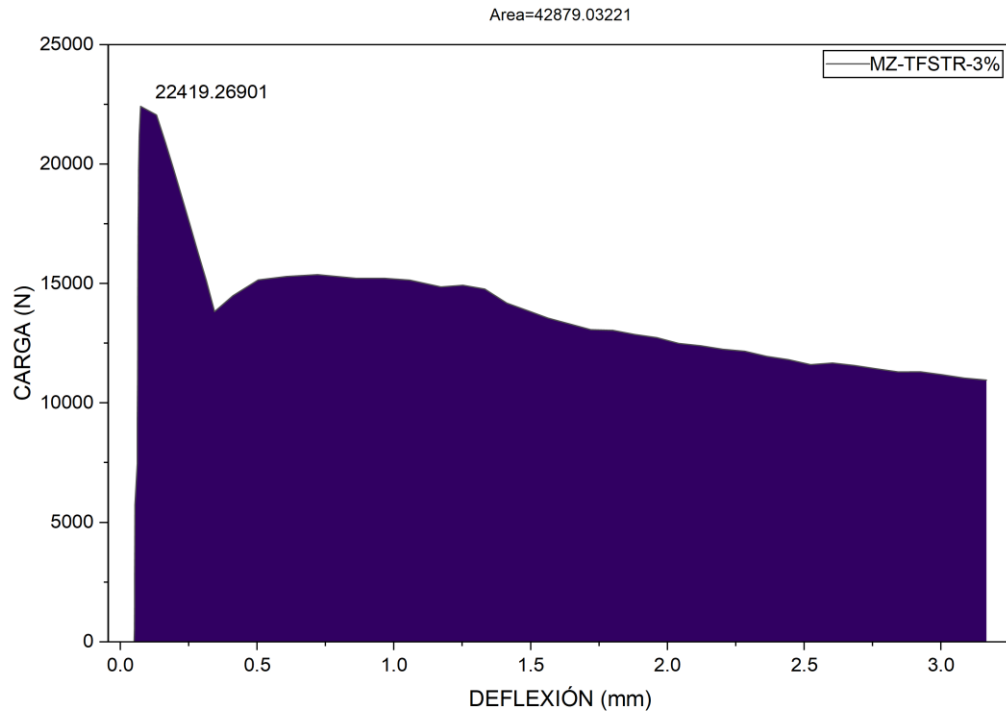
Gráfica 28. Curvas carga vs deflexión MZ-TFSTR-2%,2.5%,3%



Gráfica 29. Carga máxima y área bajo la curva MZ-TFSTR-2%



Gráfica 30. Carga máxima y área bajo la curva MZ-TFSTR-2.5%

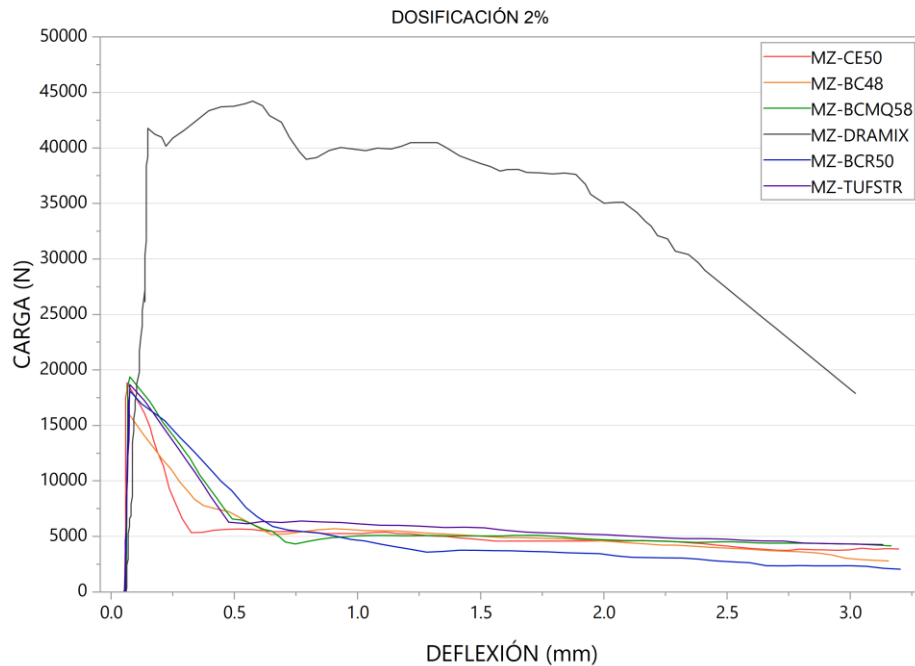


Gráfica 31. Carga máxima y área bajo la curva MZ-TFSTR-3%

5.1.6.3 Comparación de tenacidad entre fibras

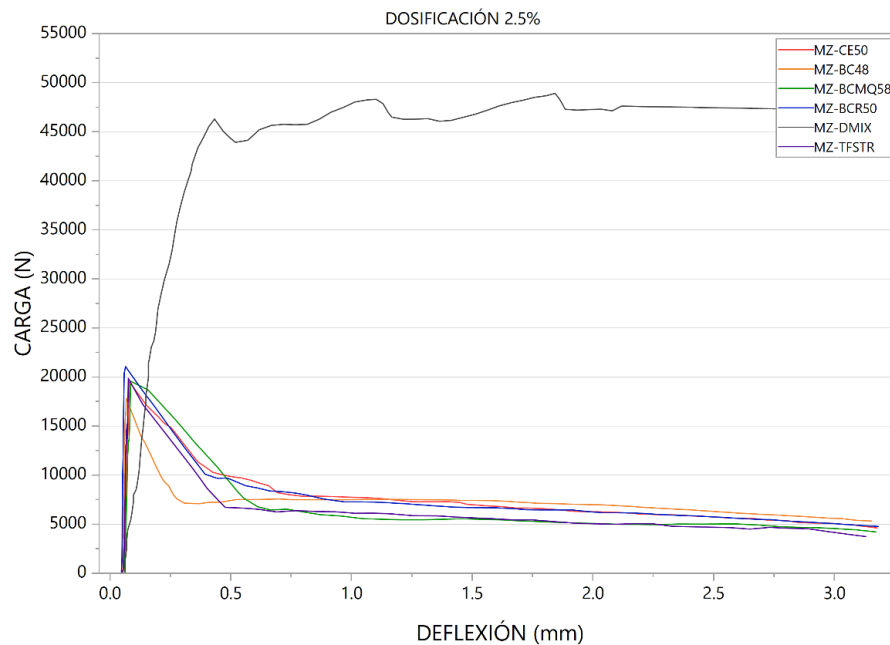
En esta investigación se comparan 5 fibras sintéticas contra 1 fibra acero, la cual fue la que presentó los mejores resultados en cuestión de desempeño mecánico. En las tres dosificaciones utilizadas, la fibra DMIX presenta un endurecimiento por deformación, en el cual la carga máxima se obtiene después que se presenta la primera grieta, en cambio todas las fibras sintéticas, a excepción de la fibra BC48 presentaron un ablandamiento por deformación en el cual su carga máxima se presenta justo en el punto de la primera grieta. Aunque la fibra de acero muestre un mejor desempeño, todas las fibras presentaron ductilidad y su capacidad de seguir deformándose después de la primera grieta, que es en dónde el concreto cede ante la falla.

En la siguiente Gráfica 32 se puede observar como la carga máxima de la fibra DMIX supera en un 2.3 veces la carga máxima de las fibras sintéticas, y en tenacidad las supera arriba del 70%, aunque presenta una caída abrupta de la carga después de los 2 mm de la deflexión, en cambio las fibras sintéticas se mantienen con aproximadamente la misma capacidad residual después de la caída de la carga máxima, mostrando un comportamiento más estable.



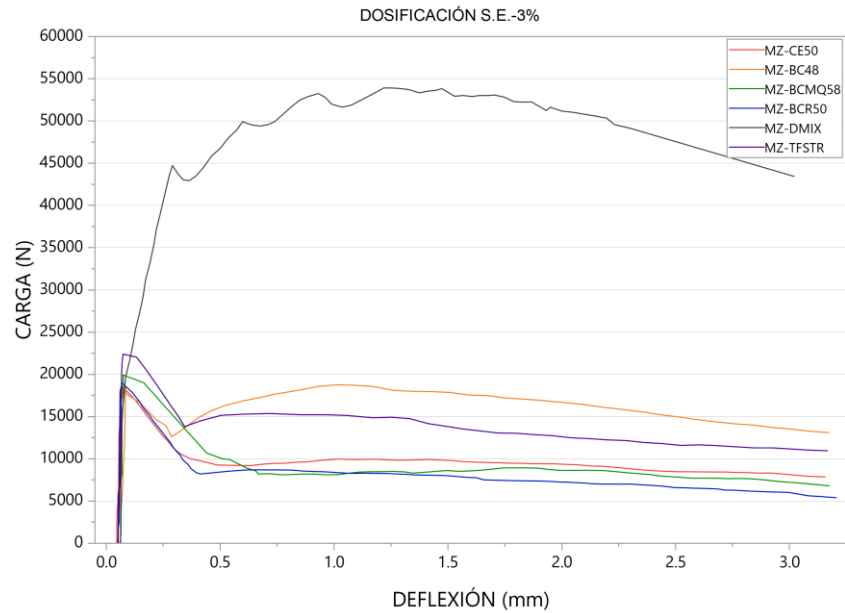
Gráfica 32. Comparativa curva carga deflexión dosificación S.E.-2%

En la dosificación S.E.-2.5%, mostrada en la Gráfica 33, la fibra de acero presenta un comportamiento dúctil, hasta los 3 mm de deflexión, al igual que la dosificación anterior soporta un 2.3 veces más la carga máxima, la mayoría de las fibras sintéticas presentan una caída rápida después de la primera grieta y posteriormente tienden a estabilizarse alrededor de los 4 000 a los 7 000 N. En comparación con el volumen dosificado anterior de la fibra de acero ésta presenta una mejoría en la ductilidad que presenta el material.



Gráfica 33. Comparativa curva carga deflexión dosificación S.E.-2.5%

En la Gráfica 34, se observa el comportamiento de todas las fibras con la dosificación S.E.-3%, en el cual la fibra BC48 fue la única fibra sintética que presentó un endurecimiento por deformación, cabe destacar que de esta fibra se adiciono la mitad de la superficie específica de referencia, la fibra de acero supera en tenacidad a la fibra BC48 en un 65%.



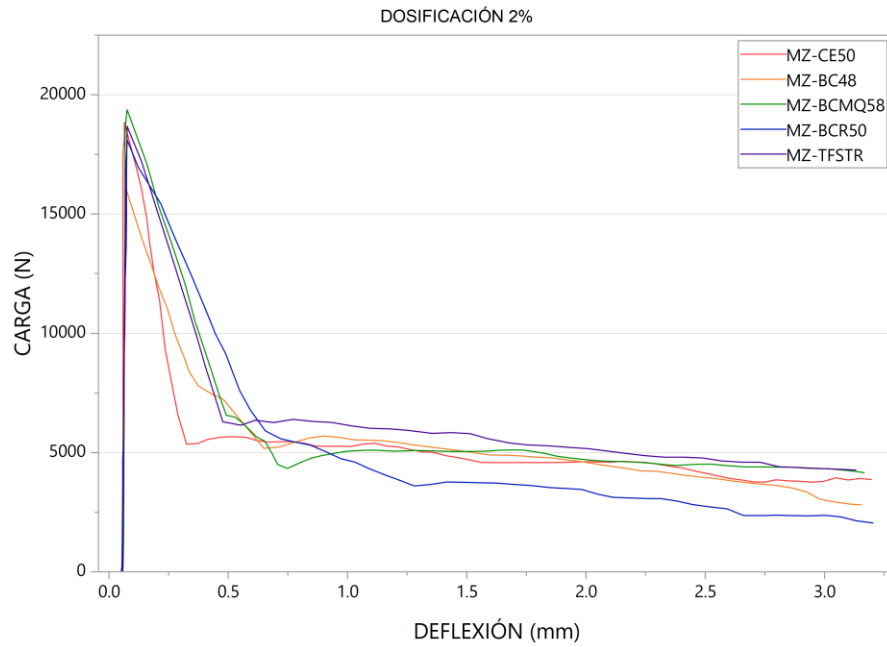
Gráfica 34. Comparativa curva carga deflexión dosificación S.E.-3%

5.1.6.4 Comparación de tenacidad entre fibras sintéticas

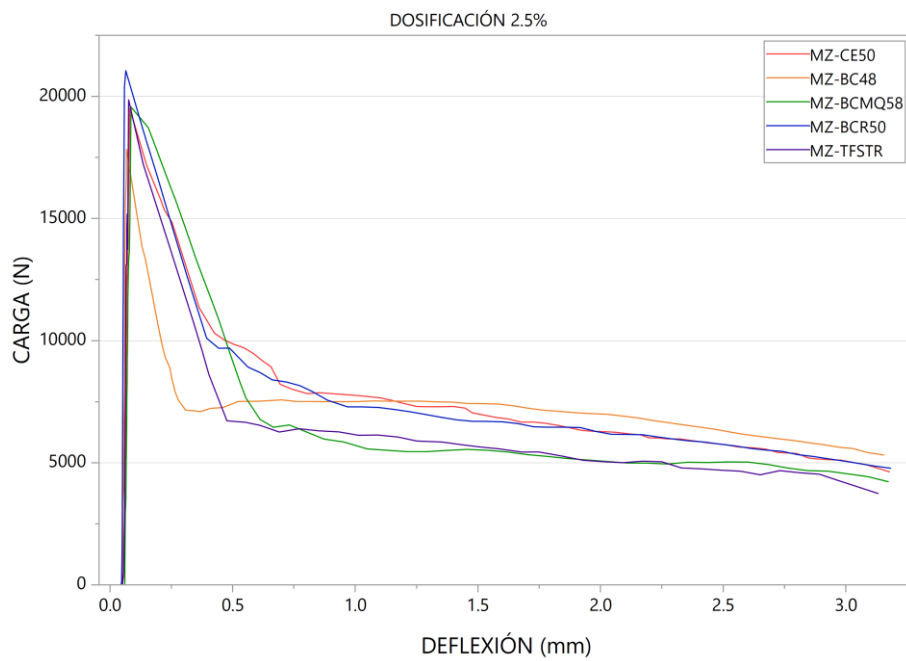
En la Gráfica 35 se puede observar la similitud del comportamiento a flexión de todas las fibras sintéticas utilizadas en esta investigación con la dosificación S.E.-2%, dando como resultado sus cargas máximas de entre los 15,000 N a los 20,000 N y posteriormente presentar una caída de resistencia de carga, para luego mantener su ductilidad y absorción de energía.

En la Gráfica 36, la fibra BCR50 presenta la mayor carga máxima, y las fibras que presentan mayor tenacidad son la BC48, BCR50 y la CE50, destacando que éstas dos primeras mencionadas cuentan con una S.E. menor a la dosificada en comparación con las demás.

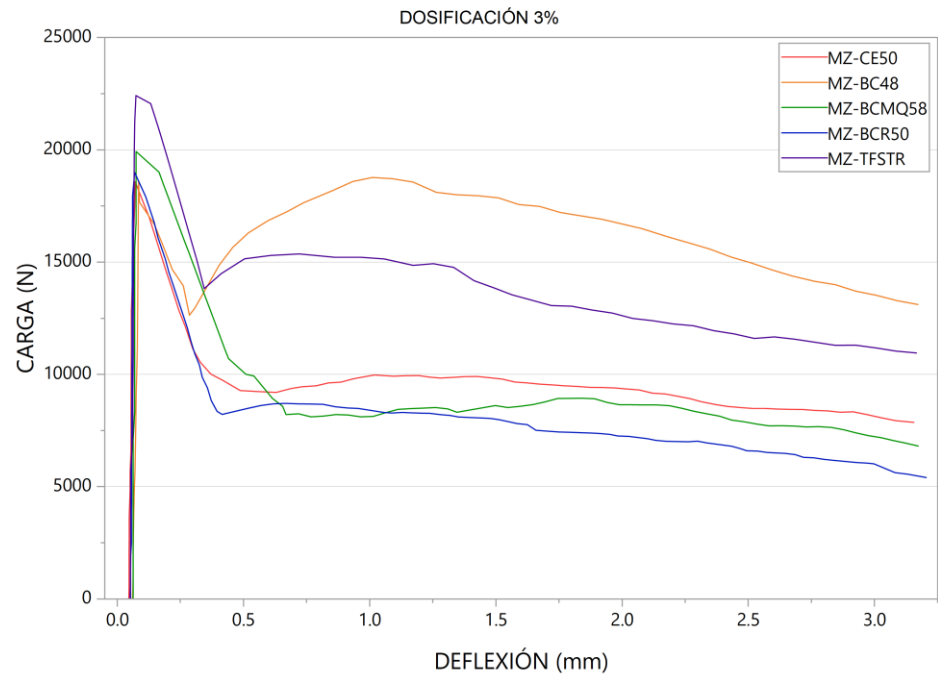
En la Gráfica 37, se observa que la fibra BC48 llega a presentar un endurecimiento por deformación, mientras las demás fibras siguen aumentando significativamente su tenacidad conforme aumenta la S.E. dosificada, cabe señalar que su carga máxima sigue cerca de los 20,000 N.



Gráfica 35. Curva carga deflexión fibras sintéticas dosificación S.E.-2%



Gráfica 36. Curva carga deflexión fibras sintéticas dosificación S.E.-2.5%



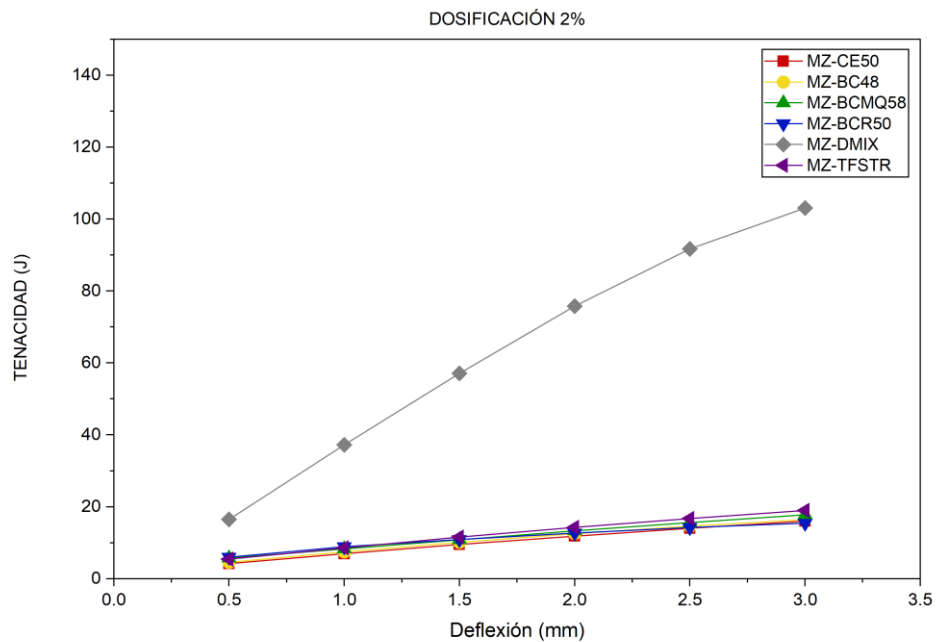
Gráfica 37. Curva carga deflexión fibras sintéticas dosificación S.E.-3%

5.1.6.5 Tenacidad acumulada

La tenacidad acumulada se puede definir como la energía total que un material o estructura puede absorber antes de fallar. En este caso, se calculó la tenacidad desde el inicio de la deflexión a cada 0.5 mm, hasta los 3mm de deflexión.

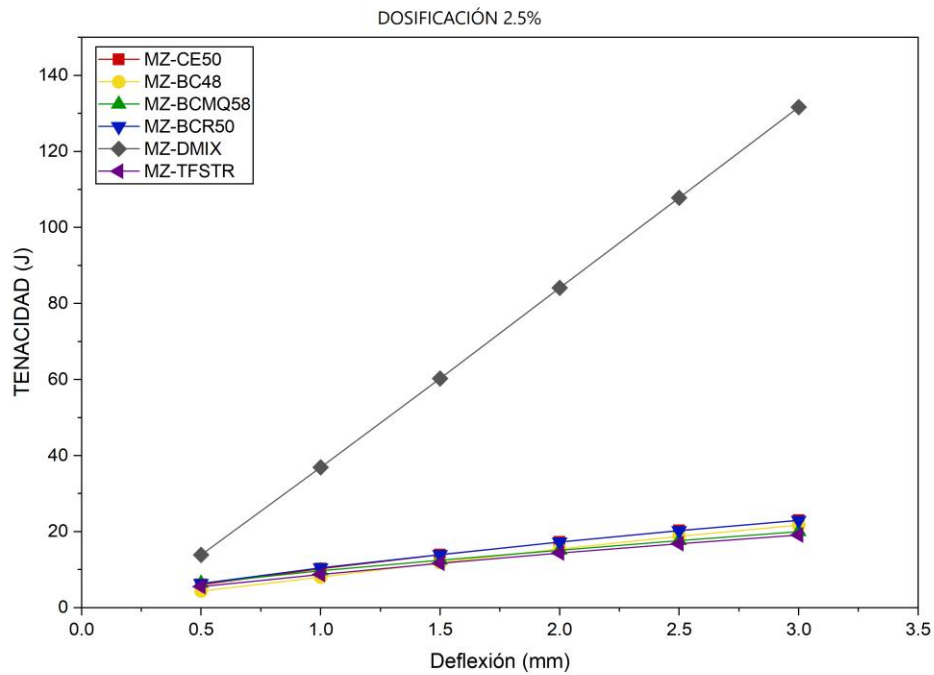
En la Gráfica 38 se puede observar que el material con mayor tenacidad fue el de la MZ-DMIX, ya que la fibra de acero cuenta con características físicas que superan en esta propiedad a las fibras sintéticas, como lo es el tener un mayor módulo de elasticidad, aunque en esta dosificación se presenta una ligera caída de absorción de energía, pudo ser debido a un menor puenteo de fibras, la pérdida progresiva de adherencia fibra-matriz, o un deslizamiento temprano de fibras.

Todas las fibras sintéticas presentan el mismo comportamiento entre ellas teniendo una baja capacidad residual post-fisuración de alrededor de 20 J.



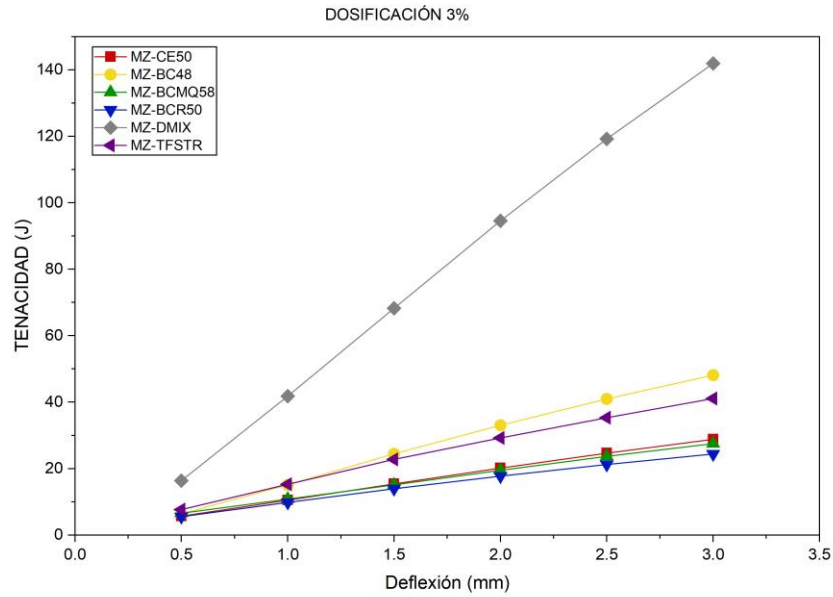
Gráfica 38. Tenacidad vs deflexión dosificación S.E.-2%

En la Gráfica 39 se muestra la tenacidad acumulada de la dosificación S.E.-2.5%, donde las fibras siguen desempeñando casi el mismo comportamiento que con la dosificación anterior pero algunas fibras ya sobrepasan los 20 J, aquí la fibra de acero aumentó considerablemente su tenacidad un 40%.



Gráfica 39. Tenacidad vs deflexión dosificación S.E.-2.5%

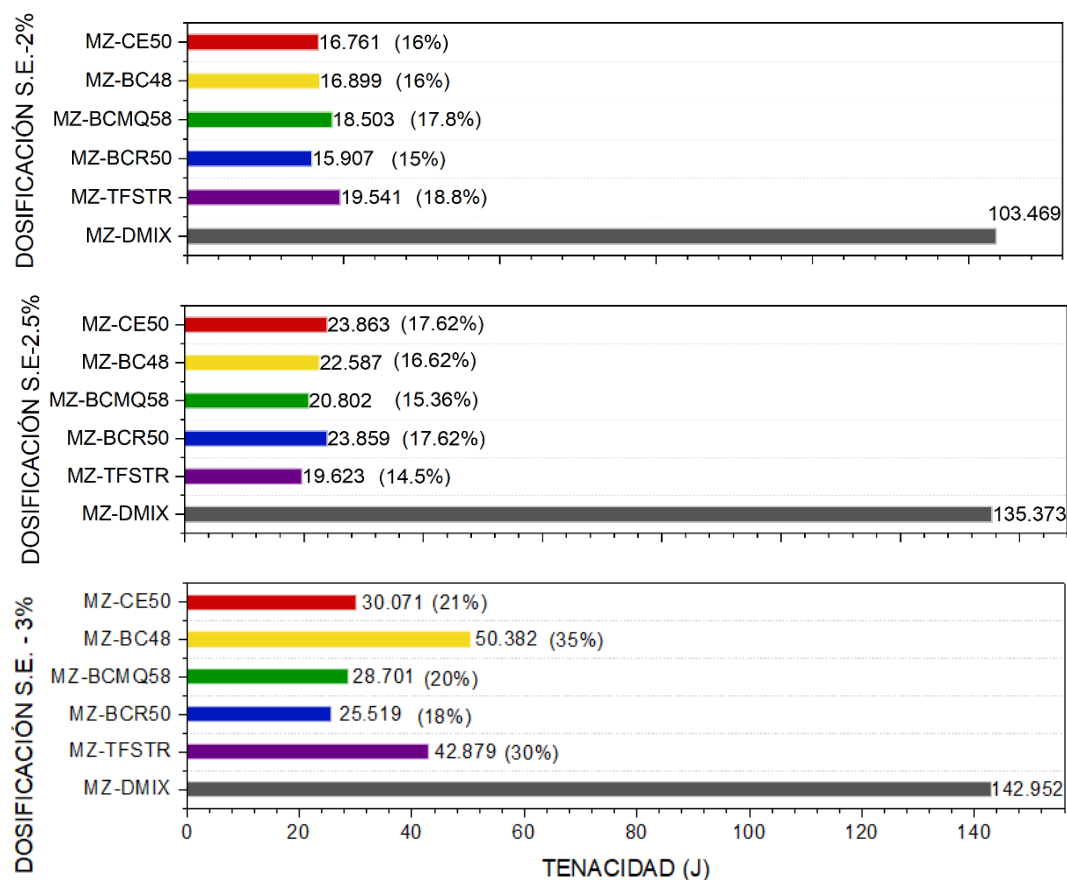
En la Gráfica 40, se hace notorio el aumento de tenacidad entre las fibras sintéticas, donde la fibra BC48 presenta un aumento del 50% a su dosificación anterior, la fibra TFSTR también presenta un aumento de poco más del 50%, la fibra CE50 aumento 7 Joules de su tenacidad anterior y las fibras BCMQ58 y BCR50 aumentaron 8 y 3 Joules respectivamente de su tenacidad anterior.



Gráfica 40. Tenacidad vs deflexión dosificación S.E.-3%

5.1.6.6 Tenacidad en relación a la fibra de acero

En esta investigación se están comparando fibras sintéticas en relación con la fibra de acero que es utilizada comúnmente como refuerzo de concreto, para lograr una mejor comparación se utilizó la S.E. lo cual nos indica que se está utilizando la misma superficie de todas las fibras en la matriz que están trabajando. Las fibras sintéticas suelen ser mejores en ciertos aspectos como lo es tener un menor peso, no se oxidan, tienen compatibilidad química con la matriz, seguridad en el manejo y dosificación, y mejor control de fisuración plástica. Para lograr equiparar la fibra de acero en absorción de energía y refuerzo estructural se muestra en la Gráfica 41 qué porcentaje representa la tenacidad de las fibras sintéticas con la misma S.E.

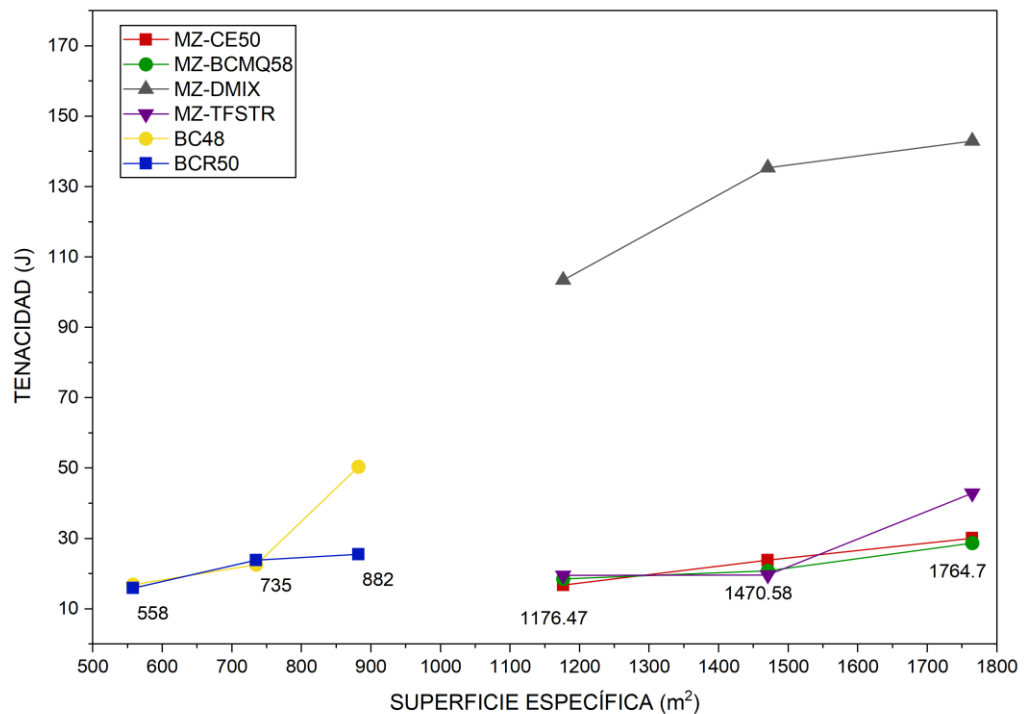


Gráfica 41. Tenacidades en relación a la fibra de acero

En la Gráfica 41, se puede observar que para la dosificación S.E.-2% todas las fibras sintéticas representan menos del 20% de la tenacidad de la fibra de acero, por lo que se necesitaría aproximadamente un 80% más de superficie específica para igualar su tenacidad con el volumen utilizado de la fibra de acero. En el caso de la dosificación S.E.-2.5% las fibras sintéticas representan del 20 al 25% la tenacidad de la fibra de acero, al igual que en la dosificación anterior se necesitaría de un 75 a 80% más de la S.E. dosificada. Para la dosificación S.E.-3% los valores de las fibras sintéticas ya no son aproximados entre sí y con la fibra de mejor desempeño, MZ-BC48-1.5% se aprecia que representa el 35% de la tenacidad de la fibra de acero obtenida con el doble de la dosificación. En este ejemplo se necesitaría 33% más de la S.E. y para las demás fibras aproximadamente el 70% para equiparar la fibra DMIX que presenta el máximo desempeño en esta investigación.

5.1.6.7 Superficie específica utilizada

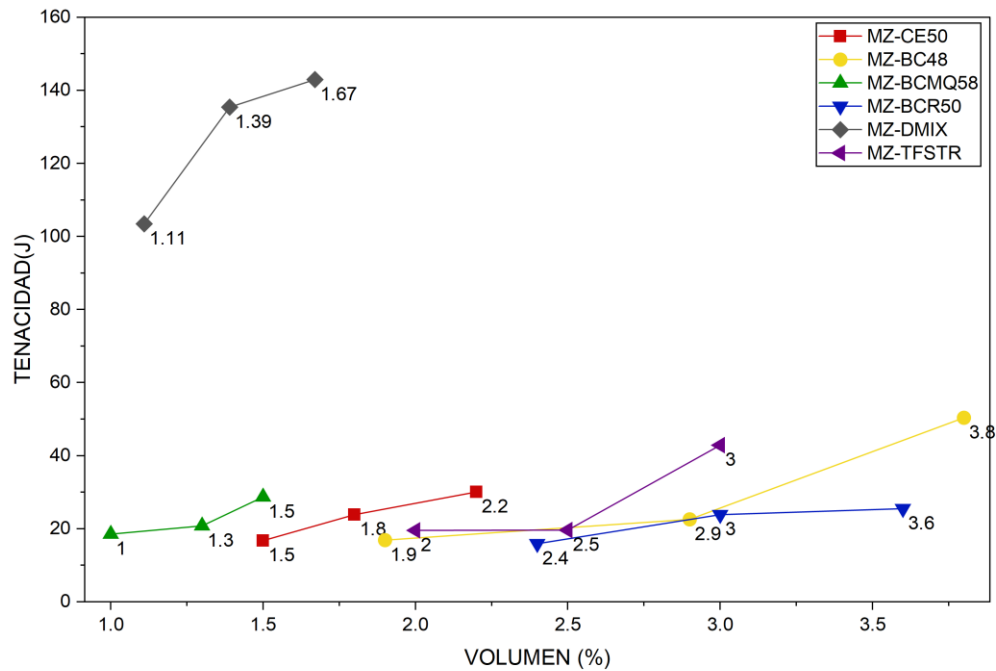
En la siguiente Gráfica 42 se muestran los tres valores de las S.E. que fueron utilizados, de las cuales dos fibras en específico se dosifico la mitad de la S.E. es por ello que se presentan en el lado izquierdo de la gráfica. Se puede estimar que para esas fibras en específico se obtendrían valores mayores a los registrados si se utiliza la misma S.E. que las demás, tomando en cuenta que las características físicas deben ser parecidas o valores muy cercanos para lograr esta comparación.



Gráfica 42. Tenacidades en relación a la superficie específica dosificada

La superficie específica utilizada en las tres dosificaciones con las fibras CE50, BCMQ58, TFSTR y DMIX fue de 1176.47, 1470.58 y 1764.7 m². Y para las fibras BC48 y BCR50 se utilizaron 558, 735 y 882 m².

5.1.6.8 Volumen utilizado

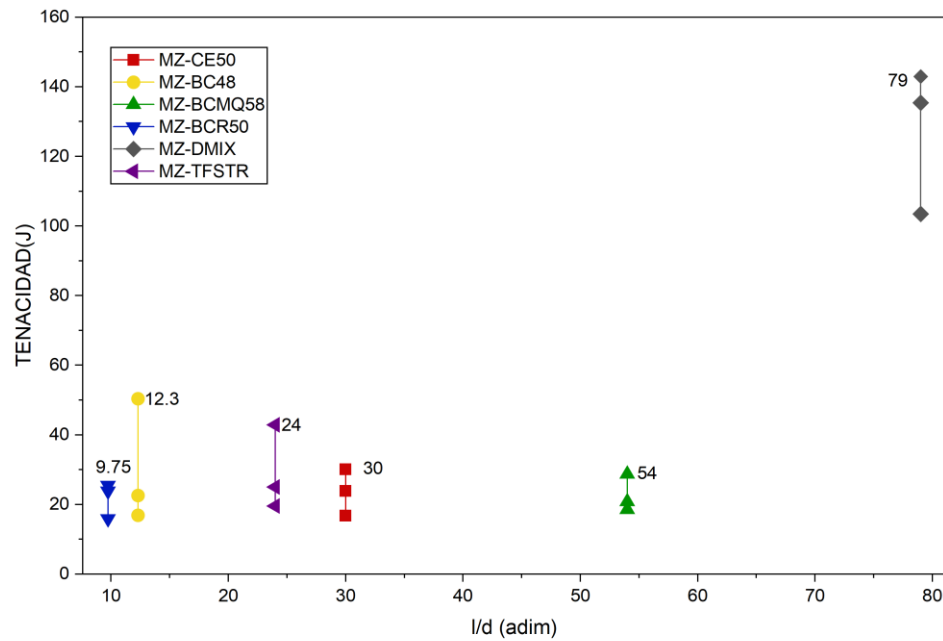


Gráfica 43. Tenacidades en relación al volumen dosificado

Al tomar en cuenta las características físicas de la fibra para su dosificación en S.E., cabe mencionar que como no cuentan con los mismos valores de diámetro y longitud, se obtuvieron diferentes números de filamentos para adicionar a la mezcla de cada fibra, que por su peso y densidad se obtuvieron distintos volúmenes. En la Gráfica 43 se muestran los distintos valores de los volúmenes utilizados, para las fibras sintéticas varían desde el 1% hasta el 3.8% y para la fibra de acero del 1.1% al 1.67%. En muchas investigaciones utilizan este método para comparar las tenacidades sin tomar en consideración que la tenacidad se obtiene de la cantidad de filamentos que se dosifica en la matriz.

5.1.6.8 Relación l/d

La relación que se obtiene en la Gráfica 44, de la longitud entre el diámetro nos puede indicar en las fibras sintéticas que a menor l/d se obtienen mejores resultados de tenacidad, pero en el caso de la fibra de acero que se tiene una relación l/d de 79, se obtienen resultados muy favorables a pesar de la esbeltez de la fibra. Las fibras sintéticas dosificadas tienen una relación de 9.75 hasta 54.



Gráfica 44. Tenacidades en relación a la relación de aspecto l/d

5.2 Conclusiones

1. Los porcentajes de adiciones de agregados finos distribuidos en 75% arena no. 4 y 25% arena no. 5 distribuidos en un porcentaje de 92%, aunados al polvo de caliza CEMEX y OMYA al 6 y 2%, respectivamente, resultaron en una mezcla con el mejor empaquetamiento óptimo.
2. La mezcla óptima para la fabricación de los UHPC fue la mezcla CEM 80- MS 20 con una dosificación de aditivo de 14 mL/kg-cem, presentando valores de resistencia a la compresión de 1100 kg/cm² superando la mezcla de referencia desde las primeras edades de hidratación.
3. El flujo de revenimiento disminuye debido a la fricción generada de las fibras en la mezcla, se observó que a mayor contenido de fibra se obtiene un menor flujo de revenimiento. El menor valor lo presentó la fibra CE50, que cuenta con pequeñas rugosidades en toda su superficie y un diámetro de 0.5 mm, siendo notorio en la dosificación mayor, la única fibra sin rugosidades en su superficie es la fibra DMIX con diámetro de 0.38 mm y presentó ligeramente un mayor flujo de revenimiento que las demás fibras sintéticas.
4. El contenido de aire en las mezclas incrementó con la adición de fibras debido a la generación de vacíos provocado por el acomodo de éstas con las partículas de agregados durante el mezclado, en mayor medida con la fibra DMIX que en su morfología cuenta ganchos en sus extremos, llegando a valores de hasta 4.1% en su dosificación mayor, puede concluirse que la fibra de acero genera más contenido de aire en la matriz que las fibras sintéticas independientemente de su morfología y su rugosidad. Todas las fibras sintéticas presentaron contenidos de aire mayores a 1% a excepción de la fibra TFSTR que es una fibra sin rugosidades transversales en su superficie.

5. Con los valores de tenacidad obtenidos se observa que, al aumentar la superficie específica, la tenacidad tiende a incrementarse, aunque con distinta magnitud para cada material. La mezcla MZ-DMIX destacó notablemente por alcanzar los valores más altos de tenacidad, pasando de aproximadamente 103 J hasta 142.95 J, lo que indica una mayor capacidad de absorción de energía y mejor desempeño mecánico frente a las demás mezclas. Por otro lado, las mezclas MZ-CE50 y MZ-BCM58 mostraron incrementos moderados y relativamente estables, mientras que la MZ-TFSTR presentó un aumento significativo en la dosificación más alta de superficie específica. En el caso de las mezclas MZ-BC48 y MZ-BCR50, aunque trabajaron con menores superficies específicas, sus valores de tenacidad fueron similares, evidenciando una relación positiva entre la superficie específica y la resistencia al impacto o fractura del material.
6. Aunque la mezcla MZ-DMIX presentó los valores más altos de tenacidad en todas las dosificaciones, las fibras sintéticas demostraron un comportamiento eficiente y competitivo considerando la misma proporción de adición. En particular, las mezclas MZ-BC48 y MZ-TFSTR alcanzaron incrementos significativos de tenacidad a medida que aumentó la dosificación, llegando a representar hasta un 35% y 30% del desempeño de la fibra de acero, respectivamente, en la dosificación del 3%. Esto evidencia que las fibras sintéticas contribuyen de manera efectiva a la absorción de energía y al control de propagación de grietas, ofreciendo además ventajas asociadas a menor peso, resistencia a la corrosión y mejor distribución dentro de la matriz cementante. Por tanto, aunque la fibra de acero proporciona mayor tenacidad absoluta, las fibras sintéticas presentan una alternativa viable y eficiente cuando se busca optimizar desempeño mecánico, durabilidad y facilidad de manejo con igual dosificación.
7. La tenacidad está influenciada tanto por el volumen dosificado como por la superficie específica de cada fibra, observándose una tendencia general de incremento de la tenacidad a medida que aumenta el contenido de fibra. Sin embargo, el comportamiento depende del tipo de refuerzo empleado. Si existe una

relación directa entre el volumen de fibra y la tenacidad, pero la eficiencia final depende de la interacción entre la superficie específica, el tipo de fibra y su capacidad de adherencia con la matriz.

8. El mayor desempeño de la fibra de acero se relaciona directamente con su elevado módulo de elasticidad, cercano a 200 GPa, lo que permite una mayor transferencia de esfuerzos y tenacidad. En contraste, las fibras sintéticas presentan módulos inferiores. A pesar de que las fibras de poliolefina presentan generalmente un mayor módulo de elasticidad que las fibras de polipropileno–polietileno (PP-PE), en los resultados experimentales las fibras PP-PE mostraron un mejor desempeño en tenacidad. Este comportamiento puede atribuirse a una mejor adherencia con la matriz cementante, una distribución más homogénea dentro de la mezcla y una mayor capacidad de deformación antes de la falla. Asimismo, factores como la geometría de la fibra, relación de aspecto, textura superficial y dispersión influyen significativamente en el comportamiento post-fisuración, pudiendo superar la influencia directa del módulo de elasticidad.
9. Los resultados obtenidos evidencian una clara diferencia en el desempeño mecánico entre las fibras de acero y las fibras sintéticas, donde la fibra de acero (MZ-DMIX) presentó los mayores valores de tenacidad, sin embargo, este mayor desempeño estructural se asocia también a un mayor costo, mayor densidad y posibles limitaciones relacionadas con la trabajabilidad y la corrosión. En contraste, las fibras sintéticas, aunque presentan menores valores absolutos de tenacidad, mostraron un comportamiento eficiente en la disipación progresiva de energía y en el control de fisuración, especialmente en las mezclas PP-PE y polipropileno.
10. Con base en los resultados obtenidos, se observa que la relación de aspecto l/d influye de manera significativa en el comportamiento a tenacidad del concreto reforzado con fibras. En el caso de la fibra de acero, con una relación $l/d=79$, se obtuvieron los valores más altos de tenacidad, lo cual indica que, a pesar de su

elevada esbeltez, la fibra presenta una excelente eficiencia en el puente de fisuras y en la transferencia de esfuerzos dentro de la matriz. Por otro lado, las fibras sintéticas, con relaciones de aspecto entre 9.75 y 54, muestran un comportamiento más dependiente del incremento en su dosificación y de su interacción con la matriz. Aunque sus valores de tenacidad son inferiores a los del acero, estas fibras presentan una respuesta más gradual y estable, lo que sugiere que su efectividad está asociada a la cantidad de filamentos activos y a su distribución en el concreto, más que a una alta esbeltez individual. En conclusión, en las fibras sintéticas, un rango intermedio de esbeltez puede resultar suficiente para generar un comportamiento eficiente en el control de fisuración y la disipación progresiva de energía, dependiendo de su adecuada dispersión y adherencia con la matriz.

11. Las fibras sintéticas muestran una respuesta más gradual y estable al incremento de volumen, lo que indica que su desempeño está más relacionado con la cantidad de filamentos activos dentro de la matriz que con su rigidez. Desde una perspectiva integral, se evidencia que la fibra de acero optimiza el desempeño mecánico máximo del material, mientras que las fibras sintéticas, ofrecen una respuesta más eficiente en términos de distribución de esfuerzos, control de fisuración y comportamiento progresivo frente al aumento de superficie específica y volumen dosificado. Al considerar el desempeño junto con el costo y la trabajabilidad, las fibras sintéticas representan una alternativa técnicamente viable, ya que permiten mejorar el comportamiento post-fisuración del concreto con una menor inversión.

REFERENCIAS

- [1] Graybeal, B. (2006) "Structural Behavior of Ultra-High Performance Concrete Prestressed-Girders" Report No. FHWA-HRT-06-115, Federal Highway Administration, Washington, DC, Aug., 104 pp.
- [2] Mobasher, B., and Li, C. Y. (1996). "Effect of interfacial properties on the crack propagation in cementitious composites." *Advanced Cement Based Materials*, 4, 93–105.
- [3] Morgan, D. R.; McAskill, N.; Richardson, B. W.; and Zellers, R. C., "A Comparative Evaluation of Plain, Polypropylene Fiber, Steel Fiber, and Wire Mesh Reinforced Shotcrete," *Transportation Research Board*, Washington D. C., Jan. 1989.
- [4] Ramakrishnan, V., and Bjorn, J. L., "Fatigue Strength and Endurance Limit of Plain and Fiber Reinforced Composites—A Critical Review," *Proceedings of the International Symposium on Fatigue and Fracture in Steel and Concrete Structures*, Madras, India, Dec. 1991, pp. 381-405.
- [5] Romualdi, J. P., and Batson, G. B. (1963). "Mechanics of crack arrest in concrete." *Journal of Engineering Mechanics*, 89, 147–168.
- [6] Z. Wu, K.H. Khayat, C. Shi, How do fiber shape and matrix composition affect fiber pullout behavior and flexural properties of UHPC?, *Cem. Concr. Compos.* 90 (2018) 193–201, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.021>
- [7] Mishra, O. and Singh, S.P. (2019) "An overview of microstructural and material properties of ultra-high performance concrete", *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, Vol. 8(2), Pag. 97-143
- [8] C. Lee, S. Lee, N. Nguyen, Modeling of compressive strength development of high early strength concrete at different curing temperatures, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 10 (2) (2016) 205–219,
- [9] Richard, P. and Cheyrezy, M. (1995) "Composition of Reactive Powder Concretes." *Cement and Concrete Research*, Pag. 1501-1511.
- [10] Mehta, P. Kumar, and Paulo J. M. Monteiro. 2014. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education.

- [11] Nematollahi, B., Saifulnaz, M. R., Jaafar, S., and Voo, Y. L. (2012). "A review on ultra-high performance 'ductile' concrete (UHPC) technology", *International Journal of Civil & Structural Engineering*, Vol. 2(3), Pag. 1003-1018
- [12] Rouhollah, R., Mohammad, Z., Khaled S., Davood M., Sayyed, M. and Hossein F. (2018) "The effect of specific surface area of macro fibers on energy absorption capacity of concrete". *The Journal of The Textile Institute*, DOI: 10.1080/00405000.2018.1512040
- [13] Zollo, R. (1997) "Fibre-reinforced concrete: an overview after 30 years of development." *Cement and Concrete Composites*. Pag 107–122.
- [14] Babafemi, A., & Boshoff, W. (2017). "Pull-out response of macro synthetic fibre from concrete matrix: Effect of loading rate and embedment length." *Construction and Building Materials*, 135, 590–599.
- [15] Yao, W., Li, J., & Wu, K. (2003). "Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction." *Cement and Concrete Research*, 33, 27–30.
- [16] Currie, B., & Gardiner, T. (1989). "Bond between polypropylene fibres and cement matrix." *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 11, 3–9
- [17] Bentur, A. (2000). "Role of interfaces in controlling durability of fiber reinforce cements." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12, 2–7.
- [18] Rouhollah, R., Mohammad, Z., Khaled S., Davood M., Sayyed, M. and Hossein F. (2018) "The effect of specific surface area of macro fibers on energy absorption capacity of concrete". *The Journal of The Textile Institute*, DOI: 10.1080/00405000.2018.1512040
- [19] Kim DJ, Park SH, Ryu GS, Koh KT. Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers. *Constr Build Mater* 2011;25(11):4144–55.
- [20] Yoo DY, Lee JH, Yoon YS. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites. *Compos Struct* 2013;106:742–53.

- [21] Aydın S, Baradan B. The effect of fiber properties on high performance alkaliactivated slag/silica fume mortars. *Compos Part B-Eng* 2013;45(1):63–9.
- [22] Wille K, Kim DJ, Naaman AE. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. *Mater Struct* 2011;44(3):583–98.
- [23] Doo-Yeol Yoo, Young-Soo Yoon, Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers, *Engineering Structures*, Volume 102, 2015, Pages 409-423
- [24] Afroughsabet, V., Biolzi, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). Highperformancfiber-reinforced concrete: A review. *Journal of Materials Science*, 51, 6517–6551.
- [25] Golding, *Polymers and Resins*, D. Van Nostrand Co., 1959, pp. 288-289
- [26] Cook, J. G., *Handbook of Textile Fibers*, Morrow Publishing Company, Ltd., Durham, England, 1984, pp. 261-283.
- [27] A. Khajuria, K. Bohra and P. Balaguru (Eds.), *Durability of Concrete* American Concrete Institute (1991).
- [28] J. K. Patel, N. B. Desai and J. C. Rana, *Fibre Reinforced Cements and Concretes: Recent Developments* (R. N. Swamy and B. Barr Eds.), Elsevier Applied Science, London (1989).
- [29] Y. Wang, S. Backer and V. C. Li, *J. Mater. Sci.* 428 1-91 (1987).
- [30] H. H. Yang, *Manmade Fibers: Their Origin and Development* (R. B. Seymour and R. S. Porter Eds.), Elsevier Applied Science, London (1993).
- [31] P. Soroushian, Z. Bayasi and M. Nagi, *Fibre Reinforced Cements and Concretes: Recent Developments* (R. N. Swamy and B. Barr Eds.), Elsevier Applied Science, London (1989).
- [32] O. P. Ratra, *Fibre Reinforced Cements and Concretes: Recent Developments* (R. N. Swamy and B. Barr Eds.), Elsevier Applied Science, London (1989).
- [33] Z. Bayasi and G. Peterson, *Fibre Reinforced Cements and Concretes: Recent Developments* (R. N. Swamy and B. Barr Eds.), Elsevier Applied Science, London. 1989.

- [34] Mishra, O. and Singh, S.P. (2019) “An overview of microstructural and material properties of ultra-high performance concrete”, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, Vol. 8(2), Pag. 97-143.
- [35] Matsuo, S.; Matsuoka, S.; Masuda, A.; Yanagi, H. A Study on Approximation Method of Tension Softening Curve of Steel Fiber Reinforced Concrete; AEDIFICATIO Publishers: Freiburg, Germany, 1995.
- [36] G. Morcous, A. Akhnoukh, Reliability analysis of NU girders designed using AASHTO LRFD, in: *Proceedings of the American Society of Civil Engineers Structures Congress*, CA, 2007
- [37] T. Akcaoglu, M. Tokyay, T. Celik, Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression, *Cem. Concr. Compos.* 26 (No. 6) (2004) 633–638
- [38] Z. Wu, K.H. Khayat, C. Shi, Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high-performance concrete with silica fume content, *Cem. Concr. Res.* 123 (2019) 1–12, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105786>.
- [39] Hisseine, O. A., & Tagnit-Hamou, A. (2020). Nanocellulose for ecological nanoengineered strain-hardening cementitious composites incorporating high-volume ground-glass pozzolans. *Cement and Concrete Composites*, 112
- [40] C. Lee, S. Lee, N. Nguyen, Modeling of compressive strength development of high early strength concrete at different curing temperatures, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 10 (2) (2016) 205–219,
- [41] Sidiq, A., Gravina, R., Setunge, S., & Giustozzi, F. (2020). The effectiveness of Super Absorbent polymers and superplasticizer in self-healing of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 253, 119175.
- [42] W.B. Fuller, S.E. Thompson, The laws of proportioning concrete, *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 33 (1907) 222–298.

[43] A.H.M. Andreasen, J. Andersen, Über die Beziehungen zwischen Kornabstufungen und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten), Kolloid Z. 50 (1930) 217–228